

CAPTAZIONE SOSTENIBILE DELLE ACQUE SOTTERRANEE IN UN ACQUIFERO NATURALMENTE CONTAMINATO DA ARSENICO: IL CASO DELL'AREA VULCANICA DEL CIMINO-VICO (ITALIA CENTRALE)

SUSTAINABLE GROUNDWATER DEVELOPMENT IN A NATURALLY ARSENIC-CONTAMINATED AQUIFER: THE CASE OF THE CIMINO-VICO VOLCANIC AREA (CENTRAL ITALY)

ANTONELLA BAIOCCHI^(*), ATTILIO COLETTA^(**), LUCA ESPOSITI^(*),
FRANCESCA LOTTI^(*) & VINCENZO PISCOPO^(*)

^(*)Università degli Studi della Tuscia, Dipartimento di Scienze Ecologiche e Biologiche - Largo Università, 01100 Viterbo (Italy) - E-mail: piscopo@unitus.it

^(**)Università degli Studi della Tuscia, Dipartimento di Scienze e Tecnologie per l'Agricoltura, le Foreste, la Natura e l'Energia - Largo Università, 01100 Viterbo (Italy)

RIASSUNTO

Questo studio esamina la presenza di arsenico nelle acque sotterranee dell'area vulcanica del Cimino-Vico (Italia centrale), ampiamente utilizzate per il fabbisogno idrico potabile e irriguo. Lo scopo è quello di fornire un supporto idrogeologico per meglio indirizzare la gestione delle risorse idriche sotterranee, al fine di minimizzare la presenza dell'elemento cancerogeno nelle acque captate.

L'area vulcanica del Cimino-Vico costituisce un complesso sistema idrogeologico comprendente diverse falde sospese ed un acquifero basale continuo nelle vulcaniti, in alcune aree influenzato anche dalla risalita di acque termali. La presenza di arsenico nelle acque sotterranee è connessa con la lunghezza dei circuiti nelle rocce vulcaniche e, principalmente, con il sistema idrotermale attivo.

I dati editi e inediti sul contenuto di arsenico delle acque dell'acquifero basale sono stati elaborati al fine di ottenere una mappa aggiornata della sua distribuzione, usando tecniche geostatistiche. I risultati sono stati confrontati con l'attuale distribuzione dei prelievi utilizzati per acqua potabile. Il confronto evidenzia che l'attuale gestione delle risorse idriche sotterranee non sembra essere sostenibile, essendo presenti le più alte portate di prelievo nelle aree con concentrazione di arsenico che supera i 10 µg/L, e, viceversa, basse portate di prelievo nelle aree con bassa concentrazione del contaminante.

Il caso analizzato evidenzia che le scelte future per una gestione sostenibile delle acque in un'area naturalmente contaminata sono fortemente condizionate dalla conoscenza dell'ambiente idrogeologico. Da questa conoscenza scaturiscono alcune possibilità alternative e/o integrative alle soluzioni che prevedono il trattamento delle acque.

PAROLE CHIAVE: arsenico, acquifero vulcanico, sostenibilità delle acque sotterranee, analisi geostatistica

INTRODUZIONE

La presenza di arsenico nelle acque sotterranee delle aree vulcaniche dell'Italia centrale e meridionale è nota da circa trenta anni (per esempio, CREMISINI *et alii*, 1979; AIUPPA *et alii*, 2003). Dopo la recente revisione dei requisiti di qualità delle acque potabili (Decreto Legislativo 31/2001), cioè l'abbassamento della concentrazione massima ammissibile (MCL) da 50 a 10 µg/L, l'arsenico è diventato un

ABSTRACT

This study concerns the occurrence of arsenic in groundwater of the Cimino-Vico volcanic area (central Italy), widely used for drinking water supply and irrigation. The purpose is to provide a hydrogeological support for re-addressing the groundwater resource management in order to minimize the presence of the carcinogenic element in tapped waters.

The Cimino-Vico volcanic area constitutes a complex hydrogeological system including several perched aquifers and a continuous basal aquifer in the vulcanites, in some areas also influenced by deep-rising thermal waters. The occurrence of arsenic in groundwater is connected to the length of circuits in the volcanic rocks and, mainly, to the active hydrothermal system.

The published and unpublished data of the arsenic content in groundwater of the basal aquifer were processed to obtain a reviewed map of its distribution, using geostatistical techniques. Results were compared with the present distribution of withdrawal supplying drinking water. The comparison highlights that the present management of groundwater resources does not follow a sustainable approach, with higher rate of withdrawal in areas with arsenic concentration exceeding 10 µg/L, and, vice versa, low rate in areas with lower concentration of the contaminant.

The case study highlights that the future options for promoting sustainable water management in a naturally contaminated area are strongly conditioned by the knowledge of the hydrogeological environment. From this knowledge some alternative and/or integrative possibilities to the treatment solutions arise.

KEY WORDS: arsenic, volcanic aquifer, groundwater sustainability, geostatistical analysis

INTRODUCTION

The presence of arsenic in groundwater of the volcanic areas of central and southern Italy has been documented for about thirty years (e.g., CREMISINI *et alii*, 1979; AIUPPA *et alii*, 2003). After the recent revision of the drinking water standard (Italian Legislative Decree 31/2001), i.e. the lowering of the the maximum allowable contaminant level (MCL) from 50 to 10 µg/L, arsenic is now not

problema non solo per la salute ma anche per le sue ricadute socio-economiche. Di conseguenza le agenzie e gli enti preposti alla gestione delle acque si sono ritrovate ad investire risorse per assicurare i requisiti della nuova normativa.

Questo studio riguarda la presenza di arsenico nelle acque sotterranee dell'area vulcanica del Cimino-Vico (Italia centrale), ampiamente utilizzate per il locale approvvigionamento idrico potabile e irriguo. Lo scopo è quello di fornire un supporto idrogeologico per meglio indirizzare la gestione delle risorse idriche sotterranee. Attualmente, le risorse idriche sotterranee del sistema vulcanico forniscono acque potabili ad una popolazione di circa 170.000 abitanti. Le acque sotterranee sono captate attraverso numerosi pozzi e sorgenti individuate sulla base della prossimità alle utenze e dell'entità della portata.

Nell'area vulcanica del Cimino-Vico la presenza di arsenico nelle acque sotterranee è connessa principalmente ai processi idrotermali (ANGELONE *et alii*, 2009). Le acque termali (50-62 °C) alimentate da risalite di fluidi profondi mostrano le più alte concentrazioni di arsenico; le acque fredde, campionate dal più superficiale acquifero vulcanico, sono caratterizzate da una più ampia variabilità del parametro, superando in circa il 66% dei casi, il limite di 10 µg/L.

In questo studio, la presenza di arsenico nelle acque sotterranee e la sua distribuzione areale è considerata in relazione alla distribuzione ed al tipo di prelievi utilizzati per l'approvvigionamento potabile, in base a dati nuovi e pregressi. Questa conoscenza è fondamentale per indirizzare le future scelte per la gestione delle risorse idriche sotterranee.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO

L'area di studio ricade tra la costa tirrenica e la catena appenninica (Fig. 1). Questa regione comprende una serie di bacini sedimentari conseguenza dei processi che avvennero durante la formazione della catena appenninica. Dal Pliocene nella regione si alternarono periodi di locale subsidenza e di sollevamento differenziale ed una intensa attività vulcanica. L'assetto strutturale ed i relativi domini magmatici dell'area vulcanica condizionano il flusso di calore dell'area e la variazione della temperatura con la profondità. Infatti l'area è caratterizzata da una forte anomalia regionale del flusso di calore (>150 mW/m²) (CALAMAI *et alii*, 1976; CATALDI *et alii*, 1995).

L'area oggetto di studio comprende i complessi vulcanici del Cimino e del Vico (Fig. 1) ed ha una estensione di circa 900 km².

Il complesso del Cimino fu attivo tra 1,35 e 0,95 Ma. L'attività effusiva ed esplosiva diede luogo a numerosi domi, che si svilupparono secondo fratture orientate NW-SE, ed a prodotti piroclastici. Il complesso vulcanico è costituito da ignimbriti e domi riodacitici e lave latitiche e olivine-latitiche (SOLLEVANTI, 1983; LARDINI & NAPPI, 1987).

Il complesso del Vico è costituito da uno strato-vulcano con una caldera centrale ospitante il Lago di Vico. Il vulcano fu attivo principalmente tra 419 ka e 95 ka e si sviluppò in un graben allungato in direzione NW-SE all'intersezione con una frattura orientata NE-SW. Le alterne fasi esplosive ed effusive diedero luogo a numerosi prodotti piroclastici e colate laviche di natura fonolitica, tefritica e trachitica (LOCARDI, 1965;

only a health problem but also a socioeconomic issue. As a consequence, water management companies and authorities must invest in water management to ensure drinking standards in line with the new regulatory context.

This study concerns the occurrence of arsenic in groundwater of the Cimino-Vico volcanic area (central Italy), widely used for the local drinking water supply and irrigation. The purpose is to provide a hydrogeological support for re-addressing the groundwater resource management. At present, the groundwater resources of the volcanic system supply the local demand of drinking water for approximately 170,000 inhabitants. Groundwater is tapped through numerous wells and springs whose location is based on users proximity and flow rates.

In the Cimino-Vico volcanic area the occurrence of arsenic in groundwater is mainly connected with the hydrothermal processes (ANGELONE *et alii*, 2009). Thermal waters (50-62 °C) fed from deep-rising fluids show the highest arsenic concentrations. Cold waters sampled from the shallower volcanic aquifer are characterized by a wider variability, and about 66% exceed the limit of 10 µg/L.

In this study, the occurrence of arsenic in groundwater is considered in relation to the distribution and type of withdrawals supplying drinking water. Based on new and previous data on arsenic concentration in groundwater, the distribution of the geogenic contaminant has been reviewed and has been compared with the distribution of the withdrawals. This understanding is important to address the future options for the management of groundwater resources.

GEOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL OUTLINES

The study area lies between the Tyrrhenian coast and the Apennine Chain (Fig. 1). This region contains a series of sedimentary basins related to the processes that occurred during the formation of the Apennine Chain. Periods of local subsidence alternated with periods of differential uplift and intense volcanic activity have affected the region since the Pliocene. The structural setting and related magmatic domains of the volcanic area affect the heat flow and temperature variation with depth. A strong regional heat flow anomaly (>150 mW/m²) characterizes this region (CALAMAI *et alii*, 1976; CATALDI *et alii*, 1995).

The investigated area comprises the Cimino and Vico volcanic complexes (Fig. 1) and covers a surface area of some 900 km².

The Cimino complex was active between 1.35 and 0.95 Ma. Effusive and explosive activity gave rise to several domes that developed along a NW-SE trending fracture and included pyroclastic deposits. Rhyodacitic ignimbrites and domes as well as latitic and olivine-latitic lavas constitute the volcanic complex (SOLLEVANTI, 1983; LARDINI & NAPPI, 1987).

The Vico complex consists of a stratovolcano with a central caldera that houses Lake Vico. This volcano was mainly active between 419 ka and 95 ka and developed along a NW-SE elongated graben at the intersection with a NE-SW fracture. Alternating explosive and effusive phases gave rise to several pyroclastic deposits and lava flows, which are phonolitic, tephritic and trachytic in composition (LOCARDI,

SUSTAINABLE GROUNDWATER DEVELOPMENT IN A NATURALLY ARSENIC-CONTAMINATED AQUIFER:
THE CASE OF THE CIMINO-VICO VOLCANIC AREA (CENTRAL ITALY)

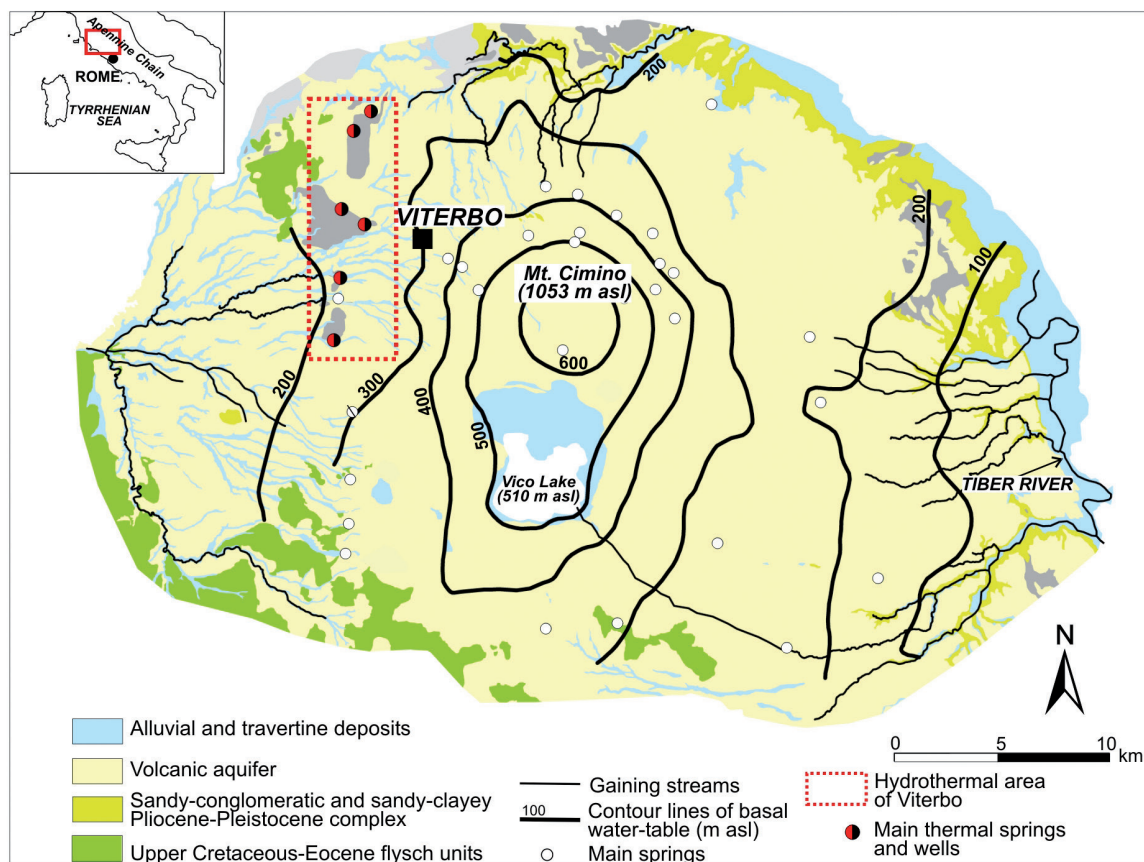


Fig. 1 - Carta idrogeologica semplificata dell'area vulcanica del Cimino-Vico (da Baiocchi *et alii*, 2006, modificata)
- Simplified hydrogeological map of the Cimino-Vico volcanic area (modified from Baiocchi *et alii*, 2006)

MATTIAS & VENTRIGLIA, 1970; BERTAGNINI & SBRANA, 1986).

Il substrato delle vulcaniti comprende diverse rocce sedimentarie: un complesso sedimentario plio-pleistocenico costituito da conglomerati, arenarie, sabbie ed argille; il flysch del Cretacico superiore-Eocene costituito da alternanze calcarenitico-pelittico-calcaree e torbiditico-pelittico-arenacee; le rocce carbonatiche triassico-paleogeniche spesse diverse centinaia di metri e comprendenti calcari, calcari marnosi, marne, calcari dolomitici, dolomie e anidriti (BALDI *et alii*, 1974; FUNICIELLO *et alii*, 1977; LA TORRE *et alii*, 1981; BUONASORTE *et alii*, 1991).

Le caratteristiche strutturali dell'area sono molto complesse a causa dell'attività neotettonica e delle più recenti deformazioni vulcano-tettoniche. Nell'area di studio faglie orientate N-S, E-W, NW-SE e NE-SW suddividono le strutture profonde e controllano il sollevamento del substrato delle vulcaniti (BALDI *et alii*, 1974; LA TORRE *et alii*, 1981; BUONASORTE *et alii*, 1987; BARBERI *et alii*, 1994).

Le vulcaniti del Cimino e del Vico costituiscono un sistema idrogeologico limitato dal complesso sedimentario plio-pleistocenico e dal flysch del Cretacico superiore-Eocene (Fig. 1). Sono stati riconosciuti un acquifero basale continuo e diverse falde sospese in re-

1965; MATTIAS & VENTRIGLIA, 1970; BERTAGNINI & SBRANA, 1986).

The substratum beneath the Cimino and Vico volcanites consists of different sedimentary rocks: a Pliocene-Pleistocene sedimentary complex, including conglomerates, sandstones, sands, and clays; the Upper Cretaceous-Eocene Flysch, consisting of alternating calcareous-pelitic-calcareous and arenaceous-pelitic-turbidites; the Triassic-Palaeogene carbonate rocks, several thousand meters thick, including limestones, marly limestones, marls, dolomitic limestones, dolostone, and anhydrites (BALDI *et alii*, 1974; FUNICIELLO *et alii*, 1977; LA TORRE *et alii*, 1981; BUONASORTE *et alii*, 1991).

The structural features of the area are very complex because of neotectonic activity and more recent volcano-tectonic related deformation. Within the study area, faults oriented N-S, E-W, NW-SE and NE-SW subdivide the deep structures and control the uplift of the volcanic basement (BALDI *et alii*, 1974; LA TORRE *et alii*, 1981; BUONASORTE *et alii*, 1987; BARBERI *et alii*, 1994).

The Cimino and Vico volcanites constitute a hydrogeological system limited by the Pliocene-Pleistocene sedimentary complex and Upper Cretaceous-Eocene Flysch (Fig. 1). A continuous basal aquifer and several perched aquifers have been found in relation to the com-

lazione alla complessa idrostratigrafia, che include formazioni con più alta permeabilità (quali ignimbriti e lave) alternate a formazioni discontinue a più bassa permeabilità (quali tuffi e depositi piroclastici fini) (BAIOCCHI *et alii*, 2006).

Le falde sospese sono di limitata estensione ed hanno recapito in numerose sorgenti ubicate a quote elevate e caratterizzate da ridotta portata (generalmente meno di 0,005 m³/s).

L'acquifero basale è caratterizzato da una falda radiale divergente ed interessa l'intero sistema (Fig. 1). La morfologia piezometrica segue la topografia con un alto piezometrico nel settore centrale comprendente i domi del Cimino ed il Lago di Vico (Fig. 1). L'acquifero basale ha recapito principalmente nei torrenti e nelle sorgenti (queste ultime con portata generalmente inferiore a 0,02 m³/s). Nel limite sud-orientale del sistema sono stati riscontrati flussi idrici sotterranei dall'acquifero vulcanico verso l'acquifero alluvionale della Valle del Tevere, dove il complesso sedimentario plio-pleistocenico è costituito da depositi conglomeratico-sabbiosi (BONI *et alii*, 1986; CAPELLI *et alii*, 2005; BAIOCCHI *et alii*, 2006). La parte centrale del sistema, comprendente i domi del Cimino e la caldera del Lago di Vico, è caratterizzata dai più bassi valori di trasmissività, generalmente tra 10⁻⁶ e 10⁻⁴ m²/s; nelle zone marginali i valori di trasmissività sono generalmente più alti, tra 10⁻⁴ e 10⁻² m²/s (BAIOCCHI *et alii*, 2006).

Il rendimento medio in acque sotterranee del sistema è stato stimato tra 5 e 7 m³/s. Le uscite in acque sotterranee sono state stimate in circa 2,0 m³/s verso i torrenti e le sorgenti, in circa 2,3 m³/s come flussi verso gli acquiferi limitrofi e in circa 1,5 m³/s come portate emunte dai numerosi pozzi diffusi sul territorio (BAIOCCHI *et alii*, 2006).

Nel settore occidentale del sistema emergono acque termali da sorgenti e pozzi profondi fino a 150 m (Fig. 1). La risalita di tali acque avviene attraverso il substrato sedimentario delle vulcaniti, in particolare dove esso è sollevato, fagliato e fratturato e dove è presente una forte anomalia del flusso di calore. La portata di queste acque è stata stimata in circa 0.1 m³/s per l'area idrotermale di Viterbo (PISCOPO *et alii*, 2006). Le acque termali sono di tipo solfato-alcalino-terroso, hanno temperatura tra 50 e 62 °C, conducibilità elettrica tra 2.700 e 3.400 µS/cm ed alto contenuto in gas (CO₂ e H₂S). Invece le acque delle falde sospese e della falda di base delle vulcaniti comprendono acque poco mineralizzate (conducibilità elettrica tra 200 e 900 µS/cm) e fredde (temperatura tra 13 e 20°C) di tipo bicarbonato-alcalino (PISCOPO *et alii*, 2006; ANGELONE *et alii*, 2009).

LA PRESENZA DI ARSENICO NELLE ACQUE SOTTERRANEE DEL SISTEMA IDROGEOLOGICO DEL CIMINO-VICO

La presenza di elementi minori tossici nelle acque sotterranee dell'area vulcanica del Cimino-Vico, tra cui l'arsenico, è stata documentata in diversi studi (CREMISINI *et alii*, 1979; DALL'AGLIO *et alii*, 2001; VIVONA *et alii*, 2007; ANGELONE *et alii*, 2009; ACHENE *et alii*, 2010).

La concentrazione di arsenico nelle acque sotterranee del sistema

plex hydrostratigraphy which includes relatively high-permeability formations (such as ignimbrites and lava flows) alternated to low-permeability, discontinuous formations (such as tuffs and fine pyroclastic deposits) (BAIOCCHI *et alii*, 2006).

The perched aquifers are of limited and discontinuous extent and discharge to several springs located at high elevation characterized by low flow (generally less than 0.005 m³/s).

The basal aquifer is characterized by radially divergent flow and extended to the whole system (Fig. 1). The potentiometric surface follows the topography, with the piezometric high in the central sector, which includes the Cimino domes and the Lake Vico caldera (Fig. 1). The basal volcanic aquifer discharges mainly into the streams and springs (generally with flow less than 0.02 m³/s). Groundwater outflow from the volcanic aquifer towards the alluvial aquifer of the Tiber Valley has been found in the south-eastern boundary of the system, where the Pliocene-Pleistocene sedimentary complex is made up of sandy-conglomeratic deposits (BONI *et alii*, 1986; CAPELLI *et alii*, 2005; BAIOCCHI *et alii*, 2006). The central portion of the system, including the Cimino domes and the Lake Vico caldera, is characterized by the lowest transmissivity values, generally between 10⁻⁶ and 10⁻⁴ m²/s. Towards the marginal zones to the W and SE, the transmissivity values are higher, generally between 10⁻⁴ and 10⁻² m²/s (BAIOCCHI *et alii*, 2006).

The mean groundwater yield of the system has been estimated between 5 and 7 m³/s. The discharge has been estimated approximately 2.0 m³/s in the streams and springs, 2.3 m³/s as flow towards adjacent aquifers, and 1.5 m³/s pumped from numerous scattered wells (BAIOCCHI *et alii*, 2006).

In the western sector of the system, thermal waters emerge from springs and wells up to 150 m in depth (Fig. 1). These waters are considered to be due to uprising of deeper groundwater circuits in the sedimentary basement of the volcanites, where it is locally uplifted, fractured and faulted and a strong heat flow anomaly exists. The yield of this deeper groundwater circuits for the thermal area of Viterbo is approximately 0.1 m³/s (PISCOPO *et alii*, 2006). Thermal waters are of the sulfate-alkaline-earth type, have temperatures between 50 and 62 °C, electrical conductivity between 2,700 and 3,400 µS/cm and high gas content (CO₂ and H₂S). In contrast, the waters of the perched and basal volcanic aquifers comprise fresh (electrical conductivity between 200 and 900 µS/cm) and cold waters (temperature between 13 and 20°C) of the bicarbonate-alkaline type (PISCOPO *et alii*, 2006; ANGELONE *et alii*, 2009).

OCCURRENCE OF ARSENIC IN GROUNDWATER OF THE CIMINO-VICO HYDROGEOLOGICAL SYSTEM

In the groundwater of the Cimino-Vico volcanic area the presence of minor toxic elements, and among these arsenic, was documented by different studies (CREMISINI *et alii*, 1979; DALL'AGLIO *et alii*, 2001; VIVONA *et alii*, 2007; ANGELONE *et alii*, 2009; ACHENE *et alii*, 2010).

Arsenic concentration in groundwater of the Cimino-Vico system varies from less than 1 µg/L up to 370 µg/L in the different

Cimino-Vico varia da valori minori a 1 µg/L fino a 370 µg/L nei diversi punti d'acqua, comprendenti sorgenti e pozzi (profondi da qualche metro fino a diverse decine di metri) della falda di base e delle falde sospese, sorgenti e pozzi di acque termali. La concentrazione di arsenico nelle acque destinate al consumo umano supera spesso la MCL (ANGELONE *et alii*, 2009; ACHENE *et alii*, 2010).

Facendo riferimento allo studio di ANGELONE *et alii* (2009), quello più completo dal punto di vista idrogeologico e idrochimico per l'area di studio, la presenza di arsenico nelle acque sotterranee dell'area vulcanica del Cimino-Vico è principalmente connessa con la risalita di fluidi profondi che caratterizzano il sistema idrotermale attivo. Le più alte concentrazioni di arsenico (da 180 a 370 µg/L) sono state trovate nelle acque termali (temperatura da 50 a 62 °C) alimentate da circuiti relativamente più profondi nel substrato delle vulcaniti. Nell'acquifero vulcanico relativamente più superficiale, la distribuzione dell'arsenico è funzione della locale idrostratigrafia, dell'assetto strutturale e della direzione orizzontale del flusso. Dove l'acquifero vulcanico basale è aperto ai flussi da circuiti più profondi, sono state ritrovate concentrazioni più alte di arsenico (da 20 a 100 µg/L). Ciò si spiega come conseguenza del mescolamento tra le acque provenienti da circuiti idrici profondi con quelle derivanti dalla ricarica diretta dell'acquifero vulcanico. Questo avviene principalmente nell'intorno delle zone con faglie. Dove l'acquifero vulcanico basale è isolato inferiormente da un notevole spessore di rocce sedimentarie a bassa permeabilità, la concentrazione di arsenico è generalmente inferiore a 10 µg/L. Quando si ritrovano alte concentrazioni di arsenico in queste ultime condizioni idrostratigrafiche, la causa è ancora legata a flussi laterali dalle zone limitrofe caratterizzate dai suddetti mescolamenti. Per le falde sospese è stata riscontrata la più bassa concentrazione di arsenico in relazione a ridotte profondità e lunghezza dei circuiti idrici nelle vulcaniti. Nelle zone dove l'arsenico nella falda di base è superiore a 20 µg/L, la concentrazione aumenta con la profondità dei pozzi e la vicinanza a faglie e fratture.

DATI E METODI

Questo studio si basa su dati pubblicati e inediti riguardanti la concentrazione di arsenico nelle acque sotterranee.

I dati riportati in ANGELONE *et alii* (2009) riguardano 65 punti d'acqua; i dettagli sul campionamento e sui metodi analitici sono riportati nello studio citato, metodi analitici (ICP-MS) la cui accuratezza e riproducibilità sono ben note. A questi si sono aggiunti i dati riportati in VIVONA *et alii* (2007) (29 punti d'acqua) per meglio caratterizzare il settore orientale del sistema. Sono state inoltre considerate 89 analisi di acque effettuate nel periodo 2005-2009 dal locale gestore idrico (Talete spa). Anche queste ultime analisi sono state condotte con le stesse tecniche (ICP-MS).

L'insieme dei dati considerati comprende 183 diversi punti d'acqua dei quali 103 captati per scopi potabili. La Tabella 1 riporta una sintesi statistica delle acque campionate divise per acquifero. La distribuzione totale di campioni mostra una asimmetria positiva con media pari a circa il doppio del valore mediano di 13,2 µg/L (Tab. 1).

sampled sources, including springs of the basal and perched volcanic aquifers, wells of the basal and perched aquifers with variable depth (from some meters up to several tens meters), and thermal springs and wells. Arsenic concentration often exceeds the MCL in fresh waters of springs and wells supplying local drinking water (ANGELONE *et alii*, 2009; ACHENE *et alii*, 2010).

According to ANGELONE *et alii* (2009), the more complete hydrogeological and hydrochemical characterization for the area under investigation, the occurrence of arsenic in groundwater of the Cimino-Vico volcanic area is mainly connected with the deep-rising fluids that characterize the active hydrothermal system. The highest arsenic concentrations (from 180 to 370 µg/L) were found in the thermal springs and wells (temperatures from 50 to 62 °C) fed from relatively deep groundwater circuits in the substratum of the volcanic aquifer. In the shallow volcanic aquifer, the distribution of arsenic is related to the local hydrostratigraphy, structural setting, and horizontal flow direction. Where the basal volcanic aquifer is open to the upward flow from deeper circuits, relatively high arsenic concentrations (from 20 to 100 µg/L) were found. This is explained as a consequence of mixing between waters with different origins, i.e. deep groundwater and direct recharge of the volcanic aquifer. This occurs especially around the deep faulted zones. Where the volcanic basal aquifer is sealed by a high thickness of low-permeability sedimentary rocks, arsenic concentrations is commonly less than 10 µg/L. When relatively high arsenic concentrations are found in these hydrostratigraphical conditions, the reason is again the lateral groundwater inflow from adjacent mixing zones. For the perched aquifers the lowest arsenic concentrations were found in response to the reduced depth and length of the circuits in the vulcanites. In zones where the arsenic content in the basal volcanic aquifer is above 20 µg/L, concentration increases according to the boreholes depth and to the vicinity of faults and fractures.

DATA AND METHODS

This study is based on published and unpublished data about the arsenic content in groundwater.

Data from ANGELONE *et alii* (2009) concerned 65 sources; details on sampling and analytical procedures are given in the cited publication, which involve analytical techniques (ICP-MS) of which the accuracy and reproducibility are well known. Data from VIVONA *et alii* (2007) (29 sources) were considered to cover the eastern sector of the system. Other 89 waters were also considered, sampled in 2005-2009 by the local water authorities (Talete spa). Also these last water samples were analyzed with the same techniques (ICP-MS).

The so-constituted dataset considers 183 different sources, of which 103 tapped for drinking purposes. In Table 1 the sampled waters are categorized and arsenic content is statistically summarized. The distribution is positively skewed, with a mean about twice the median value of 13.2 µg/L (Tab. 1). For all sampled waters the hy-

| Kind of source | N | Tapped | Mean | Stand. Dev. | Max | Upper Quartile | Median | Lower Quartile | Min |
|------------------|------------|------------|-------------|-------------|--------------|----------------|-------------|----------------|------------|
| Spring (BA) | 12 | 12 | 22.5 | 18.4 | 61.5 | 26.4 | 16.1 | 11.4 | 3.0 |
| Well (BA) | 135 | 74 | 21.0 | 23.7 | 195.0 | 26.9 | 14.0 | 7.8 | 1.0 |
| Spring/Well (PA) | 31 | 17 | 9.3 | 9.2 | 41.6 | 9.7 | 6.9 | 4.6 | 1.7 |
| Spring/Well (TA) | 5 | 0 | 305.4 | 74.9 | 371.0 | 330.0 | 329.0 | 321.0 | 176.0 |
| <i>Total</i> | <i>183</i> | <i>103</i> | <i>26.9</i> | <i>52.8</i> | <i>371.0</i> | <i>25.8</i> | <i>13.2</i> | <i>7.0</i> | <i>1.0</i> |

Tab. 1 - Sintesi delle statistiche descrittive del contenuto di As ($\mu\text{g/L}$) nelle acque sotterranee (BA: acquifero vulcanico basale; PA: acquifero vulcanico sospeso; TA: acquifero termale)

- Descriptive statistical summary of As content ($\mu\text{g/L}$) in groundwater (BA: basal volcanic aquifer; PA: perched volcanic aquifer; TA: thermal aquifer)

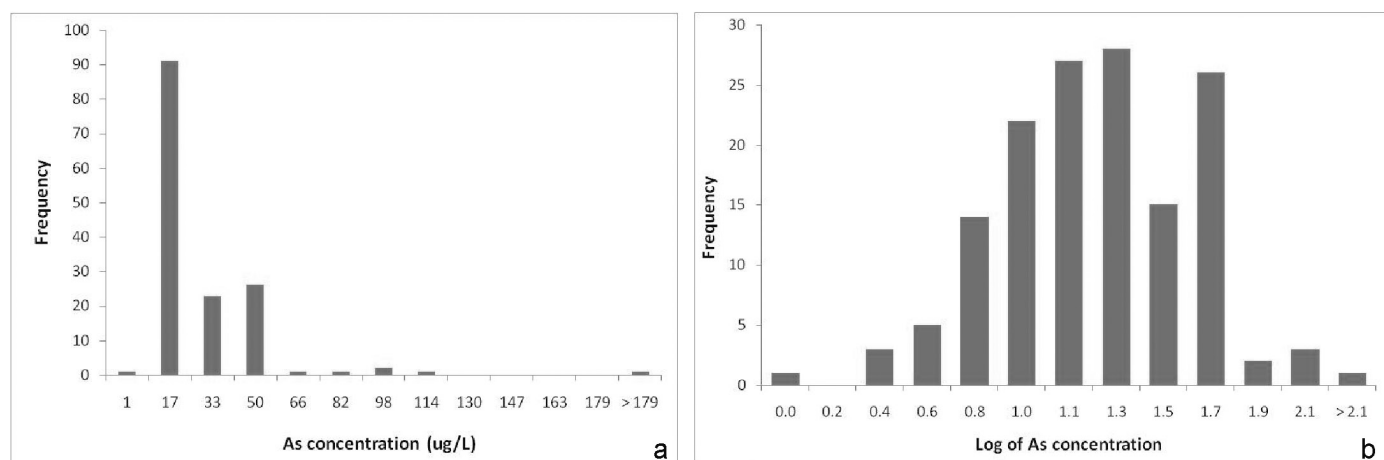


Fig. 2 - Istogramma della concentrazione di As per l'acquifero basale (a) e relativi dati secondo la distribuzione log-normale (b)
- Histogram of As concentration for the basal aquifer (a) and relative log-transform distribution (b)

L'attenzione di seguito è focalizzata sull'acquifero basale, di estensione pari all'intero sistema (CAPELLI *et alii*, 2005; BAIOCCHI *et alii*, 2006) e oggetto principale dei prelievi idrici. Le elaborazioni seguono l'approccio geostatistico e hanno lo scopo di ricostruire la distribuzione della concentrazione di arsenico e di stimarne il valore nelle zone non campionate. I dati relativi ai pozzi ed alle sorgenti dell'acquifero basale (147 punti) sono stati quindi estratti dall'insieme dei dati originali. L'istogramma dei dati è riportato in Figura 2a dove è evidente l'alto grado di asimmetria, tipico dei dati geochemici. Per migliorare la simmetria della distribuzione, è stata applicata una trasformazione log-normale; il corrispondente istogramma è riportato in Figura 2b e le relative elaborazioni statistiche sono mostrate in Tab. 2. La distribuzione log-normale presenta due mode, facendo ipotizzare la presenza di due popolazioni come ritrovato da ANGELONE *et alii* (2009). Nonostante ciò l'approssimazione alla distribuzione normale è soddisfacente per l'applicazione del metodo geostatistico.

Per esaminare la quantità e la distribuzione dei prelievi usati per l'approvvigionamento potabile nell'area vulcanica del Cimino-Vico, sono stati considerati i dati del locale gestore idrico (ATO1 Regione Lazio). Essi riguardano principalmente il tipo di captazione (sorgente o pozzo), portata media e volume annuo delle acque captate per uso

drogeological type of source is detailed, i.e. springs or wells from the basal and perched aquifers of volcanites, or thermal aquifer.

Attention is focused herein on the basal volcanic aquifer, which is extended to the whole system (CAPELLI *et alii*, 2005; BAIOCCHI *et alii*, 2006) and where the most of withdrawals are located. A geostatistical approach was applied with the aim of reconstructing the distribution of the arsenic concentration and making estimates of values and associated uncertainty at the unsampled locations. Data of wells and springs of the basal aquifer (147 sources) were extracted from the original dataset. Histogram of data is shown in Figure 2a where a high skewness, typical of geochemical data, is evident. In order to improve the symmetry of the distribution, a lognormal transform was performed; the corresponding histogram is displayed in Figure 2b and statistics in Table 2. The log transformed distribution presents two modes, letting suppose the presence of two different populations in the dataset as found in ANGELONE *et alii* (2009). Nevertheless the approximation to the normal distribution is sufficiently good to allow the application of the geostatistical processing.

To examine the rate and distribution of withdrawals used for drinking water in the Cimino-Vico volcanic area, data of the local water agency (ATO1 Regione Lazio) were considered. They mainly concern the type of sources (spring or well), average flow and annual water volume tapped for drinking water. Aggregated data concern-

| Basal Aquifer data | N | Mean | SD | Max | Upper Quartile | Median | Lower Quartile | Min | Skewness | Kurtosis |
|----------------------|-----|------|------|-------|----------------|--------|----------------|-----|----------|----------|
| Original data | 147 | 21.1 | 23.3 | 195.0 | 26.9 | 14.0 | 8.0 | 1.0 | 3.9 | 22.6 |
| Log transformed data | 147 | 1.1 | 0.4 | 2.3 | 1.4 | 1.1 | 0.9 | 0.0 | -0.1 | 0.1 |

Tab 2 - Confronto delle statistiche tra la distribuzione originale e quella secondo la trasformazione log-normale di As ($\mu\text{g/L}$) per l'acquifero basale
- Comparison of statistics between the original and the log transform distributions of As ($\mu\text{g/L}$) for the basal aquifer

| | |
|--|----------------------|
| Volume of water tapped for drinking water (m^3/year) | 11.511×10^6 |
| Surface area of municipalities that comprehends the whole study area (km^2) | 1,425 |
| Number of inhabitants | 173,214 |
| Volume of water tapped from springs (m^3/year)* | 4.277×10^6 |
| Volume of water tapped from wells (m^3/year)* | 6.593×10^6 |

Tab. 3 - Volume totale delle acque sotterranee captato nei comuni che ricoprono l'area di studio riferite al 2000 (da ATO1 Regione Lazio; *dati incompleti)
- Total volume of groundwater tapped in municipalities covering the study area referred to 2000 (from ATO1 Regione Lazio; *incomplete data)

potabile. Per ogni comune sono disponibili i dati aggregati riguardanti il volume annuo captato nel 2000 per uso potabile; al contrario, non sempre è disponibile il dettaglio sul volume relativo alla singola captazione (sorgente o pozzo), così come anche sul tipo di acquifero captato (falda sospesa o basale). Una sintesi dei dati dei comuni dell'area di studio insieme al numero di abitanti relativo allo stesso periodo di riferimento sono riportati nella Tabella 3.

Le informazioni disponibili relative a ubicazione, profondità dei pozzi e quota delle sorgenti inquadrata nel contesto idrogeologico dell'area (BAIOCCHI *et alii*, 2006; ANGELONE *et alii*, 2009) evidenziano che il volume captato dalle falde sospese è basso in confronto a quello captato dall'acquifero basale. Risulta che le falde sospese alimentano acque potabili da circa 30 sorgenti con portate generalmente comprese tra $0,001$ e $0,006 \text{ m}^3/\text{s}$. Se si utilizza la distribuzione di frequenza della portata delle sorgenti dell'intero sistema (BAIOCCHI *et alii*, 2006), si può attribuire in prima approssimazione una percentuale del 12% alle acque captate da falde sospese rispetto al volume totale captato a fini potabili.

RISULTATI

I dati sul contenuto di arsenico nelle acque sotterranee sono stati elaborati per ottenere una mappa della sua distribuzione. L'approccio geostatico adottato è quello del *kriging* (Matheron, 1962). Tutte le tipologie di *kriging* sono scritte in termini di covarianza, ma comunemente si considera la funzione semivariogramma piuttosto che la funzione covarianza. Il semivariogramma sperimentale dei dati log-trasformati relativi all'acquifero basale è mostrato in Figura 3; il modello teorico di semivariogramma che meglio rappresenta i dati risulta quello sferico (CRESSIE, 1993; CHILES & DELFINER, 1999). Questo modello è stato introdotto nel calcolo di differenti tecniche *kriging*, mediante l'applicativo Geostatistical Analyst in ambiente GIS ArcMap.

Le tecniche di *kriging* applicate ai dati sono state il *Kriging Semiplice* e *Ordinario*. Per stimare la bontà della predizione dei due meto-

ing the annual water volume tapped for drinking water in 2000 are reported for each municipality, whereas volumes of the single source (spring or well) are not always available, neither the type of tapped aquifer (perched or basal aquifers). A summary of data of the municipalities in the studied area, together with the number of inhabitants for the same year, are reported in Table 3.

The available information concerning the location, depth of wells and elevation of springs set in the hydrogeological context of the area (BAIOCCHI *et alii*, 2006; ANGELONE *et alii*, 2009) highlight that the volume of water tapped from perched aquifers is low if compared with the volume tapped from the basal aquifer. It results that the perched aquifers feed drinking water by approximately 30 springs with flow generally from 0.001 to $0.006 \text{ m}^3/\text{s}$. If the frequency distribution of springs discharge of the entire Cimino-Vico hydrogeological system is considered (BAIOCCHI *et alii*, 2006), a percentage of 12% of the total volume tapped for drinking water can be roughly attributed to perched aquifers.

RESULTS

Data of the arsenic content in groundwater were processed to obtain a map of its distribution. The geostatistical technique applied herein involves the use of *kriging* (Matheron, 1962). All *kriging* systems are written in terms of covariances, but common practice consists of computing and modeling the semivariogram rather than the covariance function. The experimental semivariogram of the log-transform dataset of the basal aquifer is shown in Figure 3; the theoretical semivariogram model that better fitted the data turned to be the spherical model (CRESSIE, 1993; CHILES & DELFINER, 1999). This model was introduced in the calculations of different *kriging* techniques, through the software Geostatistical Analyst in the GIS ArcMap environment.

Two different *kriging* techniques have been applied to the data-

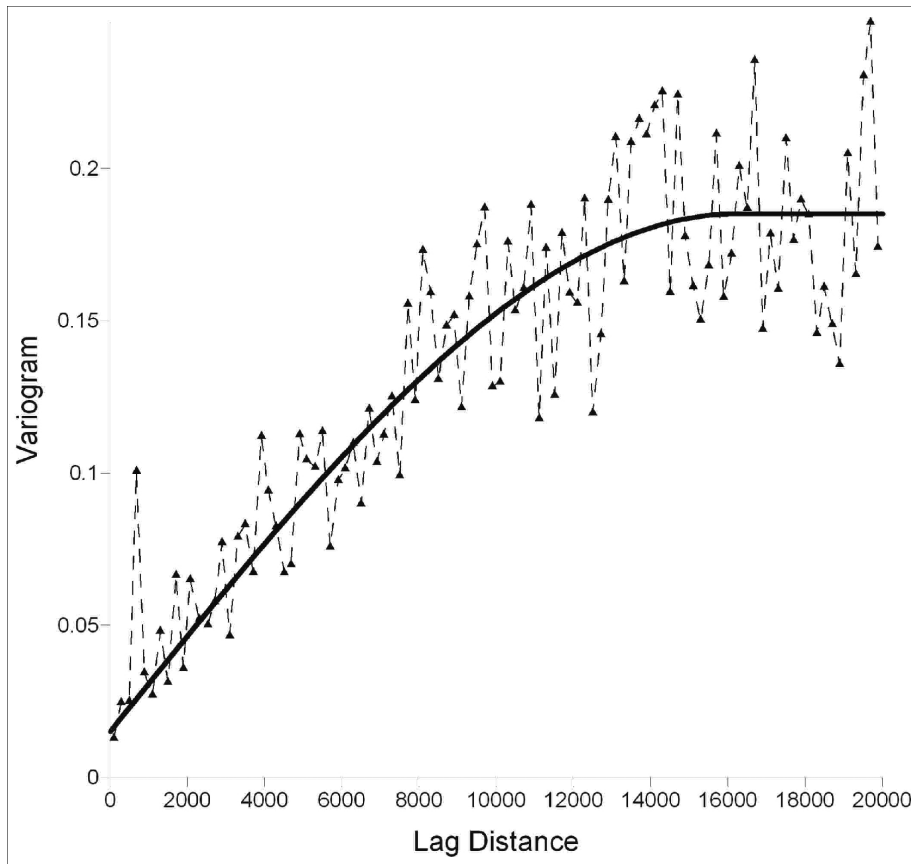


Fig. 3 - Semivariogramma sperimentale delle concentrazioni di As log-trasformati dell'acquifero basale confrontato con il modello sferico
- *Experimental semivariogram of the log-transform As concentrations of the basal aquifer compared with the spherical model*

| Case | Interpolation Method | Semivariogram model | Transform | RMS | Average standard Error |
|------|----------------------|---------------------|-----------|-------|------------------------|
| 1 | Simple Kriging | Spherical | none | 19.25 | 19.97 |
| 2 | Simple Kriging | Spherical | log | 1.80 | 2.04 |
| 3 | Ordinary Kriging | Spherical | log | 1.72 | 1.69 |

Tab. 4 - Confronto dei risultati della LOOCV dei due metodi
- *Comparison of LOOCV results of the two methods*

di, è stata effettuata una cross-validazione “leave-one-out” (LOOCV). Questo tipo di cross-validazione elimina una singola osservazione alla volta e utilizza le rimanenti come dati per una nuova interpolazione. In corrispondenza del punto eliminato viene effettuato il confronto tra il dato stesso e la sua previsione. Ciò viene ripetuto per ogni osservazione in modo che tutte siano usate come dato di validazione. La Tabella 4 riporta i risultati della cross-validazione.

I risultati delle due tecniche applicate sono simili, con il massimo RMS nel caso dei dati non-trasformati ed il minimo nel caso del *Kriging Ordinario* (caso 3 in Tab. 4). Le mappe che rappresentano la previsione e l'errore standard della previsione relativamente al caso 3 sono riportate in Figura 4.

I dati disponibili riguardanti i prelievi di acque potabili hanno permesso di stimare la portata relativamente ad ogni comune, espressa come

set, i.e. *Simple* and *Ordinary Kriging*. An estimate of the goodness of their prediction was calculated through the *leave-one-out* cross-validation technique (LOOCV), which employs a single observation as the validation data, and the remaining observations as the training data. This is repeated such that each observation in the dataset is used once as the validation data. Table 4 reports cross-validation results.

Results of the two techniques are similar, with the maximum RMS in the case of non-transformed data and the minimum in the case of *Ordinary Kriging* (case 3 in Tab. 4). Resulting maps representing the prediction and standard error of prediction from case 3 are reported in Figure 4.

The available data concerning drinking withdrawals permitted to estimate the yield for each municipality, expressed as the average value per unit surface (Q_m), in a range between 0.095 and 0.547 L/s

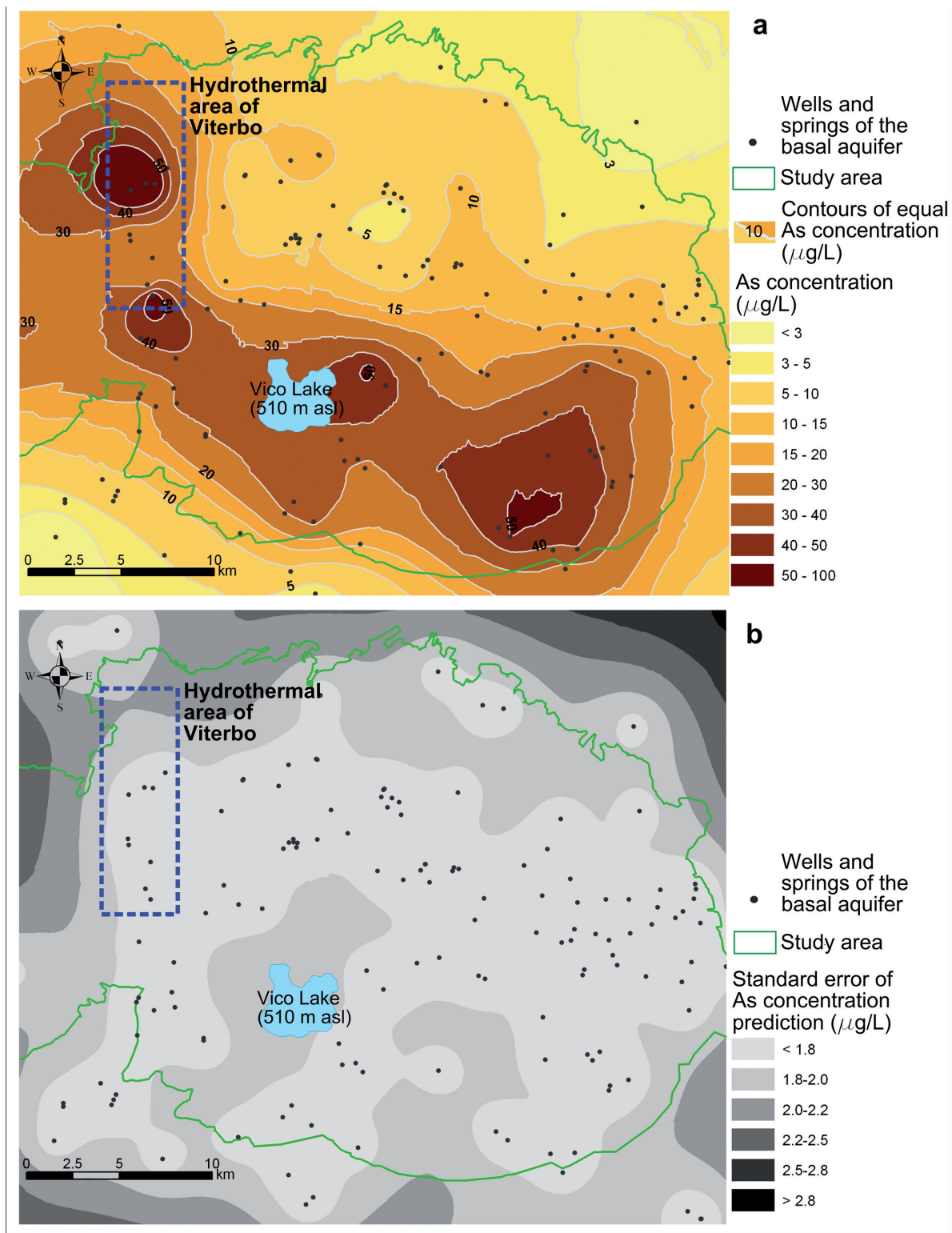


Fig. 4 - Mappa del contenuto As ($\mu\text{g/L}$) nelle acque sotterranee dell'acquifero basale mediante il Kriging Ordinario (a) e relativo errore standard della previsione (b)
- Map of As content ($\mu\text{g/L}$) in groundwater of the basal aquifer from Ordinary Kriging (a) and associated standard error of prediction (b)

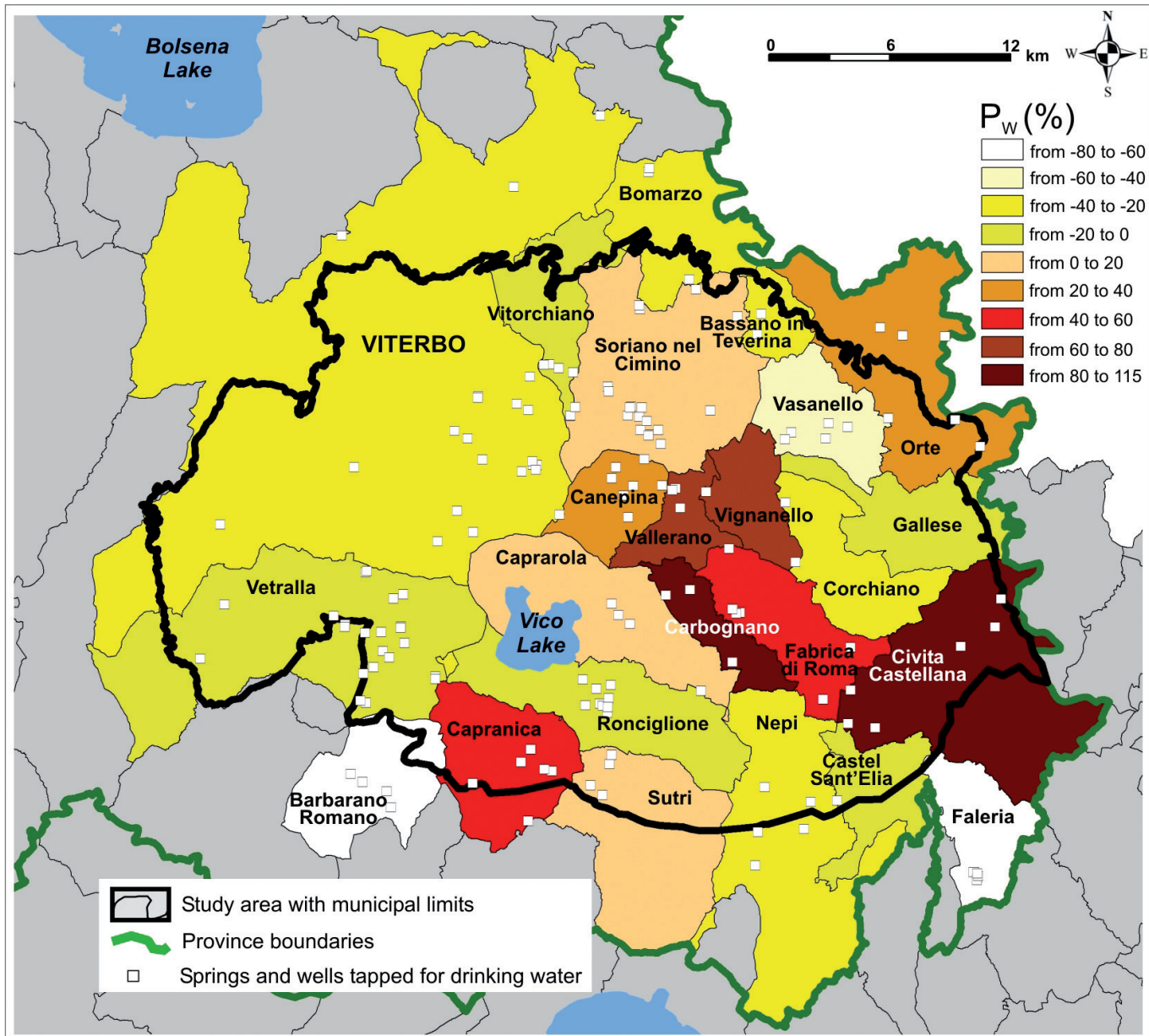


Fig. 5 - Distribuzione dei prelievi per acqua potabile rappresentata come percentuale della portata per unità di superficie rispetto al valore medio dell'intera area
 - Distribution of withdrawals for drinking water represented as the percentage of yield per unit surface of each municipality on the average value of the entire area

valore medio per unità di superficie (Q_m), in un intervallo tra 0,095 e 0,547 L/s per km². La portata media (Q_i) derivata dall'intera area dei comuni considerati (1,425 km²) risulta di 0,256 L/s per km². Quest'area include per intero quella di studio (900 km²) (Fig. 5). Q_m e Q_i hanno permesso di determinare la percentuale di prelievo per unità di superficie (p_w) per ogni comune secondo la seguente relazione: $p_w = (Q_m - Q_i) / Q_i \times 100$. La distribuzione di p_w è riportata in Figura 5 insieme con l'ubicazione nota delle sorgenti e dei pozzi utilizzati per l'approvvigionamento di acqua potabile.

per km². The average yield (Q_i) exploited in the wider area of the municipalities (1,425 km²) results 0.256 L/s per km². This area fully encloses the study area (900 km²) (Fig. 5). Q_m and Q_i allowed to determine the percentage of withdrawal per unit surface (p_w) for each municipality as follows: $p_w = (Q_m - Q_i) / Q_i \times 100$. The distribution of p_w is reported in Figure 5 together with the known location of the springs and wells used to supply drinking water.

DISCUSSIONE

La concentrazione di arsenico nelle acque sotterranee dell'acquifero basale del sistema Cimino-Vico non è omogenea. I valori più alti (da 20 a 100 $\mu\text{g/L}$) risultano in un'area allungata in direzione NW-SE, mentre valori inferiori a 10 $\mu\text{g/L}$ caratterizzano le acque sotterranee dei settori settentrionali e orientali dell'acquifero basale (Fig. 4). Questa distribuzione del contaminante geogenico può essere spiegata attraverso la complessità dell'assetto idrostratigrafico e strutturale dell'area ed i relativi fenomeni di mescolamento che avvengono tra acque circolanti nell'acquifero vulcanico basale ed i fluidi di risalita profonda che caratterizzano il sistema idrotermale, in accordo con i precedenti studi (ANGELONE *et alii*, 2009). Si può notare che la zona allungata NW-SE corrisponde con quella dove sono state riconosciute l'anomalia di flusso di calore (CALAMAI *et alii*, 1976; CATALDI *et alii*, 1995) e/o le strutture neotettoniche e vulcano-tettoniche (BALDI *et alii* 1974; LA TORRE *et alii*, 1981; BARBERI *et alii*, 1994).

Ritornando all'oggetto dello studio, anche gli attuali prelievi idrici potabili risultano non omogeneamente distribuiti sul territorio. Il confronto tra le due mappe delle Figure 4 e 5 mostra che i comuni con un alto p_w sono spesso caratterizzati da un'alta concentrazione di arsenico nelle acque captate (per esempio, il Comune di Civita Castellana); viceversa, i comuni con una bassa percentuale di prelievi presentano una bassa concentrazione di contaminazione naturale delle acque sotterranee. Quest'ultima condizione riguarda il settore orientale del sistema Cimino-Vico dove esistono significativi flussi dall'acquifero vulcanico basale verso quello alluvionale della Valle del Tevere (BAIOCCHI *et alii*, 2006).

Anche se le informazioni sul volume specifico proveniente dalla singola captazione idropotabile sono incomplete e la mappatura del flusso di massa del contaminante non è definibile nel dettaglio, l'attuale gestione delle risorse idriche sotterranee non sembra essere sostenibile. Dovrebbe essere adottato un nuovo approccio per la gestione delle acque sotterranee basato proprio sulla conoscenza della distribuzione dell'arsenico. Come già evidenziato nelle precedenti ricerche (ANGELONE *et alii*, 2009), la natura e la struttura del substrato dell'acquifero vulcanico dovrebbero essere compresi tra i criteri per la localizzazione e le modalità di prelievo delle acque sotterranee, tenendo sempre presente che le aree idrotermali e le zone fagliate delle unità sottostanti l'acquifero vulcanico rappresentano le zone più vulnerabili per il pompaggio di acque potabili.

Il confronto tra la concentrazione di arsenico e distribuzione dei prelievi potabili porta ad alcune considerazioni. Innanzitutto, la distribuzione e la quantità dei prelievi alla scala di sistema idrogeologico dovrebbero essere riconsiderati mediante: a) una dettagliata valutazione della portata delle falde sospese caratterizzate dal più basso contenuto di arsenico; b) un dettagliato piano di prelievo nei settori settentrionali e orientali del sistema. In secondo luogo, per le aree critiche con concentrazioni sopra i 10 $\mu\text{g/L}$, dovrebbe essere sempre verificato che l'effetto del pompaggio sulle componenti orizzontali e verticali del flusso contenga il mescolamento tra circuiti sotterranei superficiali e profondi. In

DISCUSSION

The arsenic concentration in groundwater of the volcanic basal aquifer of the Cimino-Vico system is not homogeneous. The highest values (from 20 to 100 $\mu\text{g/L}$) result in an area elongated in NW-SE direction, whereas values less than 10 $\mu\text{g/L}$ characterize groundwater of the northern and eastern sectors of the basal aquifer (Fig. 4). This distribution of the geogenic contaminant can be explained through the complexity of the hydrostratigraphy and structural setting of the area and the related mixing phenomena occurring between water circulating in the basal volcanic aquifer and the deep-rising fluids that characterize the active hydrothermal system, in agreement with the previous studies (ANGELONE *et alii*, 2009). It can be noticed that the NW-SE strip falls where a strong heat flow anomaly (CALAMAI *et alii*, 1976; CATALDI *et alii*, 1995) or neotectonic and volcano-tectonic structures were recognized (BALDI *et alii* 1974; LA TORRE *et alii*, 1981; BARBERI *et alii*, 1994).

Returning to the subject of the study, present distribution of withdrawal supplying drinking water results heterogeneous as well. The comparison of the two maps of Figures 4 and 5 shows that municipalities with a high p_w are often characterized by high arsenic concentration in tapped water (for example, Civita Castellana Municipality); vice versa, municipalities with a low percentage of withdrawals present lower natural contamination of groundwater. This last condition concerns the eastern sector of the Cimino-Vico system where significant groundwater outflow from the basal volcanic aquifer towards the alluvial aquifer of the Tiber Valley has been found (BAIOCCHI *et alii*, 2006).

Even if information on the specific volume tapped from each source (drinking water springs and wells) are incomplete and no detailed mapping of the mass flux of the tapped contaminant is possible, the present management of groundwater resources does not appear to be sustainable. A new approach to groundwater management should be implemented considering the distribution of arsenic in groundwater. As already specified in the previous research (ANGELONE *et alii*, 2009), the nature and structure of the substratum of the volcanic aquifer must be included among the criteria to identify the location and manner of the groundwater withdrawals. Hydrothermal areas and faulted zones in the units underlying the volcanic aquifer represent the more vulnerable situations for the pumping of drinking water.

Comparing the arsenic concentrations in groundwater and the present location of withdrawal supplying drinking water, some considerations can be done. Firstly, the distribution and the rate of withdrawal at the scale of the hydrogeological system should be reconsidered through: i) a detailed evaluation of the yield of the perched aquifers characterized by the lowest concentrations of arsenic; ii) a detailed plan of groundwater development in the northern and eastern sectors of the system. Secondly, for the critical zones, where arsenic concentration exceeds 10 $\mu\text{g/L}$, it should always be verified that the pumping effects on the horizontal and vertical flow contain

| Activity: New wells | Cost (€) |
|---|----------------|
| Investigation, test and design | 35,000 |
| Well construction | 130,000 |
| Operating and maintenance for the first 3 years | 30,000 |
| <i>TOTAL</i> | <i>195,000</i> |
| Activity: Treatment of the present sources | |
| Treatment plant | 265,000 |
| Operating and maintenance for the first 3 years | 55,000 |
| <i>TOTAL</i> | <i>320,000</i> |

Tab. 5 - Confronto dei costi tra la realizzazione di nuovi pozzi ed il trattamento
- *Economic comparison between the drilling of new wells and the treatment solution*

quest'ultimo caso, possono essere testate nuove tecniche di pompaggio dall'acquifero vulcanico, come: a) pozzi incompleti con portata di pompaggio tale da incrementare l'estensione orizzontale della zona di cattura nella parte più superficiale dell'acquifero (FAYBISHENKO *et alii*, 1995); b) pozzi funzionanti a carico costante che minimizzano l'impatto del pompaggio sulla locale potenzialità dell'acquifero, in quanto il prelievo risulterebbe modulato in base al volume di acqua immagazzinata dall'acquifero (PISCOPO & SUMMA, 2007; COZZOLINO *et alii*, 2010). Queste tecniche potrebbero evitare di stimolare i circuiti idrici sotterranei relativamente più profondi caratterizzati da una più alta concentrazione di arsenico.

Allo scopo di verificare la fattibilità economica di nuovi pozzi incompleti, è stata condotta una valutazione preliminare per una di queste aree critiche. Sono stati valutati i costi per la realizzazione di nuovi pozzi per una portata complessiva di 1.200 m³/giorno considerando gli anzidetti criteri e gli attuali prezzi per il trattamento risorsa e per la realizzazione dei nuovi pozzi. Se si confrontano i costi per i primi tre anni di funzionamento dei nuovi pozzi con una portata complessiva di 1.200 m³/giorno (195.000 €) con quelli di un tradizionale impianto di trattamento (320.000 €), è evidente la convenienza della prima soluzione (Tab. 5).

CONCLUSIONI

Attualmente le risorse idriche sotterranee dell'area vulcanica Cimino-Vicana soddisfano il fabbisogno di circa 170.000 abitanti. Le acque sotterranee sono captate attraverso numerosi pozzi e sorgenti distribuiti in relazione alla vicinanza dell'utenza ed alle portate captabili. Dal confronto tra il contenuto di arsenico nelle acque sotterranee e la distribuzione dei prelievi per uso potabile, l'attuale gestione delle risorse idriche non risulta essere sostenibile; si riscontra infatti un elevato volume di prelievi in aree con contenuto di arsenico superiore a 10 µg/L. È auspicabile adottare un nuovo approccio nella gestione delle risorse idriche al fine di contenere l'impatto sulla salute umana. Dallo studio scaturiscono alcune possibilità alternative e/o integrative al trattamento delle acque naturalmente contaminate.

Il caso analizzato evidenzia che le scelte future per una gestione sostenibile delle acque in un'area naturalmente contaminata sono fortemente condizionate dalla conoscenza dell'ambiente idrogeologico. Risulta anche che un iniziale investimento in ricerche idrogeologiche costituisce una fase necessaria per valutare la tecnologia migliore al fine di assicurare una buona qualità dell'acqua potabile e, allo stesso

the mixing between the relatively shallow and deeper groundwater circuits. In this last case, new tapping techniques for the basal volcanic aquifer can be tested, such as: i) partially penetrating wells with pumping rate that increases the maximum horizontal extent of the capture surface at the top of the aquifer (FAYBISHENKO *et alii*, 1995); ii) well pumping at constant head that minimizes the impact of extraction on the aquifer's local yield, being possible to calibrate the withdrawal on the volume of water stored by the aquifer (PISCOPO & SUMMA, 2007; COZZOLINO *et alii*, 2010). These techniques could avoid stimulating the deeper groundwater circuits characterized by higher arsenic concentrations.

In order to assess the economic feasibility of new partially penetrating wells, a preliminary estimation was carried out in one of these critical areas. The cost of new wells yielding 1,200 m³/day according to the previous criteria was estimated based on the current price for treatment of the present resources and drilling new wells. If the total cost of new wells yielding 1,200 m³/day for the first three years (195,000 €) is compared with a parallel traditional treatment plant (320,000 €), the convenience of the first solution is evident (Tab. 5).

CONCLUSIONS

At present, the groundwater resources of the perched and basal aquifers in the Cimino-Vico volcanic area supply the local demand of drinking water for about 170,000 inhabitants. Groundwater is tapped through numerous wells and springs whose location is based on users proximity and flow rates. Comparing the concentration of arsenic in groundwater with the distribution and rate of the withdrawal supplying drinking water, it results that the present management of groundwater resources does not appear to be sustainable, being higher rate of withdrawal in areas of higher arsenic concentration, exceeding 10 µg/L. A new approach to groundwater management should be implemented to contain the impact on human health. Some alternative and/or integrative possibilities to the treatment of the naturally contaminated groundwater arise from the study.

The case analyzed highlights that the future options for promoting sustainable water management in a naturally contaminated area are strongly conditioned by the knowledge of the hydrogeological environment. It also results that an initially investment in hydrogeological research constitutes a necessary step for choosing the best technology

tempo, limitare a quanto effettivamente necessario i costi.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato svolto con il contributo del PRIN 2008 - prot. 2008YYZKKEE_002. Gli autori ringraziano Talete spa e ATO1 Regione Lazio per i dati chimici e dei prelievi forniti. Gli autori desiderano ringraziare anche Marco Petitta ed un revisore anonimo per gli utili commenti e suggerimenti forniti per la revisione del manoscritto.

OPERE CITATE/REFERENCES

- ACHENE L., FERRETTI E., LUCENTINI L., PETTINE P., VESCHETTI E. & OTTAVIANI M. (2010) - *Arsenic content in drinking-water supplies of an important volcanic aquifer in central Italy*. *Toxicol. Environ. Chemistry*, **92**: 509-520.
- AIUPPA A., D'ALESSANDRO W., FEDERICO C., PALUMBO B. & VALENZA M. (2003) - *The aquatic geochemistry of arsenic in volcanic groundwaters from southern Italy*. *Appl. Geochem.*, **18**: 1283-1296.
- ANGELONE M., CREMISINI C., PISCOPO V., PROPOSITO M. & SPAZIANI F. (2009) - *Influence of hydrostratigraphy and structural setting on the arsenic occurrence in groundwater of the Cimino-Vico volcanic area (Central Italy)*. *Hydrogeol. J.*, **17**: 901-914.
- BAIOCCHI A., DRAGONI W., LOTTI F., LUZZI G. & PISCOPO V. (2006) - *Outline of the hydrogeology of the Cimino and Vico volcanic area and of the interaction between groundwater and Lake Vico (Lazio Region, Central Italy)*. *Boll. Soc. Geol. It.*, **125**: 187-202.
- BALDI P., DECANDIA F.A., LAZZAROTTO A. & CALAMAI A. (1974) - *Studio geologico del substrato della copertura vulcanica laziale nella zona dei laghi di Bolsena, Vico e Bracciano*. *Mem. Soc. Geol. It.*, **13**: 575-606.
- BARBERI F., BUONASORTE G., CIONI R., FIORDELISI A., FORESI L., IACCARINO S., LAURENZI M.A., SBRANA A., VERNIA L. & VILLA I.M. (1994) - *Plio-Pleistocene geological evolution of the geothermal area of Tuscany and Latium*. *Mem. Descr. Carta Geol. It.*, **49**: 77-134.
- BERTAGNINI A. & SBRANA A. (1986) - *Il vulcano di Vico: stratigrafia del complesso vulcanico e sequenze eruttive delle formazioni piroclastiche*. *Mem. Soc. Geol. It.*, **35**: 699-713.
- BONI C., BONO P. & CAPELLI G. (1986) - *Schema idrogeologico dell'Italia centrale*. *Mem. Soc. Geol. It.*, **35**: 991-1012.
- BUONASORTE G., CARBONI M.G. & CONTI M.A. (1991) - *Il substrato plio-pleistocenico delle vulcaniti sabatine: considerazioni stratigrafiche e paleoambientali*. *Boll. Soc. Geol. It.*, **110**: 35-40.
- BUONASORTE G., FIORDELISI A., PANDELI E., ROSSI U. & SOLLEVANTI E. (1987) - *Stratigraphic correlations and structural setting of the pre-neoautochthonous sedimentary sequences of northern Latium*. *Period. Mineral.*, **56**: 111-122.
- CALAMAI A., CATALDI R., LOCARDI E. & PRATURLON A. (1976) - *Distribuzione delle anomalie geotermiche nella fascia pre-appenninica Tosco-Laziale*. *Atti del convegno "Simp. Intern. sobre Energia Geotermica in America Latina"*, Ciudad de Guatemala 16-23 Ottobre.
- CAPELLI G., MAZZA R. & GAZZETTI C. (2005) - *Strumenti e strategie per la tutela e l'uso compatibile della risorsa idrica nel Lazio. Gli acquiferi vulcanici*. Pitagora Editrice, Bologna, 191 pp.
- CATALDI R., MONGELLI F., SQUARCI P., TAFFI L., ZITO G. & CALORE C. (1995) - *Geothermal ranking of Italian territory*. *Geothermics*, **24**: 115-129.
- CHILES J. P. & DELFINER P. (1999) - *Geostatistics and Modelling Spatial Uncertainty*. Wiley-Interscience, USA, 720 pp.
- COZZOLINO M., PISCOPO V., SCARELLI A. & SUMMA G. (2010) - *Analysis of the time series of precipitation and well flow data to determine the sustainable yield of a well pumped at constant head*. *It. J. Eng. Geol. Environ.*, **2**: 41-50.
- CREMISINI C., DALL'AGLIO M. & GHIARA E. (1979) - *Arsenic in Italian rivers and in some cold and thermal spring*. "Proc. of Int. Conference on Management and Control of Heavy Metals in the Environment", Imperial College, London, 341-344.
- CRESSIE N. (1993) - *Statistics for spatial data*. Wiley-Interscience, USA, 900 pp.
- DALL'AGLIO M., GIULIANO G., AMICIZIA D., ANDRENELLI M.C., CICONI G.B., MASTROIANNI D., SEPICACCHI L. & TERSIGNI S. (2001) - *Assessing drinking water quality in Northern Latium by trace elements analysis*. In: CIDU R. (ed.) *Proc. of the 10th Intern Symp on Water-Rock Interaction*, Villasimius, Italy, 1063-1066.
- FAYBISHENKO B., JAVANDEL I. & WITHERSPOON P. (1995) - *Hydrodynamics of the capture zone of a partially penetrating well in a confined aquifer*. *Water Resour. Res.*, **31**: 859-866.
- FUNICIELLO R., LOCARDI E., LOMBARDI G. & PAROTTO M. (1977) - *The main volcanic groups of Latium. Relations between structural evolution and petrogenesis*. *Geologica Romana*, **15**: 279-300.
- LARDINI D. & NAPPI G. (1987) - *I cicli eruttivi del complesso vulcanico cimino*. *Rend. Soc. It. Min. Petr.*, **42**: 141-153.
- LA TORRE P., NANNINI R. & SOLLEVANTI F. (1981) - *Geothermal exploration in central Italy: geophysical survey in Cimino Range area*. In: *European Association of Exploration Geophysicists, 43th Meeting*. Venezia, 26-29 May 1981.
- LOCARDI E. (1965) - *Tipi di ignimbrite di magmi mediterranei. Le ignimbriti del vulcano di Vico*. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat.*, **72**: 53-173.
- MATHERON G. (1963) - *Principles of geostatistics*. *Economic Geol.*, **58**: 1246-1266.
- MATTIAS P.P. & VENTRIGLIA V. (1970) - *La regione vulcanica dei Monti Cimini e Sabatini*. *Mem. Soc. Geol. It.*, **9**: 331-384.

to ensure safe drinking water quality with cost-effective feedbacks.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was carried out with a contribution under PRIN 2008 - prot. 2008YYZKKEE_002. The authors acknowledge Talete spa and ATO1 Regione Lazio for providing chemical and withdrawal data. Special thanks go to Marco Petitta and an anonymous reviewer for their useful comments and suggestions.

**CAPTAZIONE SOSTENIBILE DELLE ACQUE SOTTERRANEE IN UN ACQUIFERO NATURALMENTE CONTAMINATO DA ARSENICO:
IL CASO DELL'AREA VULCANICA DEL CIMINO-VICO (ITALIA CENTRALE)**

- PISCOPO V., BARBIERI M., MONETTI V., PAGANO G., PISTONI S., RUGGI E. & STANZIONE D. (2006) - *Hydrogeology of thermal waters in Viterbo area, central Italy*. Hydrogeol. J., **14**: 1508-1521.
- PISCOPO V. & SUMMA G. (2007) - *Experiment of pumping at constant-head: an alternative possibility to the sustainable yield of a well*. Hydrogeol. J., **15**: 679-687.
- SOLLEVANTI F. (1983) - *Geologic, volcanologic and tectonic setting of the Vico-Cimino area, Italy*. J. Volc. Geoth. Res., **17**: 203-217.
- VIVONA R., PREZIOSI E., MADÉ B. & GIULIANO G. (2007) - *Occurrence of minor toxic elements in volcanic-sedimentary aquifers: a case study in central Italy*. Hydrogeol. J., **15**: 1183-1196.

Received September 2012 - Accepted January 2013