

GLI ISOTOPI STABILI DELL'ACQUA COME STRUMENTO FONDAMENTALE NELLO STUDIO DEGLI ACQUIFERI CARSICI: ALCUNI ESEMPI DI APPLICAZIONE SUI COMPLESSI CARBONATICI DELLE ALPI APUANE (TOSCANA NW)

STABLE WATER ISOTOPES AS FUNDAMENTAL TOOL IN KARST AQUIFER STUDIES: SOME RESULTS FROM ISOTOPIC APPLICATIONS IN THE APUAN ALPS CARBONATIC COMPLEXES (NW TUSCANY, ITALY)

MARCO DOVERI, MATIA MENICHINI & ANDREA CERRINA FERONI

IGG – Istituto di Geoscienze e Georisorse - CNR di Pisa (Italy)

RIASSUNTO

La gestione e la salvaguardia delle risorse idriche in ambiente carsico necessitano di una dettagliata conoscenza del sistema acquifero da ottenere attraverso un approccio multidisciplinare che abbracci non solo valutazioni di carattere idrogeologico/strutturale, ma anche l'uso di strumenti non comunemente utilizzati in idrogeologia, come quello dei rapporti isotopici.

Nel presente lavoro sono riportati alcuni casi di studio riguardanti gli acquiferi carsici dei bacini del Torrente Carrione, Fiume Frigido e Fiume Versilia (Alpi Apuane, Toscana), nel corso dei quali si è fatto utilizzo principalmente dei rapporti isotopici $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e $^2\text{H}/^1\text{H}$ della molecola dell'acqua e marginalmente del rapporto $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ del carbonio inorganico in soluzione. I dati isotopici e la loro interpretazione nel rispetto del contesto idrogeologico e geologico-strutturale hanno permesso di ottenere informazioni sulle condizioni idrodinamiche in acquifero, individuare i bacini idrogeologici delle principali emergenze e riconoscere differenti sistemi di circolazione drenati da sorgenti tra di loro vicine ed aventi un simile chimismo.

In definitiva, i risultati ottenuti confermano come nel caso dei sistemi carsici, in cui è spesso difficile la conduzione di indagini idrogeologiche convenzionali, lo strumento isotopico ricopra un ruolo fondamentale nello studio della circolazione idrica.

TERMINI CHIAVE: rapporti isotopici, acquiferi carsici, Alpi Apuane, aree di alimentazione, condizioni idrodinamiche

INTRODUZIONE

In uno scenario caratterizzato da una forte pressione antropica, con conseguenti fenomeni di degradazione delle varie matrici ambientali, tra cui quella idrica, molti dei sistemi acquiferi convenzionalmente sfruttati, con particolare riferimento a quelli delle pianure costiere, presentano condizioni di forte criticità, sia per la qualità delle acque, sia sotto l'aspetto delle quantità. In questo contesto i sistemi acquiferi carsici costituiscono una importante alternativa per l'approvvigionamento idrico. Il ruolo strategico di questi sistemi è definito in ragione sia di una elevata qualità delle acque in essi contenuta, garantita anche da una limitata antropizzazione dei territori in cui questi generalmente si sviluppano, sia dei quantitativi idrici che questi sistemi sono in grado di con-

ABSTRACT

The management and protection of water resources in karst environment require detailed knowledge of the aquifer system which can be obtained through a multidisciplinary approach, including not only hydrogeological/structural assessment, but also the use of tools not commonly used in hydrogeology, as the isotope ratios.

In the present work some examples of isotopic applications on karst aquifers are discussed in relation to hydrogeological studies carried out in the Carrione Stream, Frigido River, and Versilia River catchments (Apuan Alps, Tuscany). In particular, during such studies the isotopic ratios $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^2\text{H}/^1\text{H}$ of the water molecule, mainly, and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ of inorganic carbon in solution were used.

The isotopic data, and their comparison with the hydrogeological and structural-geological ones, were useful: to obtain information about the hydrodynamic conditions in the aquifer; to define the recharge area of main springs; and to identify different circulation systems drained by closing springs which have similar chemistry.

The obtained results confirm that in karst systems, where it is often difficult to carry out conventional hydrogeological surveys, the isotopic instruments have a fundamental role in the study of water circulation.

KEY WORDS: isotopic ratio, karst aquifer, Apuan Alps, recharge area, hydrodynamic conditions

INTRODUCTION

In a scenario characterized by a strong human pressure, where degradation of various environmental matrixes, including the water, is present, many of the conventionally exploited aquifer systems, especially the coastal plains ones, have serious problems as regards water quality and quantity. In this contest the karst aquifer systems are an important alternative for water supplying. The high quality of water in these systems, due also to the limited human presence in the areas where they usually develop, and the high quantity of water that they can contain provide a strategic rule of these systems.

On global scale it is estimated that the volume of water stored in karst aquifers represent over 30% of the available drinking water

tenere. A scala globale è stimato che i volumi idrici immagazzinati negli acquiferi carsici rappresentano oltre il 30% delle risorse idropotabili disponibili (FORTI, 2002). In Europa, dove le litologie carbonatiche occupano circa il 35% del territorio, le risorse idriche degli acquiferi carsici contribuiscono in alcuni paesi fino al 50% all'approvvigionamento di acqua potabile (ANDREO *et alii*, 2008). PREZIOSI & PICCINI (2000) stimano per i sistemi carsici italiani una risorsa idrica rinnovabile di 45 km³, pari a circa 3 volte il consumo di acqua potabile, ciò a testimonianza che si tratta di una risorsa ingentissima, sfruttata solo parzialmente.

Pur rivestendo un'importanza strategica, gli acquiferi carsici presentano caratteristiche che rendono non semplice la programmazione della gestione delle risorse idriche in essi contenute. Di fatto gli elevati coefficienti d'infiltrazione efficace, talvolta prossimi al 100%, e la presenza di ampie vie di circolazione idrica, che favoriscono bassi tempi di residenza delle acque, determinano un'elevata vulnerabilità degli acquiferi carsici ed una elevata variabilità dei flussi idrici. Allo stesso tempo la forte eterogeneità che contraddistingue questi acquiferi può dar luogo ad una ripartizione della circolazione idrica su più sistemi drenati da sorgenti distinte, sostanzialmente separati tra di loro e di non facile individuazione in termini di estensione. Da ciò deriva la necessità di condurre studi finalizzati alla definizione delle condizioni idrodinamiche e all'individuazione dei bacini di alimentazione e di eventuali zone a elevato tasso di assorbimento.

I territori montani, in cui si sviluppano più frequentemente gli acquiferi carsici, non rendono semplice lo svolgimento di indagini idrogeologiche convenzionali, quali l'esecuzione di pozzi o piezometri e relativo monitoraggio. In questi ambienti una delle metodologie di studio più utilizzate è quella delle prove di tracciamento, senza dubbio utili, ma richiedenti tempi molto lunghi per giungere ad una caratterizzazione del sistema in esame, dal momento che ogni prova di tracciamento ha una valenza puntuale o comunque interessa un settore limitato dell'acquifero.

Come mostrato da vari lavori in letteratura (WOOD & SANFORD, 1995; MOHAMMAD, 1998; MARFIA *et alii*, 2004; BARBIERI *et alii*, 2005; DOVERI *et alii*, 2005; TARRAGONI, 2006; PICCINI *et alii*, 2008) un importante contributo alla conoscenza delle caratteristiche idrogeologiche dei sistemi carsici può essere ottenuto con le applicazioni isotopiche. Con riferimento agli isotopi della molecola dell'acqua, veri e propri traccianti naturali poiché fino a temperature di circa 200°C (PANICHI & GONFIANTINI, 1978) non influenzati dai processi di interazione acqua-roccia, in questi ambienti è infatti possibile sfruttare a pieno alcune loro proprietà, quali le variazioni dei relativi valori nelle acque meteoriche in funzione sia del periodo dell'anno (YURTSEVER & GAT 1981) sia della quota di precipitazione (FRITZ & FONTES 1980). Di fatto i significativi dislivelli morfologici su cui si sviluppano in genere i sistemi carbonatici, la forte eterogeneità delle proprietà idrauliche di quest'ultimi e la relativamente alta velocità di circolazione idrica al loro interno costituiscono fattori che esaltano suddette proprietà isotopiche influenzando conseguentemente i rapporti isotopici nelle acque sotterranee, sia nello spazio, sia nel tempo. Analizzando tali rapporti nelle acque sorgive e/o in quelle captate da pozzi, è dunque possibile: i) evidenziare l'eventuale esistenza di diversi

risorse (FORTI, 2002). In Europa, dove le carbonatiche litologie take up the 35% of the territory, the water resources of the karst aquifer contribute until 50% of the water supply (ANDREO *et alii*, 2008).

As regards the Italian karst aquifer PREZIOSI & PICCINI (2000) estimate that the amount of renewable water resources is 45 km³. This value is approximately three times the consumption of drinking water, proving that these aquifers are a very important resource, only partially exploited.

Despite the strategic rule of the karst aquifers, it is important to highlight that the management of these aquifers is difficult to carry out, because their peculiar features. Indeed, the high effective infiltration coefficients, sometimes close to 100%, and the presence of large flowpaths that promote low residence times in the aquifer determine a high vulnerability of karst aquifers and a high variability in spring flow rate. Moreover the heterogeneity of these aquifers could lead to a water circulation breakdown into multiple systems flowing towards different springs. These multiple systems could be substantially separated from each other and not easy to identify in terms of extension.

These reasons imply the need to conduct studies for defining the hydrodynamic conditions and identifying the recharge areas and possible zone with high absorption rate.

In the mountain areas, where the karstic aquifers are developed frequently, it is not always easy to carry out conventional hydrogeological surveys, such as the realization of wells or piezometers and their monitoring.

In these environments, the tracer tests are the methodologies most widely used. These tests are certainly useful, but their applications require very long time for a detailed characterization of the systems. Each test, in fact, is a punctual test regarding only a limited area of the aquifer system.

As shown by several works in literature (WOOD & SANFORD, 1995; MOHAMMAD, 1998; MARFIA *et alii*, 2004; BARBIERI *et alii*, 2005; DOVERI *et alii*, 2005; TARRAGONI, 2006; PICCINI *et alii*, 2008) isotopic applications could be an important tool for the knowledge of the hydrogeological features of karst systems.

The water isotopes can be considered as real natural tracers because they are not affected by water-rock interaction processes until temperatures of about 200°C (PANICHI & GONFIANTINI, 1978). In karst environments it is possible to fully exploit some of their properties, such as the variations of the isotopic values of rainwater with respect to both period of year (YURTSEVER & GAT, 1981) and precipitation altitude (FRITZ & FONTES, 1980). In fact, the considerable altitude range in which the carbonate systems normally develop, the strong heterogeneity of hydraulic properties and, the relatively high velocity of the water flow in the aquifer are factors that enhance these isotopic properties, influencing the isotopic ratios in groundwaters, both in space and in time.

Analyzing these ratios in springs and/or in water collected from wells, it is then possible to: i) highlight the possible existence of different circulation systems within the same hydrogeological domain,

sistemi di circolazione all'interno di un medesimo dominio idrogeologico, anche nel caso in cui i relativi punti di recapito mostrino lo stesso chimismo; ii) determinare la quota media del bacino di alimentazione di tali sistemi; iii) ottenere indicazioni sulle condizioni idrodinamiche in acquifero, ovvero sulla vulnerabilità dei punti d'acqua che lo drenano.

Anche l'abbondanza isotopica relativa alle sostanze disciolte in acqua, come il rapporto $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ del carbonio inorganico disciolto (DIC) o il rapporto $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ dei solfati in soluzione, conservando memoria dell'interazione acqua-roccia, costituisce un efficace strumento per la tracciabilità dei circuiti idrici, come dimostrato anche dai risultati di studi condotti su acquiferi ospitati in serie carbonatiche e/o carbonatico-evaporitiche (DOVERI *et alii*, 2005; BIANCHI *et alii*, 2009; BOSCHETTI *et alii*, 2005).

Nel presente lavoro vengono trattati i risultati ottenuti nel corso di studi in cui si è fatto utilizzo degli isotopi stabili della molecola dell'acqua, principalmente, e del carbonio inorganico in soluzione. In particolare, l'obiettivo è quello di mettere in risalto come i dati isotopici, supportati da un'attenta analisi geologica strutturale ed idrogeologica, abbiano contribuito in maniera significativa a: 1) riconoscere diversi sistemi di circolazione all'interno di un medesimo dominio idrogeologico; 2) individuare le aree di alimentazione delle sorgenti; 3) comprendere le condizioni idrodinamiche che regolano il deflusso sotterraneo.

Tutto ciò in un ambiente carsico di forte interesse idrogeologico quale è quello delle Alpi Apuane (Toscana NW), per le sue ingenti risorse idriche e per la necessità di una loro salvaguardia a fronte dell'intensa attività estrattiva del marmo i cui effetti negativi sulla qualità delle acque, quantomeno in relazione alla torbidità delle stesse, sono stati anche dimostrati dallo studio di DRYSDALE *et alii* (2001).

INQUADRAMENTO GEOLOGICO ED IDROGEOLOGICO DELLE ALPI APUANE

Le aree di studio ricadono nel settore nord-occidentale della Toscana (Fig. 1) e si sviluppano in particolare sul versante tirrenico del massiccio apuano, nei bacini montani del Torrente Carrione, del Fiume Frigido e del Fiume Versilia. L'assetto geologico-strutturale delle Alpi Apuane si colloca nel contesto dell'orogenesi dell'Appennino Settentrionale verificatasi tra l'Oligocene superiore e il Pliocene, nel corso di fasi tettoniche a carattere prima compressivo, o transpressivo, con sovrascorrimento delle unità interne su quelle esterne, e successivamente distensivo, a basso e ad alto angolo. L'Appennino Settentrionale è una catena polifasica NE-vergente costituita dall'impilamento di unità tettoniche di derivazione parzialmente oceanica (Unità Liguri s.l.), sulle unità derivanti dalla deformazione del margine della placca Adria (Unità Toscane e Umbro-Marchigiane). In corrispondenza del massiccio apuano, la fase di raccorciamento dell'Oligocene superiore-Aquitano genera la strutturazione di un edificio tettonico costituito dall'alto al basso, dalle Unità liguri (s.l.), dalla Falda Toscana, dall'Unità di Massa e dall'Unità delle Apuane (CARMIGNANI *et alii*, 1978). A questa fase è da ricondurre il metamorfismo in facies scisti verdi delle unità inferiori (Unità di Massa e Unità delle Apuane) e il metamorfismo di grado molto basso (anchizona) della Falda toscana

even if the waters have the same chemical composition, ii) evaluate the average altitude of the recharge area of these systems, iii) obtain information about the hydrodynamic conditions in the aquifer and so on the springs vulnerability that drain the aquifer system.

The relative isotopic abundance of dissolved substances in water, as the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of the inorganic carbon (DIC) or the $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ ratio of the sulphates preserve the memory about the water-rock interaction. This property is an efficient tool for tracing flowpath, as demonstrated by the results of studies regarding aquifers hosted in carbonate and/or carbonate-evaporate rocks (DOVERI *et alii*, 2005, BIANCHI *et alii*, 2009, BOSCHETTI *et alii* 2005)

This paper illustrates some results regarding studies in which stable isotopes of water, mainly, and of inorganic carbon in solution were used. In particular, the principal aim is to highlight as the isotopic data, supported by a careful analysis of geological and hydrogeological structure, have contributed significantly: 1) to recognize different circulation systems within the same hydrogeological domain; 2) to delineate the springs recharge area; 3) and to understand the hydrodynamic conditions that govern groundwater flow.

These studies were carried out in the karst environment of Apuan Alps (Tuscany NW). A strong hydrogeological interest is moved towards this area because its massive water resources and the necessity of their protection against the intense marble quarrying. The negative effects of this activity on water quality of these aquifer systems, at least in relation to the turbidity, were also demonstrated by the study of DRYSDALE *et alii* (2001).

GEOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL FRAMEWORK OF THE APUAN ALPS

The studied areas are located in the northwestern part of Tuscany (central Italy) (Fig. 1) and, in particular, they are developed on the tyrrhenian side of the Apuan Alps including the catchment of the Carrione Stream, Frigido River and Versilia River.

The structural-geological framework of the Apuan Alps is linked to the Northern Apennines orogeny, developed between the Oligocene and Pliocene. The first tectonic phases were compressive, or transpressive (with the overthrusting of internal units on the external ones), followed by extensional tectonic phases with both low and high angle fault. The Northern Apennine is a NE-verging polyphasic chain due to the overthrusting of partly oceanic tectonic units (Ligurian Units sl) on the units derived from the deformation of the Adria plate boundary (Tuscan Units and Umbro-Marchigiane Units).

In the Apuan massif the shortening phase in the Oligocene-Aquitano age produces the tectonic structure made from top to bottom, by the Ligurian Units (sl), the Tuscan Nappe, the Massa Unit and the Apuan Unit (CARMIGNANI *et alii*, 1978). The green schist facies metamorphism of the lower units (Massa unit and Apuan Unit) and very low grade metamorphism (anchizona) of the Tuscan Nappe (CERRINA FERONI *et alii*, 1983) are due to this phase.

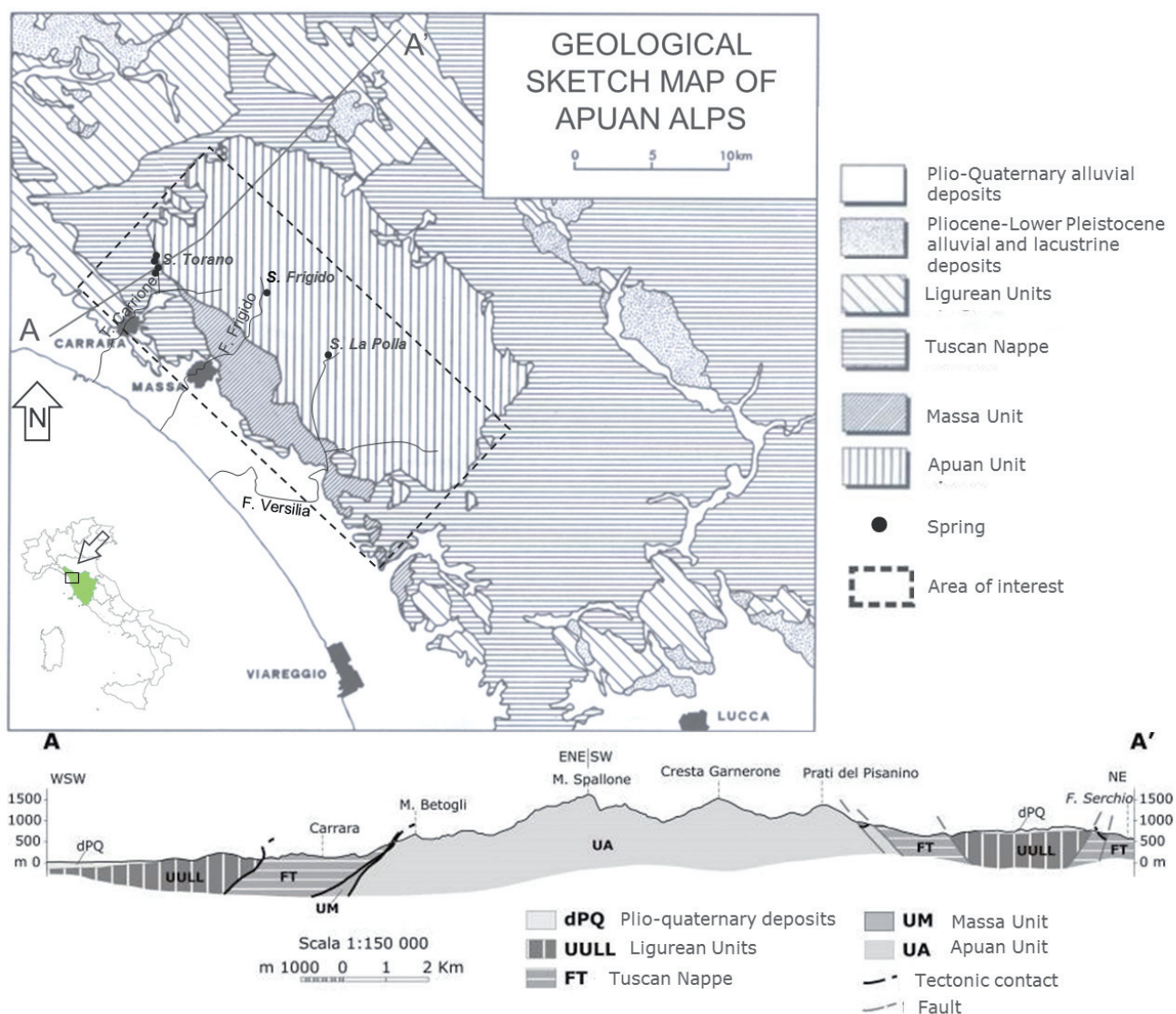


Fig. 1 - Schema geologico delle Alpi Apuane (da PICCINI et alii, 1997, modificata) e sezione (traccia A-A' nello schema) tra la zona di Carrara e l'Alta Valle del Serchio (da CARMIGNANI et alii, 2000, modificato)
 - Geological sketch map of Apuan Alps (from PICCINI et alii, 1997 modified) and section (line A-A' in the sketch) in the area between Carrara city and Alta Valle del Serchio (from CARMIGNANI et alii, 2000, modified)

(CERRINA FERONI *et alii*, 1983). Nel Miocene medio ad una fase estensionale a basso angolo, a carattere probabilmente duttile nei livelli strutturali più profondi, viene ricondotta la destrutturazione dell'edificio tettonico, con il denudamento e sollevamento del complesso metamorfico (CARMIGNANI & KLIFFIELD, 1990). Ancora non ben conosciuta nelle Apuane è la fase tardiva (Messiniano e Plio-Pleistocene) caratterizzata da sistemi di faglie ad alto angolo (MOLLI *et alii*, 2010).

Dal punto di vista stratigrafico l'Unità delle Alpi Apuane comprende un basamento filladico ercinico ed una copertura prevalentemente carbonatica di età compresa fra il Trias medio-superiore e l'Oligocene

In the middle Miocene the denudation and uplift of the metamorphic complex is due to a low-angle extensional phase, with probably a ductile character in deeper structural levels (CARMIGNANI & KLIFFIELD, 1990). Not well known in the Apuan Alps is the late phase (Messinian and Plio-Pleistocene), characterized by high-angle fault systems (MOLLI *et alii*, 2010).

The stratigraphic units of the Apuan Alps are made up of a phylitic hercynian basement and a mainly carbonate cover with ages between Middle-Upper Triassic and Upper Oligocene.

The Massa Unit is constituted by a Mesozoic cover above a

superiore. L'Unità di Massa è costituita da una copertura mesozoica al di sopra di un basamento ercinico e di depositi continentali filladici e quarziticci (Verrucano). La Falda Toscana il cui termine inferiore è costituito dal Calcare Cavernoso, è costituita da una successione carbonatica in facies di piattaforma ed emipelagica, cui fa seguito una successione bacinale costituita da Calcari Selciferi (Giurassico), Marne e Radiolariti (Cretaceo superiore e Paleocene-Eocene) e dalla Scaglia. La successione si completa in alto con i depositi silico-clastici, torbiditici, di avanfossa (Macigno, Oligocene-Aquitano).

I rilievi delle Alpi Apuane sono caratterizzati da ingenti risorse idriche (CIVITA *et alii*, 1991, PICCINI *et alii*, 1999) grazie all'elevata piovosità caratteristica dell'area, alla medio-alta permeabilità delle rocce presenti e, infine, all'elevato coefficiente di infiltrazione efficace, che, secondo alcuni autori (PICCINI *et alii*, 1999) può arrivare fino al 75%. L'assetto idrogeologico dell'area apuana è vincolato alla distribuzione spaziale ed ai rapporti geometrici tra le varie unità stratigrafico-strutturali derivate dall'evoluzione geologica sopra delineata. Il deflusso delle acque sotterranee è regolato principalmente dalle superfici di discontinuità di origine tettonica, nonché dal carsismo ipogeo che ha interessato le litologie carbonatiche. Il principale acquifero è rappresentato dalla successione Grezzoni-Marmi (Unità delle Apuane). Questo è caratterizzato da una permeabilità secondaria crescente per carsismo e di grado elevato, ed è stratigraficamente compreso tra un basamento praticamente impermeabile, costituito da Filladi e Porfiroidi, ed un tetto rappresentato da Diaspri con bassa permeabilità secondaria decrescente. Le pieghe isoclinali con asse molto inclinato determinano strutture complesse in cui il basamento metamorfico svolge il ruolo di substrato impermeabile solo in aree ristrette, mentre funge da sbarramento per molte delle sorgenti maggiori (PICCINI & PRANZINI, 1989A; CIVITA *et alii*, 1991; BALDACCINI *et alii*, 1993). Nella Falda Toscana le formazioni carbonatiche corrispondenti (Calcare Cavernoso, Calcare Massiccio e Maiolica) costituiscono un acquifero di potenzialità leggermente inferiore a causa di una minore permeabilità relativa e, principalmente, di spessori inferiori.

All'interno dell'area apuana si ritrovano numerose sorgenti dal tipico regime carsico. Più di una decina di queste hanno una portata media compresa tra 100 e 400 L/s e numerose altre hanno portate superiori ai 10 L/s, per una portata media globale di circa 6 m³/s. Tenuto conto di un'estensione totale degli acquiferi di circa 170 Km², si ottiene un rendimento specifico di 0,035 m³/s/Km², pari ad una lama d'acqua infiltrata di 1100 mm/anno. A fronte di precipitazioni medie annue pari a 2500 mm, si evince che l'infiltrazione media è pari a circa 45% delle piogge (CIVITA *et alii*, 1991), valore abbastanza normale per i massicci carbonatici.

MATERIALI E METODI

Anche se l'obiettivo principale di questo lavoro è quello di evidenziare le potenzialità degli isotopi in studi sulla circolazione idrica carsica, i casi di studio presentati hanno avuto un approccio multidisciplinare geologico, idrogeologico ed idrochimico-isotopico. In particolare l'analisi e l'elaborazione di dati geologico-strutturali ha permesso di

Hercynian basement and continental deposits made up phyllites and quartzites (Verrucano). The Tuscan Nappe, whose lower unit is Calcare Cavernoso, is formed by a carbonate succession in platform and hemipelagic facies, following by a basin succession constituted by Calcari Selciferi (Jurassic age), Marne and Radiolariti (Upper Cretaceous and Paleocene-Eocene), and Scaglia. The sequence is completed at the top with silico-clastic deposits, turbidites, and foredeep deposits (Macigno, Oligocene-Aquitano).

The Apuan Alps are characterized by important water resources (CIVITA *et alii*, 1991, PICCINI *et alii*, 1999) due to high rainfall, to medium-high permeability of the rocks and, finally, to the high effective infiltration coefficient, which, according to some authors (PICCINI *et alii*, 1999) can close to 75%. The hydrogeological setting of the Apuan Alps is linked to spatial distribution and geometric relationships between the stratigraphic-structural units derived by geologic evolution above discussed. The groundwater flow is governed primarily by the discontinuity surfaces of tectonic origin, and by the karstic phenomena that have affected the carbonate lithologies. The main aquifer is represented by the succession Grezzoni-Marmi of the Apuan Unit, which is characterized by a high secondary permeability increasing for karstification. This succession is stratigraphically located between an impermeable basement, consisting by Phyllites and Porfiroidi, and a roof, represented by Diaspri, with decreasing low secondary permeability.

The isoclinal folds complex with very inclined axis determined complex structures where the metamorphic basement has a function of impermeable substratum in restricted areas, while it acts as a barrier for many of the major springs (PICCINI & PRANZINI, 1989A; CIVITA *et alii*, 1991; BALDACCINI *et alii*, 1993).

In the Tuscan Nappe the corresponding carbonate formations (Calcare Cavernoso, Calcare Massiccio and Maiolica) constitute a slightly minor potential aquifer due to a lower permeability, and, mainly, to the lesser thicknesses in respect to the Apuan Unit succession.

In the apuan area there are numerous springs with karstic characteristics. More than ten of these have an average flowrate between 100 and 400 L/s and many others have flow rate higher than 10 l/s, for a global average value close to 6 m³/s. Given an aquifer systems total area of 170 km², it is obtained a specific flow rate of 0.035 m³/s/Km², equal to a water infiltration close to 1100 mm/year. Considering that the average annual rainfall is 2500 mm, the mean infiltration is approximately 45% of rainfall (CIVITA *et alii*, 1991), that is normal for carbonate complexes.

MATERIALS AND METHODS

Although the main objective of this paper is to highlight the potential of isotopic techniques in studies regarding karstic water circulation, the works discussed were carried out by means of a multidisciplinary approach including geological, hydrogeological and hydrochemical-isotope aspects. In particular the analysis and

comprendere le geometrie delle idrostrutture ed individuare gli elementi strutturali che possono condizionare la circolazione idrica ipogea; lo studio degli idrogrammi di portata delle sorgenti in relazione alle piogge è stato utile per valutare i tempi di risposta dei sistemi carsici rispetto all'infiltrazione, nonché per effettuare considerazioni sui volumi idrici in gioco; le analisi chimiche delle acque sorgive sono state finalizzate alla individuazione delle facies idrochimiche ed a riconoscere le principali litologie con cui le acque interagiscono; i dati isotopici hanno permesso di definire le quote medie dei bacini idrogeologici, avere indicazioni sulle modalità di risposta delle sorgenti agli apporti meteorici e verificare la ripartizione della circolazione idrica nei vari sistemi esaminati; lo sviluppo di bilanci idrogeologici ha, infine, consentito di valutare l'attendibilità dei bacini idrogeologici delimitati sulla base di una comparazione tra tutte le informazioni ottenute con le predette indagini. Visti gli obiettivi, nel presente manoscritto sono principalmente trattati i dati isotopici e solo marginalmente i risultati ottenuti con le altre metodologie di studio, per i quali viene fatto riferimento a lavori di letteratura redatti dagli scriventi. Da un punto di vista isotopico i parametri presi in esame nei casi di studio di seguito presentati sono i rapporti di abbondanza degli isotopi stabili della molecola dell'acqua ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$) ed il rapporto $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ del DIC. I valori sono espressi come $\delta\text{‰}$ rispetto ad uno standard di riferimento (FRITZ & FONTES, 1980), corrispondente al V-SMOW, per i primi due rapporti, ed al VPDB, nel caso del carbonio (HOEFS, 2004). Il prelievo delle acque è avvenuto in bottiglie "tappocontro tappo", le analisi sono state eseguite mediante spettrometria di massa, in parte presso il laboratorio chimico isotopico dell'Istituto di Geoscienze e Georisorse dell'Area CNR di Pisa ed in parte presso il laboratorio "Stable Isotope Unit, National Centre for Scientific Research "Demokritos" di Atene (Grecia).

I valori di $\delta^{18}\text{O}$ sono stati determinati mediante l'analisi della CO_2 gassosa precedentemente equilibrata a 25°C con la soluzione acquosa (EPSTEIN & MAYEDA, 1953). I valori di $\delta^2\text{H}$ sono stati determinati mediante l'analisi dell' H_2 gassoso generato per reazione a 460°C con Mg. Per le analisi del ^{13}C è stata analizzata la CO_2 originata dal DIC per estrazione dopo acidificazione e distillazione sotto vuoto. L'errore standard è pari a $\pm 0.1\text{‰}$, per il $\delta^{18}\text{O}$, e $\pm 1.0\text{‰}$ per il $\delta^2\text{H}$ ed il $\delta^{13}\text{C}$. Il campionamento ha interessato non solo le principali sorgenti impostate sul livello di base dei sistemi carsici, ma anche sorgenti secondarie, distribuite su un intorno significativo, al fine di una generale caratterizzazione isotopica delle acque che si infiltrano nell'area d'interesse. Una corretta applicazione delle metodologie isotopiche, con particolare riferimento agli isotopi dell'acqua, è infatti strettamente dipendente dalla conoscenza di alcuni parametri di carattere locale, quali la distribuzione sul territorio della composizione isotopica delle acque meteoriche ed il gradiente isotopico verticale. Questi dati di base sono ottenuti esaminando il $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ e $\delta^2\text{H}\text{‰}$ (insieme al trizio, quando utilizzato) nelle acque di precipitazione, quest'ultime raccolte mensilmente e a varie quote per un periodo di almeno due-tre anni (e.g. LONGINELLI & SELMO, 2003). In mancanza di una rete pluviometrica ben distribuita, ma anche per ovviare ai lunghi tempi richiesti da questa metodologia, è possibile optare, ottenendo risultati equivalenti, per una

elaboration of geological-structural data allowed to understand the hydrostructure geometry and to identify the structural elements that can affect the groundwaters circulation; the study of springs hydrograms with respect to rainfall was used to evaluate the response times of karst systems with respect to infiltration and to make considerations about the amount of groundwater; the chemical analyses of the springs were used to define hydrochemical facies and to individuate the main lithologies which are involved in water-rock interaction; the isotopic data were used to define the average altitude of recharge area, to achieve information on springs in response of meteoric regime, and to verify the distribution of water circulation in the various examined systems; finally, hydrological budgets allowed to value the reliability of hydrogeological basins delimited by means of the comparison of all the information obtained by the above discussed investigations.

Given the aims, in this manuscript isotopic data are mainly discussed, whereas the results obtained with the other survey tools are only marginally reported, mentioning literature works written by the authors for more information.

The isotopic parameters taken into account in the following presented cases are the abundance ratios of the water stable isotopes ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$) and the ratio $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ of DIC. The values are expressed as $\delta\text{‰}$ compared to a standard (FRITZ & FONTES, 1980), corresponding to the V-SMOW, for the first two ratios, and to VPDB in the case of carbon (HOEFS, 2004). Waters sampling were carried out using bottles with double cap, the analyzes were performed by mass spectrometry, in part at the isotopic-chemical laboratory of the Institute of Geosciences and Earth Resources, CNR (Pisa, Italy) and in part at Stable Isotope Unit, National Centre for Scientific Research "Demokritos" (Athens, Greece).

The $\delta^{18}\text{O}$ value of water was determined through analysis of gaseous CO_2 , previously equilibrated with water at 25°C (EPSTEIN & MAYEDA, 1953). The $\delta^2\text{H}$ value of water was determined through analysis of gaseous H_2 generated by the reaction at 460°C with Mg. For the analysis of the $\delta^{13}\text{C}$ value, CO_2 originated from DIC and extracted after acidification and distillation in vacuum condition was submitted to the mass spectrometer. The standard error is $\pm 0.1\text{‰}$ for $\delta^{18}\text{O}$ and $\pm 1.0\text{‰}$ for $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{13}\text{C}$. Samples were collected not only at the main springs flowing at the base level of karst systems, but also some secondary springs (over a significant neighborhood) for an isotopic characterization of the infiltration waters in the area of interest. A right application of isotopic methods, especially for water isotopes, is closely dependent on the knowledge of some local parameters, as the distribution in the area of the isotopic composition of rainwater and vertical isotopic gradient.

These basic information are obtained examining the $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ and $\delta^2\text{H}\text{‰}$ (and tritium, when used) in the rainwaters collected every month and at various altitudes for a period of at least two-three years (e.g. LONGINELLI & SELMO, 2003).

In the absence of a well distributed raingauge-network, but also to avoid the long time required by this methodology, it is possible to col-

serie di prelievi (3-4 ogni anno) da effettuare in corrispondenza di sorgenti alimentate da un bacino poco esteso (e.g. MUSSI *et alii* 1998). In questo modo i contenuti in isotopi stabili dell'acqua sono rappresentativi di quote medie d'infiltrazione non molto diverse da quelle di emergenza ed individuabili attraverso considerazioni morfologiche ed idrogeologiche sul bacino di alimentazione di tali sorgenti.

Sulla base di quest'ultimo approccio sono state individuate, sull'intervallo altimetrico coperto dalle aree in esame, una serie di emergenze di limitata portata, rappresentative di una circolazione idrica sviluppata in complessi acquitardi, o nelle coperture detritiche di complessi acquicludi, o in complessi acquiferi s.s. che per cause morfo-strutturali hanno estensioni limitate. Ciò ha permesso di ottenere le relazioni quota/ $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ (o in alternativa quota/ $\delta^2\text{H}\text{‰}$) alle quali riferire i valori di $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ (o $\delta^2\text{H}\text{‰}$) riscontrati nelle sorgenti carsiche oggetto di studio, per ricavare le relative quote medie di alimentazione. Anche le sorgenti carsiche sono state campionate ed analizzate più volte nell'arco dell'anno al fine di verificare la loro risposta alla variabilità isotopica che caratterizza le acque meteoriche nelle varie stagioni, ovvero ottenere indicazioni sulle condizioni idrodinamiche in acquifero.

APPLICAZIONI ISOTOPICHE AGLI ACQUIFERI CARSICI APUANI

INDIVIDUAZIONE DEI SISTEMI DI CIRCOLAZIONE

Il caso di studio riportato si riferisce alle sorgenti carsiche situate in località Torano, nel bacino del T. Carrione (Fig. 2a). Il sistema acquifero è sviluppato nelle formazioni dei Marmi, Grezzoni e, subordinatamente, Calcere Selcifero, appartenenti all'unità metamorfica delle Alpi Apuane. Questi termini sono implicati in una struttura sinforme (Fig. 2b), nota in letteratura come Sinclinale di Carrara, con al nucleo il Calcere Selcifero, caratterizzato da una permeabilità relativamente inferiore rispetto ai Marmi e Grezzoni, per la presenza di liste di selce che limitano lo sviluppo del carsismo.

Oltre che dalle sorgenti di Torano, che nell'insieme hanno una portata media di circa 180 L/s (DOVERI, 2004), questa idrostruttura è drenata dal gruppo di sorgenti delle Canalie, poste nel suo settore meridionale (Fig. 2a). L'emergenza della circolazione idrica è dettata, in entrambe le zone, dalla concomitanza tra condizioni di basso morfologico e azione di sbarramento ad opera dei termini filladici dell'Unità di Massa (Fig. 2ab).

Le quattro sorgenti di Torano (Carbonera, Tana dei Tufi, Gorgoglio e Pizzutello) mostrano le stesse caratteristiche chimiche, con facies bicarbonato-calcica e conducibilità elettrica tra 260 e 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25 °C (DOVERI, 2004). Questo aspetto, congiuntamente alla vicinanza tra le quattro sorgenti ed alle simili condizioni idrostrutturali nelle relative zone di emergenza, conduce ad attribuire le sorgenti stesse ad un unico sistema di circolazione. Nel periodo 2001-2003 sulle sorgenti di Torano sono state effettuate analisi isotopiche ($\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ e $\delta^2\text{H}\text{‰}$) in diversi periodi dell'anno, in ogni caso dopo un sufficiente arco di tempo da eventi meteorici significativi, al fine di studiare il "deflusso di base" in acquifero (ovvero evitando le perturbazioni nel breve periodo legate alle acque di neoinfil-

lect some samples (3-4 each year) in springs that are fed by slightly extended basins (e.g. MUSSI *et alii* 1998). In this way the ratios of the water stable isotopes are representative of an infiltration average altitudes not very different from the springs altitudes and assessable by morphological and hydrogeological considerations.

Based on the latter approach, some springs with low flowrate were identified over the altitude interval covered by the studied areas. These springs are representative of a groundwater circulation in aquitard complexes, or in debris deposits located on aquicludes, or in aquifers complexes that for morfo-structural causes have a limited extension. This approach allowed to obtain the relationships altitude/ $\delta^{18}\text{O}$ (or alternatively altitude/ $\delta^2\text{H}\text{‰}$) which was used to assess the average altitude of the feeding area for the main karstic springs using their $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ (or $\delta^2\text{H}\text{‰}$) value.

Also the karst springs were sampled and analyzed several times in a year in order to test their response to the isotopic variability that characterizes the meteoric waters in different seasons, thus obtaining information about the hydrodynamic conditions in the aquifer.

ISOTOPIC APPLICATION IN APUAN KARST AQUIFER

DETECTION OF CIRCULATION SYSTEMS

The study reported is referred to the karst springs close to Torano village, in the catchment of Carrione Stream (Fig. 2a). The aquifer system has developed in the formations of the Marmi, Grezzoni and, subordinately, Calcere Selcifero, belonging to metamorphic unit of the Apuan Alps. These terms are involved in a synforme structure (Fig. 2b), known in the literature as Syncline of Carrara, with the Calcere Selcifero at the core, characterized by a relatively lower permeability than the Marble and Grezzoni, for the presence of chert nodules which limit the development of the karst phenomena.

This structure is drained not only by the Torano springs, which have an average flowrate close to 180 L/s (DOVERI, 2004), but also by the Canalie springs, located in the southern sector of this area (Fig. 2a). In both areas the groundwater flowing out is due to the low morphology and to the spillway action performed by the phyllitic terms of the Massa Unit (Fig. 2ab).

The four Torano springs (Carbonera, Tana dei Tufi, Gorgoglio and Pizzutello) show the same chemical features, belonging to calcium-bicarbonate facies and with an electrical conductivity ranging from 260 to 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ at 25 °C (DOVERI, 2004). This aspect, together with the close proximity of the four springs and the similar hydrostructural conditions, suggests the presence of only one circulation system.

In 2001-2003 period isotopic analyses ($\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ e $\delta^2\text{H}\text{‰}$) were carried out on such springs in different periods of the year. Each sampling were carried out after a sufficient period from significant meteoric events, in order to study the "baseflow" in the aquifer (avoiding the short-term effect of the neo-infiltration water). The achieved data

GLI ISOTOPHI STABILI DELL'ACQUA COME STRUMENTO FONDAMENTALE NELLO STUDIO DEGLI ACQUIFERI CARSIICI:
ALCUNI ESEMPI DI APPLICAZIONE SUI COMPLESSI CARBONATICI DELLE ALPI APUANE (TOSCANA NW)

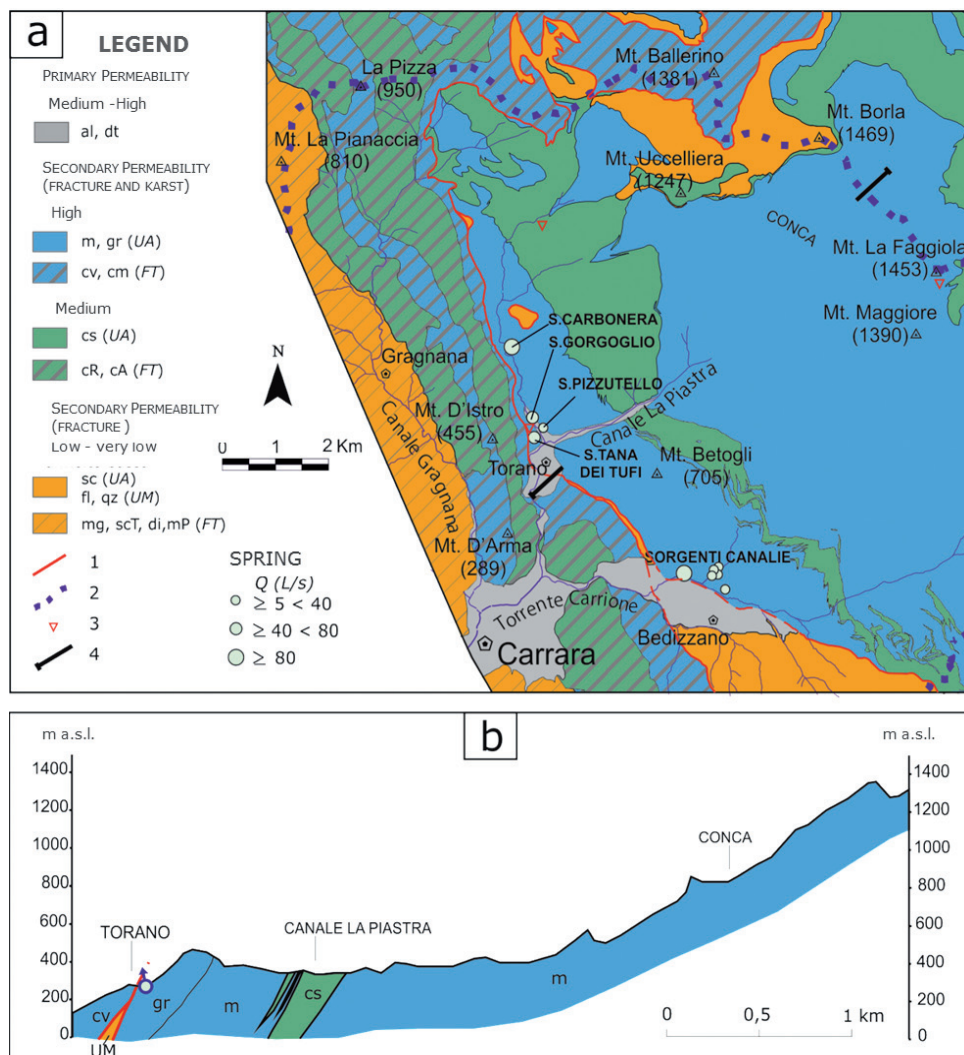


Fig. 2 - a: schema idrogeologico del Bacino del T. Carrione; b: sezione idrogeologica relativa al settore di Torano. al - alluvioni; dt - detriti; m - Marmi; gr - Grezzoni; cv - Calcare Cavernoso; cm - Calcare Massiccio; cs - Calcare Selcifero; cR - Calcare a Rhaetavicula; cA - Calcare ad Angulati; sc - Scisti Sericitici; fl - Filladi; qz - Quarziti; mg - Macigno; scT - Scaglia Toscana; di - Diaspri; mP - Marne a Posidonia; UA - Unità delle Alpi Apuane; UM - Unità di Massa; FT - Falda Toscana; 1 - contatto tettonico; 2 - spartiacque idrografico; 3 - principali cavità carsiche; 4 - traccia della sezione

- a: hydrogeological sketch map of the T. Carrione catchment; b: hydrogeological section of the Torano area.
al - alluvium; dt - detritus; m - Marmi; gr - Grezzoni; cv - Calcare Cavernoso; cm - Calcare Massiccio; cs - Calcare Selcifero; cR - Calcare a Rhaetavicula; cA - Calcare ad Angulati; sc - Scisti Sericitici; fl - Filladi; qz - Quarziti; mg - Macigno; scT - Scaglia Toscana; di - Diaspri; mP - Marne a Posidonia; UA - Apuan Alps Unit; UM - Massa Unit; FT - Tuscan Nappe; 1 - tectonic contact; 2 - watershed; 3 - main karst caves; 4 - trace of hydrogeological section

	Gorgoglio		Pizzutello		Carbonera		Tana dei Tufi	
	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta^2\text{H}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta^2\text{H}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta^2\text{H}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta^2\text{H}\text{‰}$
n° analyses	15	12	15	11	16	14	16	12
mean	-7.23	-42.9	-7.24	-42.7	-6.73	-38.9	-6.69	-39.1
st. dev	0.07	0.72	0.07	0.88	0.08	1.03	0.10	1.06

Tab. 1 - $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ e $\delta^2\text{H}\text{‰}$ relativi al "deflusso di base" delle sorgenti di Torano nel periodo 2001-2003
- $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ and $\delta^2\text{H}\text{‰}$ of the Torano springs baseflow in the 2001-2003 period

trazione). Dai dati ottenuti (Tab. 1), si evince che Gorgoglio e Pizzutello hanno uguali valori isotopici (circa -7.2 e -43, rispettivamente per $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ e $\delta^2\text{H}\text{‰}$) e allo stesso tempo marcatamente diversi da quelli di Carbonera e Tana dei Tufi, a loro volta simili (circa -6.7 e -39, rispettivamente per $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ e $\delta^2\text{H}\text{‰}$). Ciò permette di evidenziare che, contrariamente a quanto deducibile dall'idrochimica e dalle condizioni di emergenza delle acque, nella zona di Torano recapitano due sistemi di circolazione tra di loro sostanzialmente separati, drenati rispettivamente dalle sorgenti Gorgoglio e Pizzutello e dalle sorgenti Carbonera e Tana dei Tufi.

(Tab. 1) indicate that Gorgoglio and Pizzutello have the same isotopic values (-7.2 and -43 for $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ and $\delta^2\text{H}\text{‰}$ respectively). These values are widely different from those of Carbonera and Tana dei Tufi, which, at same time, are similar to each other (-6.7 and -39 for $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ and $\delta^2\text{H}\text{‰}$ respectively). This clearly shows that in the Torano area, contrary to what indicated by geochemical data and drainage conditions, there are two different circulation systems. These systems, substantially separated, are drained respectively by Gorgoglio and Pizzutello springs and Carbonera and Tana dei Tufi springs.

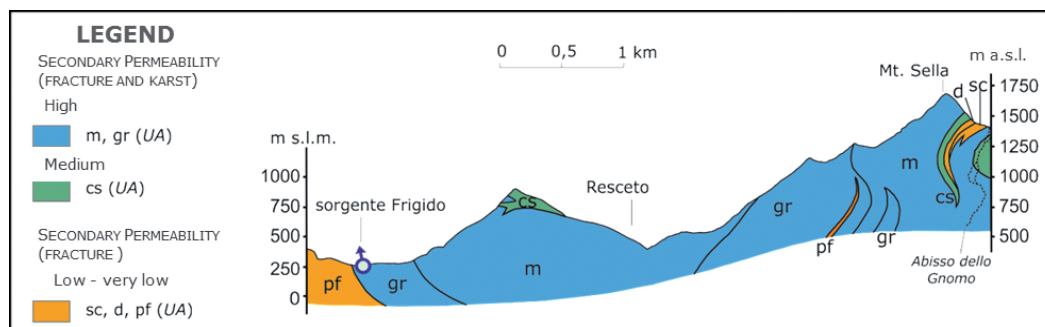


Fig. 3 - Sezione idrogeologica passante per la sorgente Frigido (da PICCINI & PRANZINI, 1989b, modificata). m - Marmi; gr - Grezzoni; cs - Calcare Selcifero; sc - Scisti Sericitici; d - Diaspri; pf - Porifroidi; UA - Unità delle Alpi Apuane
- Hydrogeological cross-section through the zone of the Frigido spring (from PICCINI & PRANZINI, 1989b, modified). m - Marmi; gr - Grezzoni; cs - Calcare Selcifero; sc - Scisti Sericitici; d - Diaspri; pf - Porifroidi; UA - Apuan Alps Unit

STUDIO DELLE CONDIZIONI IDRODINAMICHE IN ACQUIFERO

Al fine di evidenziare le potenzialità degli isotopi della molecola dell'acqua nello studio delle condizioni idrodinamiche negli acquiferi carsici, si confrontano di seguito due casi di studio relativi rispettivamente alle sorgenti di Torano (già trattate nel precedente paragrafo per altri aspetti) ed alla sorgente Frigido, ubicata nel bacino dell'omonimo torrente (Fig. 1). La sorgente Frigido drena una idrostruttura sinforme costituita principalmente dalle formazioni dei Marmi e dei Grezzoni (Fig. 3). Varie prove di tracciamento eseguite in passato (RONCIONI, 2002) hanno permesso di verificare che la sorgente è alimentata anche da zone poste ad oltre 10 km di distanza. In ragione di un esteso bacino idrogeologico, questa emergenza è caratterizzata da portate elevate che la rendono una delle più importanti delle Alpi Apuane. I valori medi di portata ritrovati in letteratura sono di 1000 L/s (MASINI, 1960), 1500 L/s (CAZZANTE *et alii*, 1988; PICCINI & PRANZINI, 1989B; CIVITA *et alii*, 1991) e 1550 L/s (PICCINI *et alii*, 1997). La sorgente mostra una forte variabilità delle portate nel corso dell'anno, in ragione di un carsismo ben sviluppato all'interno del proprio acquifero.

Anche le sorgenti di Torano, benché con portate medie di un ordine di grandezza inferiori, denotano il tipico comportamento delle sorgenti carsiche, con differenze tra deflussi di magra e di morbida superiori al 300% ed incrementi di portata di oltre il 100% in occasione di piogge significative (DOVERI, 2004).

A fronte di un paragonabile regime delle portate sorgentizie, i due sistemi acquiferi in esame sono tuttavia caratterizzati da condizioni idrodinamiche ben diverse, come documentano i dati isotopici. Su entrambi i sistemi sorgentizi (Torano e Frigido) sono state svolte analisi del $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ e del $\delta^2\text{H}\text{‰}$. I campioni sono stati prelevati in diversi periodi dell'anno, in condizioni non perturbate da eventi meteorici, ma allo stesso tempo ben diverse in relazione alla portata erogata alle sorgenti, come conseguenza dell'andamento stagionale della piovosità.

I risultati ottenuti, di seguito trattati in termini di $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ (stesse considerazioni deriverebbero dal $\delta^2\text{H}\text{‰}$), possono così sintetizzarsi:

- la sorgente Frigido su quattro campionamenti ha mostrato differenti valori isotopici (Fig. 4), a fronte peraltro di una sostanziale

STUDY OF THE AQUIFER HYDRODYNAMIC CONDITIONS

In order to highlight the potentiality of isotopic techniques in the study of the hydrodynamic conditions in karst aquifers, two cases of study are compared, one concerning the Torano springs (already discussed under other aspects in the previous section) and one regarding the Frigido spring, located in the catchment of the homonymous river (Fig. 1).

The Frigido spring drains a synforme hydrostructure chiefly formed by Marmi and Grezzoni (Fig. 3). Several tracer tests performed in the past (RONCIONI, 2002) allowed to verify that the spring drains the groundwater coming also from areas located more than 10 km away.

For its extensive recharge area, this spring is characterized by high flow rates making it one of the most important spring of the Apuan Alps. The average flow rate values reported in literature are close to 1000 L/s (MASINI, 1960), 1500 L/s (CAZZANTE *et alii*, 1988; PICCINI & PRANZINI, 1989B; CIVITA *et alii*, 1991) and 1550 L/s (PICCINI *et alii*, 1997). The spring shows strong variability of flow rate during the year, due to the karstic character of the aquifer.

Also the Torano springs, although with average flow rate of an order of magnitude lower than the Frigido spring, denote the typical behavior of karst springs. The flow rate differences between dry and wet seasons is higher than 300% and an increase in flow rate of more 100% is recorded as consequence of storm events (DOVERI, 2004).

Despite of the similar flow rate regime, the two aquifer systems in study are characterized by hydrodynamic conditions very different, as documented by the isotopic data. On both aquifer systems (Torano and Frigido) $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ and $\delta^2\text{H}\text{‰}$ analysis were carried out. The samples were collected several time in a year, under conditions not perturbed by meteorological events, but under very different flow rate conditions as consequence of seasonal rainfall.

The results, discussed below in terms of $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ (same considerations would arise from $\delta^2\text{H}\text{‰}$), can be summarized as follows:

- Frigido spring was sampled four times in a year; for each season the isotopic value is different (Fig. 4), despite the relative stability

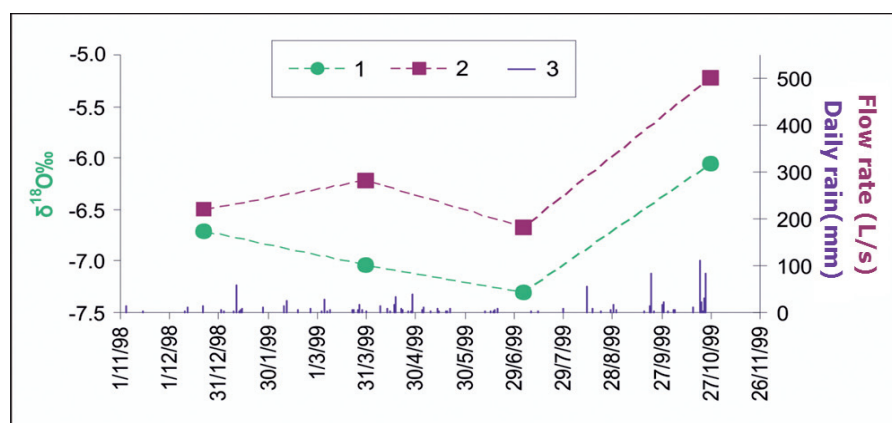


Fig. 4 - Valori di $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ e portata della sorgente Frigido a confronto con le piogge giornaliere nel periodo Novembre '98-Novembre '99 (1: $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$; 2: portata; 3: pioggia alla stazione di misura di Massa, dati dell'Ufficio Idrografico di Pisa)

- $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ values and flow rate of the Frigido spring compared with daily rain in the November '98-November '99 period (1: $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$; 2: flow rate; 3: rain at the Massa measurement station, data of the Ufficio Idrografico of Pisa)

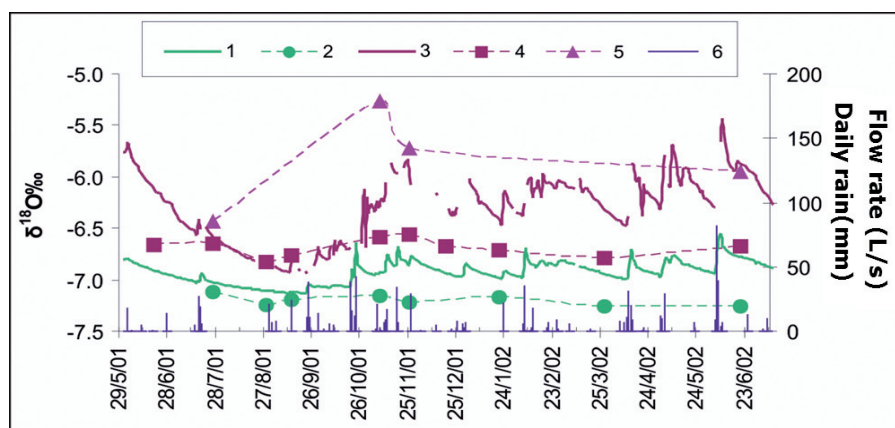


Fig. 5 - $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ e portata delle sorgenti di Torano e $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ del canale La Piastra a confronto con le piogge giornaliere nel periodo Luglio '01-Luglio '02 (1 e 2: rispettivamente $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ e portata del sistema di circolazione Gorgoglio-Pizzutello; 3 e 4: rispettivamente $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ e portata del sistema di circolazione Carbonera-Tana dei Tufi; 5: $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ del canale La Piastra; 6: pioggia giornaliera al pluviometro Torano)

- $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ and flow rate of the Torano springs and $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ of the La Piastra stream compared with daily rain in the July '01- July '02 period (1 and 2: respectively $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ and flow rate of the Gorgoglio-Pizzutello groundwater system; 3 e 4: respectively $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ and flow rate of the Carbonera-Tana dei Tufi groundwater system; 5: $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ of the La Piastra stream; 6: daily rain at the Torano rain-gauge)

stabilità osservata da DOVERI (2000) sui parametri chimici. In particolare, su entrambe i periodi Dicembre-Marzo e Marzo-Luglio le acque sorgive sono interessate da un decremento di $\delta^{18}\text{O}$ di circa 0.3‰, mentre sull'ultimo periodo Luglio-Ottobre fanno registrare un incremento di circa 1.2‰. Anche nel caso in cui si escluda il dato di Ottobre per una probabile influenza delle abbondanti piogge della settimana che ha preceduto quella del campionamento, è possibile affermare che il "deflusso di base" della sorgente Frigido è interessato da una significativa variabilità isotopica. In altri termini queste acque sorgive, come altre dei complessi carbonatici apuani (DOVERI, 2000), risentono sensibilmente delle variazioni isotopiche che caratterizzano le piogge nel corso di un anno e che per il $\delta^{18}\text{O}$ alle medie latitudini sono quantificabili in $\pm 2,5\text{‰}$ (IAEA/WMO, 2004);

- il deflusso di base delle sorgenti Torano ha mostrato una generale stabilità del $\delta^{18}\text{O}$ (Fig. 5), o comunque variazioni minime dell'ordine

observed by DOVERI (2000) in chemical parameters. In particular, regarding periods December-March and March-July the spring is affected by a decrease in $\delta^{18}\text{O}$ of 0.3‰, while during the last period, July-October, the spring shows an increase of 1.2‰.

Also excluding the October data for a possibly influence of the abundant rainfalls of the previous week with respect to the sampling date, it is possible to note that the "base flow" of the Frigido spring is affected by a significant isotopic variability.

In other words, this spring, like others of the Apuan Alps carbonate complex (DOVERI, 2000), is affected by isotopic variations that characterize the rains during the year. As regards $\delta^{18}\text{O}$ these variation at the mean latitude are closed to $\pm 2.5\text{‰}$ (IAEA/WMO, 2004);

- The base flow of the Torano springs shows a general stability of the $\delta^{18}\text{O}$ value (Fig. 5), or in any case a minimum variation ranging about the measurement error ($\pm 0.1\text{‰}$). In contrast with Frigido

dell'errore di misura (± 0.1 ‰). Contrariamente a quanto verificato per la sorgente Frigido, non si registrano quindi significative variazioni isotopiche in risposta a quelle delle piogge nelle diverse stagioni dell'anno, nonostante che i campionamenti siano avvenuti in diverse condizioni di regime con differenze di portata in sorgente anche superiori al 300%. La variabilità isotopica nelle piogge cadute nel periodo d'indagine è documentata dal canale La Piastra, che scorre nella zona di Torano (Fig. 2) e che ha mostrato un intervallo di variazione di 1,2‰ sul $\delta^{18}\text{O}$, evidenziando peraltro che le acque del canale non alimentano, almeno in quantità rilevabili, i circuiti sotterranei che hanno recapito nelle sorgenti.

Il diverso andamento dei valori isotopici, registrati nelle due zone di emergenza, mette in luce l'esistenza di differenti condizioni idrodinamiche tra i sistemi acquiferi Frigido e Torano.

La variabilità isotopica mostrata dalla sorgente Frigido è tipica di un acquifero freatico caratterizzato da velocità di flusso nell'insieme relativamente alte, tanto da mantenere memoria sul breve-medio periodo dell'andamento degli input isotopici tipico delle acque meteoriche nel corso dell'anno. Questo tipo di risposta dell'acquifero consentirebbe peraltro di giungere ad una valutazione delle velocità medie di flusso, qualora fosse predisposta una rete di pluviometri per il campionamento ed analisi isotopiche delle acque meteoriche con cadenza almeno bimensile.

Viceversa, la stabilità isotopica mostrata dal deflusso di base delle sorgenti di Torano, suggerisce per questo sistema l'esistenza di condizioni favorevoli all'omogeneizzazione di acque infiltratesi nell'arco di tempo di uno o più anni e che garantiscono un maggior grado di protezione delle acque sorgive. Nel caso specifico, dette condizioni sono verosimilmente legate ai Calcari Selciferi implicati al nucleo della Sinclinale di Carrara e affioranti nella parte medio-bassa del bacino di alimentazione (Fig. 2). La minore permeabilità dei Calcari Selciferi rispetto ai Marmi può, infatti, favorire un rallentamento e una significativa omogeneizzazione delle acque provenienti da monte, le quali, sotto l'azione del carico idraulico, proseguono poi verso le emergenze defluendo al disotto del nucleo della sinclinale e/o attraverso i sistemi di fatturazione, poco sviluppati, degli stessi Calcari Selciferi. Questa interpretazione è peraltro in accordo con il segnale isotopico registrato alle sorgenti nel corso di alcuni eventi meteorici (DOVERI, 2004) responsabili di repentini incrementi di portata e torbidità.

I risultati di tale studio indicano, infatti, che l'alterazione del deflusso di base registrata in occasione di piogge è dovuta a circuiti rapidi che si attivano principalmente a valle del nucleo selcifero della sinclinale.

STUDIO DELLE AREE DI ALIMENTAZIONE

Il contributo delle tecniche isotopiche per la delimitazione delle aree di alimentazione consiste nella individuazione della quota media del bacino idrogeologico mediante un confronto tra il $\delta^{18}\text{O}$ ‰ medio (o $\delta^2\text{H}$ ‰) della sorgente in studio e la relazione esistente fra il $\delta^{18}\text{O}$ ‰ (o $\delta^2\text{H}$ ‰) e la quota delle acque di infiltrazione. Come precedentemente illustrato, questa relazione è stata ottenuta considerando alcune sorgenti opportunamente selezionate in funzione di considerazioni morfologiche ed idrostrutturali, ma anche a carattere idrochimico-

spring, for these waters significant isotopic variations don't occur in response to seasonal rainfall characterized by different isotopic ratios, despite the fact that the samplings were carried out in different conditions with flowrate differences also higher than 300%. The isotopic variability of the rainwater during the survey period is documented by the sample collected into La Piastra stream (flowing in the Torano area; Fig. 2), whose $\delta^{18}\text{O}$ values cover an interval of variation of 1.2‰. This behavior highlights moreover that the stream waters do not feed, at least in detectable amounts, the groundwater drained by springs.

The different trend of isotopic values recorded in the two discharge areas point out the existence of different hydrodynamic conditions in the Frigido and Torano aquifer systems.

The isotopic variability of the Frigido spring is typical of an unconfined aquifer characterized by a relatively high flow velocity, that allows to maintain the memory of the rainwater isotopic variation in the short-medium term.

This type of response of the aquifer would also allow to evaluate the average velocity of flow, by means of a rain gauges network installed in the area for sampling and isotopic analyses of rainwater at least once every two months.

In contrast, the isotopic stability of the Torano springs suggests the existence of favorable conditions for the homogenization of water infiltrated during a period of one or more years; as a result of this, a good protection of the springs baseflow is also guaranteed.

Such conditions are likely due to the presence of Calcari Selciferi at the core of the Carrara Syncline and outcropping in the medium-low zone of the recharge area (Fig. 2). The permeability of Calcari Selciferi is lower than that of Marmi, so this configuration can promote a slowing down and a significant homogenization of groundwater coming from the high part of the basin. Under the action of the hydraulic gradient, the water flow then toward the springs area under the syncline core and/or through the not much developed fracturing systems of the Calcari Selciferi.

This interpretation is also in agreement with the isotopic evolution recorded at the springs during some storm events (DOVERI, 2004) which produce abrupt increase of flowrate and turbidity. Indeed, the results of this study indicate that the baseflow variation, recorded during the storm event, is due to rapid circulation which are mainly activated downstream of the syncline cherty core.

STUDY OF THE FEEDING AREA

The contribution of isotope techniques to define the recharge area consists in the identification of the average altitude of the hydrogeological domain by comparing $\delta^{18}\text{O}$ ‰ (or $\delta^2\text{H}$ ‰) of the studied spring with respect to the relationship between the $\delta^{18}\text{O}$ ‰ (or $\delta^2\text{H}$ ‰) and the altitude of rainwater. As discussed above, this relationship was obtained considering some springs suitably selected according to morphological and hydrostructural considerations, but also taking into account the isotope-hydrochemical features.

isotopico. Con lo studio condotto da MENICHINI (2012) su di un'area delle Alpi Apuane sviluppata perlopiù nel bacino del Fiume Versilia, sono state identificate 2 principali tipologie di sorgenti. Le prime appartenenti alla facies chimica Ca-HCO_3 o Ca-SO_4 rappresentative di acque che hanno interagito con rocce carbonatiche-evaporitiche per un tempo abbastanza lungo per acquisire tale chimismo e caratterizzate da un rapporto isotopico del $\delta^{13}\text{C}$ dovuto ad interazione con le rocce carbonatiche; nella fattispecie questa tipologia di sorgenti presenta contenuti valori di $\delta^{13}\text{C}$ compreso fra circa -3 e -7‰. Campioni di rocce analizzati nel corso del citato studio presentano un contenuto medio di +1.16 ‰ per i Marmi, +1.96 ‰ per i Grezzoni e -2.89 ‰ per il Calcare Cavernoso. La seconda tipologia di sorgenti risulta invece caratterizzata da acque a Na-Cl, con bassa conducibilità elettrica ($< 130 \mu\text{S/cm}$ a 25°C), e da un valore isotopico del $\delta^{13}\text{C}$ generalmente minore di -15÷-20‰. Quest'ultimo intervallo di valori è da attribuire quasi esclusivamente all'aggiunta di CO_2 biogenica, generalmente caratterizzata da un $\delta^{13}\text{C}$ compreso tra -20 e -25‰ (CLARK & FRITZ, 1997). La seconda tipologia di sorgenti è stata utilizzata per ottenere la relazione quota/ $\delta^{18}\text{O}$ ‰, essendo le sorgenti stesse rappresentative di circuiti relativamente brevi e superficiali e di conseguenza, considerando l'effetto regolatore dell'acquifero, di contenuti isotopici medi relativi ad un'acqua meteorica locale. I loro valori di $\delta^{18}\text{O}$ e le quote medie dei relativi bacini di alimentazione sono stati riportati in Fig. 6 ottenendo la relazione quota/ $\delta^{18}\text{O}$ ‰. Tenuto conto dell'ubicazione delle emergenze utilizzate, detta relazione è da ritenersi valida per la zona del bacino del Fiume Versilia e non per l'intero massiccio apuano. Infatti, le condizioni morfologiche locali e l'esposizione nei confronti delle direzioni dominanti di provenienza delle perturbazioni meteoriche possono condizionare in modo significativo la relazione quota/ $\delta^{18}\text{O}$ ‰ (MUSSI *et alii*, 1998; DOVERI, 2000).

L'equazione sopra ottenuta è stata utilizzata per la valutazione delle quote medie di alimentazione di una serie di sorgenti carsiche ricadenti nel bacino del Fiume Versilia ed in zone limitrofe (MENICHINI, 2012).

Nel presente lavoro si discute, come esempio di applicazione, il caso del sistema idrogeologico del Monte Altissimo, le cui acque re-

In the studies carried out by Menichini (2012) in a part of Apuan Alps, mainly in the Versilia River catchment, 2 main types of springs were identified.

The first type, belonging to chemical facies Ca-HCO_3 or Ca-SO_4 , is representative of waters that have interacted with evaporite-carbonate rocks for a long time to get that chemistry. These springs are also characterized by $\delta^{13}\text{C}$ isotopic value linkable to a water interaction with carbonate rocks; in particular such value ranging between -3 and -7‰. Rock samples analysed in the above mentioned study have an average value of $\delta^{13}\text{C}$ close to +1.16 ‰ for Marmi, +1.96 ‰ for Grezzoni, and -2.89 ‰ for Calcare Cavernoso.

The second type of springs is instead characterized by Na-Cl waters with low electrical conductivity ($< 130 \mu\text{S/cm}$ at 25°C), and with a $\delta^{13}\text{C}$ isotopic values generally less than -15÷-20 ‰.

This last values range is due almost exclusively to the addition of biogenic CO_2 , generally characterized by value ranging from -20 to -25 ‰ (CLARK & FRITZ, 1997).

The second type of springs were used to obtain the relationship altitude/ $\delta^{18}\text{O}$ ‰, because they are representative of a relatively short and shallow circuits and so, considering the regulating effect of the aquifer, they have isotopic ratio very similar to those of meteoric water.

Their $\delta^{18}\text{O}$ values and the average altitude of the infiltration area were reported in Fig. 6 obtaining the relationship altitude/ $\delta^{18}\text{O}$ ‰.

Considering the location of the used springs, this relationship isn't valid for the entire Apuan massif, but only for the Versilia River catchment. In fact, the morphological conditions and local exposure with respect to the dominant directions of the meteoric events can affect significantly the relationship altitude/ $\delta^{18}\text{O}$ ‰ (MUSSI *et alii*, 1998; DOVERI, 2000).

The relationship above obtained was used for the evaluation of the recharge area average altitude of some karst springs located in the Versilia River catchment and in adjacent areas (MENICHINI, 2012).

As an example of application, in this paper the hydrogeological system of Monte Altissimo is discussed. Groundwaters of the

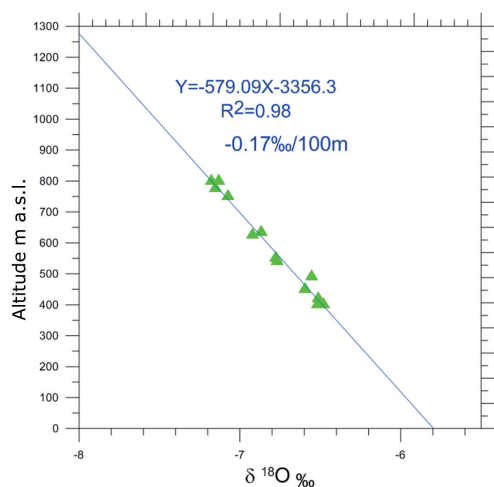


Fig. 6 - Relazione tra quota media di infiltrazione e $\delta^{18}\text{O}$ ‰
- Correlation between mean infiltration altitude and $\delta^{18}\text{O}$ ‰

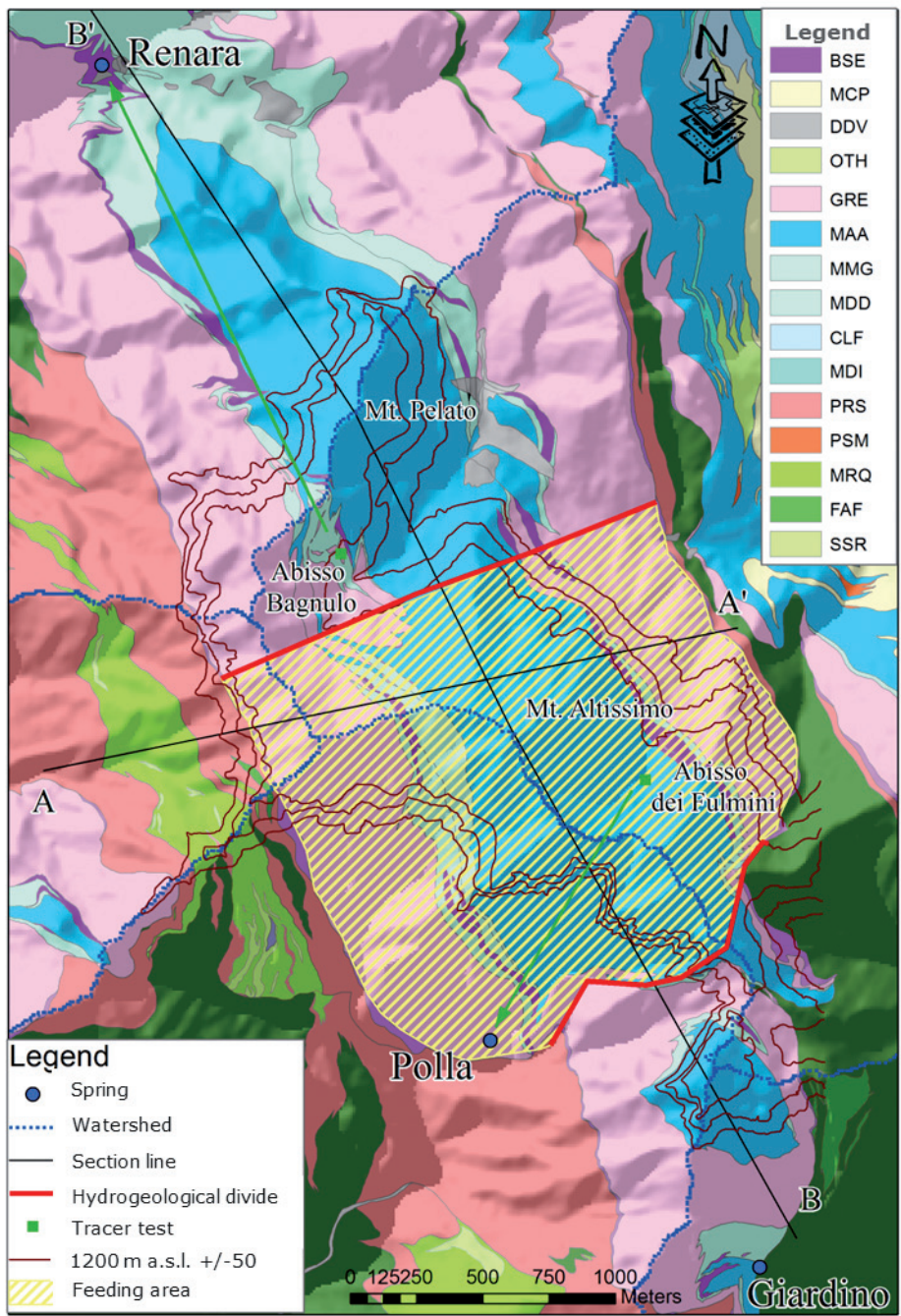


Fig. 7 - Schema geologico con area di alimentazione della sorgente La Polla.
BSE: Breccie di Seravezza; MCP: Marmi Cipollini; DDV: detriti; OTH: Scisti a Orthoceras; GRE: Grezzoni; MAA: Marmi; MMG: Marmi a Megalodonti; MDD: Marmi dolomitici; CLF: Calcarea Selcifero; MDI: Metaradiolariti; PRS: Porfiroidi; PSM: Pseudomacigno; MRQ: Quarziti e Filladi Superiori; FAF: Filladi Inferiori; SSR: Scisti Sericitici

- Geological sketch-map and feeding area of La Polla spring.
BSE: Breccie di Seravezza; MCP: Marmi Cipollini; DDV: detritus; OTH: Scisti a Orthoceras; GRE: Grezzoni; MAA: Marmi; MMG: Marmi a Megalodonti; MDD: Marmi dolomitici; CLF: Calcarea Selcifero; MDI: Metaradiolariti; PRS: Porfiroidi; PSM: Pseudomacigno; MRQ: Quarziti e Filladi Superiori; FAF: Filladi Inferiori; SSR: Scisti Sericitici

capitano nelle sorgenti La Polla, Renara e Giardino (Figg. 1 e 7). In particolare viene trattata la procedura di integrazione del dato isotopico con le informazioni derivanti da altri strumenti di indagine, che ha portato alla delimitazione del bacino di alimentazione della sorgente La Polla. Questa si colloca al contatto fra le formazioni carbonatiche e il basamento paleozoico. La sua area di alimentazione risulta di difficile determinazione soprattutto per le incertezze sulla posizio-

system are drained by three springs named La Polla, Renara and Giardino (Figg. 1 and 7). In particular, the procedure of integration of isotopic data with information coming from other investigation tools is explained. This procedure allowed to define the feeding area of La Polla spring.
This spring is located at the contact between paleozoic basement and the carbonate units. Its recharge area is difficult to deter-

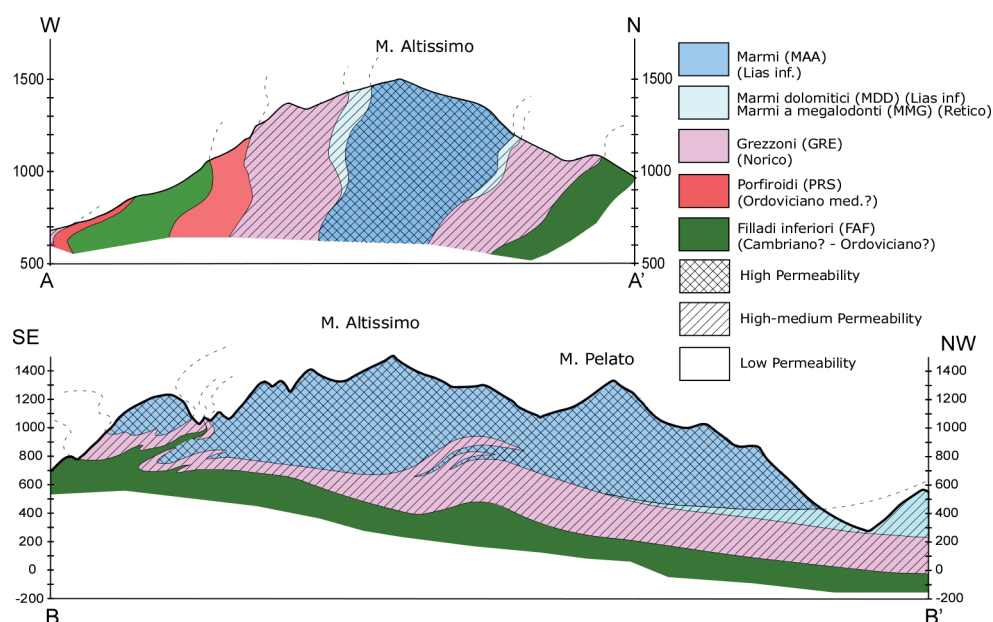


Fig. 8 - Sezioni idrogeologiche realizzate per lo studio del sistema idrogeologico del M. Altissimo (tracce di sezione in Fig. 7)
- Hydrogeological sections to study the Mt. Altissimo hydrogeological system (traces of section shown in Fig. 7)

ne dello spartiacque sotterraneo che separa il suo bacino da quelli relativi alle sorgenti Renara e Giardino. Come di seguito descritto, questa problematica è stata affrontata mediante un'integrazione tra informazioni derivanti da uno studio geologico strutturale, da prove di tracciamento reperite in letteratura (RONCIONI, 2002; PICCINI, 2007) e dalle analisi isotopiche.

La struttura geologica del M. Altissimo è costituita da una sinclinale polifasica a nucleo di Marmi (Fig. 8a) con piano assiale di direzione circa N160 immergente ad W. La sezione longitudinale (Fig. 8b) intercetta, tra M. Altissimo e M. Pelato, pieghe parassite, isoclinali, della prima fase deformativa apuana (D1 della letteratura). All'ispessimento della copertura (Grezzoni-Marmi) corrisponde un'antiforme che coinvolge anche il basamento e che può favorire (tenuto conto anche del grado di permeabilità relativamente inferiore dei Grezzoni rispetto ai Marmi) la ripartizione delle acque in due tracciati opposti, rispettivamente verso il settore meridionale e quello settentrionale di questo sistema idrogeologico. L'assetto strutturale al limite sud della sezione determina il confinamento dell'acquifero carbonatico per l'incapsulamento dell'insieme Grezzoni-Marmi. Questo assetto determina uno spartiacque idrogeologico che separa i due sistemi La Polla e Giardino.

Come deducibile dalle varie sezioni idrogeologiche elaborate e sopra discusse, il sistema idrogeologico risulta impostato principalmente nei Marmi e Grezzoni, caratterizzati rispettivamente da una alta e medio-alta permeabilità, e localmente nei Marmi a Megalodonti (MMG) e Marmi Dolomitici (MDD), caratterizzati da una medio-alta permeabilità. Questi complessi sono limitati verso il basso dai Porfiroidi e Filladi Inferiori del basamento ercinico caratterizzati da una bassa/molto bassa permeabilità. L'immersione della struttura polifasica verso NW favorisce nell'insieme un flusso prevalente verso la sorgente di Renara, anche se la culminazione evidenziata nella se-

mine, especially regarding the position of the groundwater divide that separates its basin from those related to Renara spring and Giardino spring.

As described below, this issue was handled through a multidisciplinary approach including a structural geological study, tracer tests from literature (RONCIONI, 2002; PICCINI, 2007) and isotopic considerations.

The geological structure of M. Altissimo consists of a polyphasic syncline with Marmi at the core (Fig. 8a) with direction of axial plane of N160, dipping westwards. Between Mt. Altissimo and Mt. Pelato the longitudinal section shown in Fig. 8b intercepts isoclinal parasitic folds, belonging to the first phase of the Apuan deformation (D1 of literature). The thickening of the carbonate units (Grezzoni-Marmi) corresponds to an antiform, that includes also the basement and that can facilitate (considering the higher relative permeability of Marmi than Grezzoni) the water repartition in two opposite pathflows of this hydrogeological system, respectively towards south and towards north. The structural setting in the southern part of the section determines the confinement of the carbonate aquifer for the encapsulation of the Grezzoni-Marmi. This structure determines a groundwater divide which separates the two systems, La Polla and Giardino.

As shown from the hydrogeological sections processed and discussed above, the hydrogeological system is set mainly in Marmi and Grezzoni, characterized respectively by high and medium-high permeability and locally in Marmi Megalodonti (MMG) and Marmi Dolomitici (MDD), characterized by a medium-high permeability. These complexes are limited downwards by Porfiroidi and Filladi Inferiori of the hercynian basement, characterized by a low/very low permeability.

The dipping of the polyphasic structure towards NW promotes a

	A (km ²)	P (mm)	T (°C)	Er	Cie	DWR (l/s)	Flowrate (l/s)
La Polla	2.9	1800	8.5	522	60	70	45-60

Tab. 2 - Bilancio idrogeologico della sorgente La Polla. A: Area del bacino di alimentazione; P: precipitazioni medio annue; T: temperatura medio annue; Er: evapotraspirazione reale; Cie: coefficiente di infiltrazione efficace; DWR: risorsa idrica dinamica; Flow rate: portata media da letteratura (PICCINI & PRANZINI, 1989B; PICCINI *et alii*, 1999; PICCINI, 2007; REGIONE TOSCANA, 2007)
- *Groundwater budget of hydrogeological system of la Polla spring. A: Feeding Area; P: average annual rainfall; T: average annual temperature; Er: real evapotranspiration; Cie: effective infiltration Coefficient; DWR: Dynamic Water Resources; Flow rate: flow rate available in literature (PICCINI & PRANZINI, 1989B; PICCINI *et alii*, 1999; PICCINI, 2007; REGIONE TOSCANA, 2007)*

zione longitudinale può effettivamente rappresentare uno spartiacque idrogeologico fra il bacino di Renara e quello della Polla.

Test di tracciamento effettuati nel 1976 nell'Abisso Bagnulo (Buca di Monte Pelato; RONCIONI, 2002) mostrano che le acque da questo sito fluiscono verso la sorgente Renara, mentre altri test effettuati nell'Abisso dei Fulmini (PICCINI, 2007) indicano che l'area del versante orientale del Monte Altissimo alimenta la sorgente La Polla (Fig. 7).

Sulla base del valore di $\delta^{18}\text{O}$ pari a -7.85‰ e di un suo confronto con la retta di figura 6 è stata stimata una quota media di alimentazione di 1200 m s.l.m.

Combinando tutte queste informazioni (spartiacque idrogeologici determinati da fattori strutturali, risultati dei test di tracciamento, quota media di alimentazione) è stato delimitato il bacino di alimentazione della sorgente La Polla riportato in figura 7. L'area di alimentazione ha una estensione di 2.9 km² con una quota media calcolata dal DTM (Digital Terrain Model) di 1162 m s.l.m. Questo valore risulta essere molto simile a quello individuato con il $\delta^{18}\text{O}$ (1200 m s.l.m.).

Per validare ulteriormente l'area di alimentazione così ottenuta è stato effettuato sull'area stessa un bilancio idrogeologico. I valori medi annui delle precipitazioni e temperature sono stati reperiti presso il Servizio Idrologico Regionale (www.idropisa.it) per le stazioni ubicate nell'area in studio. Il valore dell'evapotraspirazione reale è stato calcolato mediante la formula di TURC (1954), mentre il coefficiente di infiltrazione efficace è stato ripreso dallo studio di PICCINI *et alii*, 1999. In tabella 2 sono riportati i valori ottenuti e come è possibile osservare i valori di portata disponibili in letteratura relativi alla sorgente (45-60 l/s; PICCINI & PRANZINI, 1989B; PICCINI *et alii*, 1999; PICCINI, 2007; REGIONE TOSCANA, 2007) sono del tutto paragonabili come ordine di grandezza alla risorsa idrica dinamica (DWR) calcolata mediante questo bilancio.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha voluto evidenziare le potenzialità degli isotopi stabili della molecola dell'acqua in studi riguardanti gli acquiferi carsici, dove le convenzionali tecniche idrogeologiche non sono sempre facilmente utilizzabili.

In particolare sono stati trattati casi di studio che hanno interessato tre sistemi carsici delle Alpi Apuane drenati da una serie di emergenze (sorgenti di Torano, sorgente del Frigido e sorgente La Polla). Per ognuno degli esempi trattati è stato descritto un particolare aspetto relativo alla circolazione idrica in sistemi carsici ed in che modo i

flow toward Renara spring, even if the culmination highlighted in the longitudinal section may effectively represent a groundwater divide between the Renara basin and La Polla basin.

Tracer tests conducted in 1976 in the Abisso Bagnulo (Buca di Monte Pelato; RONCIONI, 2002) show that the waters flow from this site to the Renara spring, while other tests carried out in the Abisso dei Fulmini (PICCINI, 2007) indicate that the area of the eastern slopes of Mount Altissimo feeds La Polla spring (Fig. 7)

Based on the $\delta^{18}\text{O}$ close to -7.85‰ and its comparison with the relationship shown in figure 6 an average altitude of about 1200 m a.s.l. was evaluated for the infiltration area.

Considering all these information (groundwater divide determined by structural study, results of tracer tests, average altitude of the infiltration area) the feeding area of the La Polla spring was delineate and shown in figure 7. The identified feeding area has an extension of 2.9 km² with an average altitude calculated from the DTM (Digital Terrain Model) of 1162 m a.s.l. This is very similar to the value evaluate through the $\delta^{18}\text{O}$ (1200 m a.s.l.).

To further validate the identified recharge area a groundwater budget on the same area was calculated. The values of average annual rainfall and temperatures were obtained from the Servizio Idrologico Regionale (www.idropisa.it) regarding stations located in the study area.

The real evapotranspiration value was calculated using the TURC formula (1954), while for the effective infiltration coefficient was used the value reported in the study of PICCINI *et alii*, 1999. The results of this groundwater budget (Tab. 2) indicate that the flow rate of La Polla spring available in literature (45-60 l/s; PICCINI & PRANZINI, 1989B; PICCINI *et alii*, 1999; PICCINI, 2007; REGIONE TOSCANA, 2007) is very similar to the calculated Dynamic Water Resources (DWR) (60 l/s).

CONCLUSION

This paper has highlighted the potentiality of water stable isotopes in studies regarding the karst aquifers, for which the conventional hydrogeological tools are generally not easy to carry out.

In particular, some examples concerning three Apuan Alps karst systems that are drained by several springs (Torano springs, Frigido spring and La Polla spring) were discussed. Each example treats an aspect of the groundwater circulation in karst system, and it explain how the water stable isotopes may be useful to obtain information about such aspect.

valori degli isotopi stabili della molecola dell'acqua hanno permesso di ottenere informazioni in merito.

Nella fattispecie nel caso delle sorgenti di Torano, per le quali i dati chimici e le condizioni idrostrutturali suggeriscono un unico sistema idrogeologico, i dati isotopici hanno permesso di individuare la presenza di due sistemi di circolazione ben distinti.

L'analisi dell'evoluzione nel corso di un anno dei dati isotopici delle sorgenti di Torano rispetto a quelli della sorgente Frigido ha permesso di valutare le diverse condizioni idrodinamiche dei due sistemi acquiferi in esame. In particolare la variabilità isotopica della sorgente del Frigido, mostrata a fronte di trascurabili variazioni dei contenuti chimici, è tipica di un acquifero freatico caratterizzato da velocità di flusso relativamente elevate; viceversa, la stabilità dei valori isotopici registrati alle sorgenti di Torano suggerisce l'esistenza di condizioni favorevoli all'omogeneizzazione delle acque di infiltrazione e quindi ad una minore vulnerabilità delle sorgenti stesse.

Relativamente alla sorgente La Polla è stato mostrato un esempio di applicazione degli isotopi stabili dell'acqua per la determinazione delle quote medie di alimentazione, previa caratterizzazione isotopica delle acque d'infiltrazione su un intorno significativo. La quota media così ottenuta, unitamente alle considerazioni a carattere geologico-strutturale ed idrogeologico, ha permesso di delimitare il bacino di alimentazione della sorgente, e l'affidabilità del risultato è stata confermata attraverso un bilancio idrogeologico.

In definitiva i risultati presentati in questo lavoro dimostrano che lo strumento isotopico è di fondamentale importanza nello studio della circolazione idrica in ambienti carsici, in quanto permette, a fronte di costi limitati, di ottenere importanti informazioni per la gestione e la salvaguardia di risorse idriche di interesse strategico.

OPERE CITATE/REFERENCES

- ANDREO B., VÍAS J., DURÁN J. J., JIMÉNEZ P., LÓPEZ-GETA J. A. & CARRASCO F. (2008) - *Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain*. Hydrogeology Journal, **16**: 911-925.
- BALDACCI F., CECCHINI S., LOPANE G. & RAGGI G. (1993) - *Le risorse idriche del Fiume Serchio ed il loro contributo all'alimentazione dei bacini idrografici adiacenti*. Mem. Soc. Geol. It., **49**: 365-391.
- BARBIERI M., BOSCHETTI T., PETITTA M. & TALLINI M. (2005) - *Stable isotope (^2H , ^{18}O and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, Central Italy)*. App. Geoch. **20**: 2063-2081.
- BIANCHI A., BONINI L., BOTTI F., DOVERI M., LELLI M., MANZELLA A., MOLLI G., MONTAGNANI D., PIEROTTI L., UNGARELLI C., UNGARI A. & VASELLI L. (2009) - *Multidisciplinary approach to the study of the relationships between shallow and deep circulation of geofluids*. Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia, 25-29 April 2010, pp. 7.
- BOSCHETTI T., VENTURELLI G., TOSCANI L., BARBIERI M. & MUCCHINO C. (2005) - *The Bagni di Lucca thermal waters (Tuscany, Italy): an example of Ca-SO₄ waters with high Na/Cl and low Ca/SO₄ ratios*. Journal of Hydrology, **307**: 270-293.
- CARMIGNANI L., GIGLIA G. & KLIGFIELD R. (1978) - *Structural evolution of the Apuan Alps: an example of continental margin deformation in the northern Apennines, Italy*. Journal of Geology, **86**: 487-504.
- CARMIGNANI L. & KLIGFIELD R. (1990) - *Crustal extension in the Northern Apennines: the transition from compression to extension in the Alpi Apuane Core Complex*. Tectonics, **9**: 1275-1303.
- CARMIGNANI L., CONTI P., DISPERATI L., FANTOZZI P.L., GIGLIA G. & MECCHERI M. (2000) - *Sezioni geologiche e schemi stratigrafico strutturali delle Alpi Apuane. Scala 1:100.000*. E-Geo un mare di Carte, null.150, SELCA, Firenze.
- CAZZANTE S., FORTI P., MICHELI L., PICCINI L. & PRANZINI G. (1988) - *Carta delle grotte e delle sorgenti delle Alpi Apuane*. C.N.R., Gr. Naz. Dif. Catastrofi Idrogeologiche, U.O. 4.9, pubbl. n. **105**, L.A.C., Firenze.

In the case of Torano springs, for which the geochemical data and the hydrostructural features suggest an only one hydrogeological system, the isotopic data allowed to distinguish two separate circulation systems.

The analysis of the isotopic variability in a year for the water of Torano springs with respect to those of Frigido spring highlighted different hydrodynamic conditions of the two aquifer systems examined. In particular the isotopic variability of the Frigido spring, despite a negligible variability of the chemical composition, is typical of a phreatic aquifer with relatively high groundwater circulation velocity; instead, the isotopic stability recorded in the Torano springs indicates the presence of conditions favourable for an infiltration water homogenization and so for a minor vulnerability of these springs with respect to the Frigido one.

As regards La Polla spring, an application of water stable isotopes for the identification of catchment average altitude was shown, basing on an isotopic characterization of rainwater in a significant neighbourhood. The obtained average altitude, together with geological-structural and hydrogeological considerations, allowed to define the recharge area of such spring. The groundwater budget performed for this area was consistent with the average flow rate of the spring.

Finally the results discussed in this work point out as the isotopic applications are a fundamental tool in studies regarding the groundwater circulation in karst systems, because it allows, with limited cost, to achieve important information for the management and safeguard of these strategic water resources.

**STABLE WATER ISOTOPES AS FUNDAMENTAL TOOL IN KARST AQUIFER STUDIES:
SOME RESULTS FROM ISOTOPIC APPLICATIONS IN THE APUAN ALPS CARBONATIC COMPLEXES (NW TUSCANY, ITALY)**

- CERRINA FERONI A., PLESI G., FANELLI G., LEONI L. & MARTINELLI P. (1983) - *Contributo alla conoscenza dei processi metamorfici di grado molto basso (anchimetamorfismo) a carico della Falda Toscana nell'area del ricoprimento Apuano*. Boll. Soc. Geo. It. **102**: 269-280.
- CIVITA M., FORTI P., MARINI P., MECCHERI M., MICHELI L., PICCINI L. & PRANZINI G. (1991) - *Carta della vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi delle Alpi Apuane: note illustrative*. C.N.R., Gr. Naz. Dif. Catastrofe Idrogeologica, U.O. 4.1 e 4.9, pubbl. n. **399**, S. EL. Ca., Firenze, pp. 28.
- CLARK I. & FRITZ P. (1997) - *Environmental Isotopes In Hydrogeology*. Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton - New York, pp. 328.
- DOVERI M. (2000) - *Studio idrogeochimico di sistemi acquiferi superficiali e profondi delle Alpi Apuane e della Valle del Serchio*. Tesi di Laurea, Università di Pisa, a.a. 1999-2000, 245 pp.
- DOVERI M. (2004) - *Studio idrogeologico e idrogeochimico dei sistemi acquiferi del bacino del Torrente Carrione e dell'antistante piana costiera*. Tesi di Dottorato inedita, Università di Pisa, 178 pp.
- DOVERI M., LEONE G., MUSSI M. & ZANCHETTA G. (2005) - *Composizione isotopica di acque ipogee nell'Antro del Corchia (Alpi Apuane, Toscana nord-occidentale)*. Mem. Ist. It. di Speleologia, **18**: 119-132.
- DRYSDALE R., PIEROTTI L., PICCINI L. & BALDACCIO F. (2001) - *Suspended sediments in Karst spring waters near Massa (Tuscany), Italy*. Environmental Geology, **40**: 1037 - 1050.
- EPSTEIN S. & MAYEDA T. (1953) - *Variation of ^{18}O content of waters from natural sources*. Geochim. Cosmochim. Acta, **4**: 213-224.
- FORTI P. (2002) - *Gli acquiferi carsici: problematiche per il loro studio ed utilizzo*. In: Atti del convegno "Le risorse idriche sotterranee delle Alpi Apuane: conoscenze attuali e prospettive di utilizzo", Federazione Speleologica Toscana, Centro Visite del Parco Apuane, Filanda di Forno, Massa-Italia, 22 giugno 2002, 7-23.
- FRITZ P. & FONTES J.CH. (1980) - *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*. FRITZ P. & FONTES J.CH. (editors), Volume 1, The terrestrial environment, A. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York, pp 545.
- HOEFS J. (2004) - *Stable Isotope Geochemistry*. Springer-Verlag, Berlin, 201 pp.
- IAEA/WMO (2004) - *Global Network of Isotopes in Precipitation*. The GNIP Database. Accessible at: <http://isohis.iaea.org>.
- LONGINELLI A. & SELMO E. (2003) - *Isotopic composition of precipitation in Italy: a first overall map*. Journal of Hydrogeology, **270**: pp 75-88.
- MARFIA A.M., KRISHNAMURTHY R.V., ATEKWANA E.A. & PANTON W.F. (2004) - *Isotopic and geochemical evolution of ground and surface waters in a karst dominated geological setting: a case study from Belize, Central America*. Appl. Geochem. **19**: 937-946.
- MASINI R. (1960) - *I bacini costieri delle Alpi Apuane (studi geoidrologici sulle acque sotterranee)*. Boll. Serv. Geol. Ital. **55**: 657-752.
- MENICHINI M. (2012) - *A multidisciplinary approach to define the hydrogeological model of aquifer systems in the "Fiume Versilia" catchment and the adjacent coastal plain (Northwest Tuscany, Italy)*. Tesi di Dottorato inedita, Università di Pisa, Scuola di Dottorato Galileo Galilei. Programma in Scienze della Terra.
- MOHAMMAD Z. IQBAL (1998) - *Application of environmental isotopes in storm-discharge analysis of two contrasting stream channel in a watershed*. Wat. Res. **32** (10) : 2959-2968.
- MOLLI G., CORTECCI G., VASELLI L., OTTRIA G., CORTOPASSI A., DINELLI E., MUSSI M. & BARBIERI M. (2010) - *Fault zone structure and fluid-rock interaction of a high angle normal fault in Carrara marble (NW Tuscany, Italy)*. J. Str. Geol., **32**: 1334-1348.
- MUSSI M., LEONE G., & NARDI I. (1998) - *Isotopic geochemistry of natural water from the Alpi Apuane- Garfagnana area, Northern Tuscany, Italy*. Miner. Petrogr. Acta, **41**: 163-178.
- PANICHI C. & GONFIANTINI R. (1978) - *Environmental isotopes in geothermal studies*. Geothermics, **6**: 143-161.
- PICCINI L. & PRANZINI G. (1989a) - *Idrologia e carsismo del bacino del Fiume Frigido (Alpi Apuane)*. Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., Mem. s. A, **96**, 107-158.
- PICCINI L. & PRANZINI G. (1989b) - *Carta idrogeologica del Bacino del Frigido e aree limitrofe (Alpi Apuane)*. Scala 1:25.000. In: Idrogeologia e carsismo del bacino del fiume Frigido (Alpi Apuane). Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem., Ser. A, **96**.
- PICCINI L., PRANZINI G., TEDICI L., & FORTI P. (1997) - *Le risorse idriche degli acquiferi carbonatici del comprensorio apuo-versiliese*. C.N.R., Gr. Naz. Dif. Catastrofi Idrogeologiche, pubbl. n. 1584, ARCA, Firenze, 1 tav.
- PICCINI L., PRANZINI G., TEDICI L. & FORTI P. (1999) - *Le risorse idriche degli acquiferi carbonatici del comprensorio Apuo-Versiliese*. Quad. Geol. Appl., **6** (I): 61-78.
- PICCINI L. (2007) - *L'ambiente fisico delle alpi Apuane*. In: Apuane e dintorni. Guida incompleta alla scoperta del fenomeno carsico. A cura del Comitato Apuano 2007.
- PICCINI L., ZANCHETTA G., DRYSDAL R., HELLSTROM J., ISOLA I., FALICK A., LEONE G., DOVERI M., MUSSI M., MANTELLI F., MOLLI G., LOTTI L., RONCONI A., REGATTIERI E., MECCHERI M. & VASELLI L. (2008) - *The environmental features of the Monte Corchia cave system (Apuan Alps, central Italy) and their effects on speleothem growth*. Int. J. of Spel. **37**: 153-172.
- PREZIOSI E. & PICCINI L. (2000) - *Idrogeologia carsica: le indagini speleologiche con strumento di prospezione e ricerca*. Geologia dell'Ambiente, **3**: 33-38.
- REGIONE TOSCANA (2007) - *Studio idrogeologico prototipale del corpo idrico significativo dell'acquifero carbonatico delle Alpi Apuane, Monti d'Oltre Serchio e S. Maria del Giudice*. Centro di Geotecnologie. Università degli Studi di Siena. Relazione Finale ed Allegati.
- RONCONI A. (2002) - *La Federazione Speleologica Toscana e le ricerche idrologiche nelle cavità carsiche delle Alpi Apuane*. In Atti del Convegno: "Le risorse idriche sotterranee delle Alpi Apuane: conoscenze attuali e prospettive di utilizzo". Forno di Massa, 22 Giugno 2002, 46-76.
- TARRAGONI C. (2006) - *Determinazione della "quota isotopica" del bacino di alimentazione delle principali sorgenti dell'alta*. Geologica Romana, **39**: 55-62.

**GLI ISOTOPHI STABILI DELL'ACQUA COME STRUMENTO FONDAMENTALE NELLO STUDIO DEGLI ACQUIFERI CARSICI:
ALCUNI ESEMPI DI APPLICAZIONE SUI COMPLESSI CARBONATICI DELLE ALPI APUANE (TOSCANA NW)**

TURC (1954) - *Le bilan d'eaux des sols: relation entre les précipitation et l'écoulement*. Ann. Agron. **5**: 491-596.

WOOD W.W. & SANFORD W.E. (1995) - *Chemical and isotopic methods for quantifying groundwater recharge in a regional, semiarid environment*. Ground Water, **33**: 458-468.

YURTSEVER Y. & GAT J.R. (1981) - *Atmospheric waters*. In: Stable Isotope Hydrology (Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle). In: J.R. GAT & R. GONFIANTINI (eds), technical reports (210) IAEA, Vienna, 103-142.

Received September 2012 - Accepted January 2013