



SCUOLA DOTTORALE IN GEOLOGIA DELL'AMBIENTE E
DELLE RISORSE

XXVI CICLO

**FLUID GEOCHEMISTRY AND NATURAL GAS HAZARD IN
THE URBAN AREA OF ROME**

Dottorando: Luca Pizzino

Docente Guida/Tutor: Prof.ssa Paola Tuccimei

Coordinatore: Prof. Claudio Faccenna

Referees:

Dott. Giancarlo Ciotoli

Dott. Angelo Achille Minissale

Indice

Introduzione e scopo del lavoro	1
Abstract	6
1. Inquadramento geologico	10
1.1 <i>Evoluzione paleogeografica e geologica dell'area romana</i>	10
1.2 <i>Tettonica superficiale plio-pleistocenica</i>	19
1.3 <i>Tettonica profonda: gravimetria nell'area romana</i>	22
2. Idrogeologia nella città di Roma: stato dell'arte	31
2.2 <i>Le unità idrogeologiche del territorio romano</i>	33
2.2.1 <i>Unità idrogeologica dei Monti Sabatini</i>	34
2.2.2 <i>Unità idrogeologica dei Colli Albani</i>	37
2.2.3 <i>Unità idrogeologica di Ponte Galeria</i>	38
2.2.4 <i>Unità idrogeologica dei depositi alluvionali recenti e attuali</i>	39
2.2.5 <i>Unità idrogeologica del delta del fiume Tevere</i>	39
2.3 <i>Complessi Idrogeologici</i>	40
2.3.1 <i>Complesso delle argille di Monte Vaticano</i>	40
2.3.2 <i>Complesso delle argille sabbiose, limi sabbiosi e sabbie</i>	40
2.3.3 <i>Complesso delle sabbie grossolane delle formazioni di M. Mario e di P. Galeria</i>	41
2.3.4 <i>Complesso delle argille sabbiose, relative alle formazioni di Monte delle Piche e di Ponte Galeria</i>	42
2.3.5 <i>Complesso delle ghiaie e delle sabbie relative alla formazione di Ponte Galeria</i>	42
2.3.6 <i>Complesso della successione di ghiaie e clasti calcarei e silicei della formazione del Fosso della Crescenza</i>	42
2.3.7 <i>Complesso fluvio palustre di S. Cecilia</i>	42
2.3.8 <i>Complesso dei Tufi Pisolitici</i>	43
2.3.9 <i>Complesso Vulcanico Sabatino</i>	43

2.3.10	<i>Complesso della formazione di Valle Giulia</i>	43
2.3.11	<i>Complesso delle Pozzolane Rosse e delle Pozzolane Nere</i>	43
2.3.12	<i>Complesso della formazione del Fosso del Torrino</i>	44
2.3.13	<i>Complesso del Tufo Lionato</i>	44
2.3.14	<i>Complesso delle Pozzolanelle</i>	44
2.3.15	<i>Complesso della formazione Aurelia</i>	44
2.3.16	<i>Complesso delle lave</i>	45
2.3.17	<i>Complesso delle ghiaie e sabbie della formazione di Vitinia e dell'unità di Saccopastore</i>	45
2.3.18	<i>Complesso del Peperino di Albano, dell'unità di Valle Marciana e della formazione del Tavolato</i>	45
2.3.19	<i>Complesso dei depositi lacustri e delle alluvioni oloceniche</i>	46
2.3.20	<i>Complesso dei depositi antropici olocenici</i>	46
2.3.21	<i>Complesso dei depositi di discarica di cava</i>	46
3.	<i>Geochimica dei fluidi nell'area romana: stato dell'arte</i>	47
3.1	<i>Studi pregressi</i>	47
3.2	<i>Natural Gas Hazard: definizione e studi pregressi nel Lazio</i>	58
4.	<i>Metodi</i>	66
4.1	<i>Metodologie di campionamento e analisi delle acque</i>	66
5.	<i>Risultati e discussione dei dati</i>	70
5.1	<i>Lavoro svolto e presentazione dei dati</i>	70
5.2	<i>Analisi statistica: la Factor Analysis</i>	71
5.3	<i>Classificazione delle acque in facies idrochimiche e processi di interazione acqua-roccia: elementi maggiori</i>	85
5.4	<i>Processi di interazione acqua-roccia: parametri chimico-fisici, elementi maggiori e in traccia</i>	94

<i>5.5 Processi di interazione acqua-roccia: isotopi di Sr e H</i>	105
<i>5.6 Distribuzione e origine della CO2 nelle acque di sottosuolo</i>	110
<i>5.7 Origine dell'elio nelle acque di sottosuolo</i>	119
<i>5.8 Origine e distribuzione del radon nelle acque di sottosuolo</i>	124
<i>5.9 Modelli concettuali della circolazione delle acque di sottosuolo e origine dei gas disciolti</i>	129
<i>5.10 Prime valutazioni sul Natural Gas Hazard nell'area urbana di Roma</i>	133
6. Conclusioni	135
Bibliografia	143

Introduzione e scopo del lavoro

Ampi settori dell'Italia centrale sono interessati da fenomeni vulcanici, legati alla evoluzione geodinamica della penisola italiana, allorché una fase significativa di tettonica distensiva fu responsabile dell'evoluzione post-orogena della fascia tirrenica dell'Appennino, determinando l'assottigliamento crostale sviluppatosi tra il tardo Tortoniano e il Pliocene. Essa cominciò a formare graben orientati in direzione NW-SE, il Siena-Radicofani e il Paglia-Tevere, bordati a oriente da faglie listriche immergenti verso ovest (Cavinato et al., 1994). Nell'intersezione tra i graben e le faglie trasversali di trasferimento si impostarono nel Plio-Pleistocene i più importanti sistemi vulcanici della catena appenninica, si sviluppò, a causa della riduzione dello spessore della litosfera che favorì la risalita di ingenti quantità di magma (Pleistocene medio), un'estesa attività vulcanica; essa è ancora attiva nell'area vesuviana (Vesuvio, Campi Flegrei, Ischia) (Parotto & Praturlon, 1975; Acocella & Funiciello, 2006). Tale vulcanismo si è impostato su una fascia strutturalmente depressa dalla regione del Lago di Bolsena fino alla Campania, parallela alla costa tirrenica e compresa tra il settore più elevato della catena appenninica e la zona costiera posta al margine del bacino del Tirreno. Esso ha dato luogo nel Quaternario ad ampie coperture costituite da prodotti di questa attività fortemente alcalino-potassica che sono stati associati da Washington (1906) in una provincia comagmatica, denominata Provincia Comagmatica Romana (da ora in poi indicata come PCR). La PCR è caratterizzata da numerosi distretti con evoluzione vulcanologica-strutturale varia, a prevalente attività esplosiva subaerea. Vi sono presenti sia grandi apparati centrali (Somma-Vesuvio, Roccamonfina, Colli Albani, Distretti Vulcanici Cimino-Vicano e Sabatino), sia zone di vulcanismo areale (Campi Flegrei, Distretto Vulcanico Vulsino), sia strutture calderiche (Latera, Somma, Roccamonfina), sia veri e propri sprofondamenti vulcano-tettonici (depressioni dei Laghi di Bracciano e di Bolsena).

I distretti vulcanici della PCR, considerati quiescenti o del tutto estinti (Colli Albani, Sabatini, Vulsini, Roccamonfina) sono caratterizzati da una serie di manifestazioni vulcaniche definite "secondarie" o di fase di *unrest* (Chiarabba et al., 1997) quali sismicità di medio-bassa energia a prevalente carattere di sciame (De Panfilis, 1969; Console & Sonaglia 1972; Amato et al., 1994; Feuillet et al., 2004), deformazioni del terreno (Amato & Chiarabba, 1995; Selvaggi & Caracciolo, 1998; Salvi et al., 2004; Riguzzi et al., 2009) e degassamento anomalo sia dai suoli che dagli acquiferi. Tale degassamento può essere sia di origine naturale (Chiodini et al., 1995; Chiodini & Frondini, 2001; Pizzino et al., 2002; Annunziatellis et al., 2003; Beaubien et al., 2003; Carapezza et al., 2003; Minissale, 2004; Barberi et al., 2007; Annunziatellis et al., 2008;

Mariucci et al., 2008; Frondini et al., 2008; Cinti et al., 2011; Cinti et al., 2014; Bigi et al., 2014) sia causato da attività antropiche quali scavi e/o approfondimento di pozzi già esistenti come accaduto in passato nei Colli Albani (Pizzino et al., 2002; Carapezza & Tarchini, 2007) e più di recente nell'area di Fiumicino (Barberi et al., 2007; Ciotoli et al., 2013; Sella et al., 2014). In genere, le aree a degassamento più intenso sono ubicate in corrispondenza: *i*) dei massimi gravimetrici, ipotizzati come espressione degli alti strutturali del substrato carbonatico profondo, e delle faglie che li delimitano; *ii*) delle più importanti faglie regionali, dove sistemi di faglia a differente orientazione si incontrano e *iii*) di aree caratterizzate da un anomalo flusso di calore. Queste particolari condizioni geologiche, nonché la presenza di estesi sistemi di fratture, possono favorire l'instaurarsi di settori ad alta permeabilità attraverso i quali i gas profondi sono veicolati verso la superficie, disciogliendosi negli acquiferi e/o permeando i pori dei suoli. In particolare, studi dettagliati sulle acque di sottosuolo (Chiodini & Frondini, 2001; Pizzino et al., 2002; Cinti et al., 2011; Cinti et al., 2014) hanno messo in evidenza come nel settore tirrenico dell'Italia centrale la CO₂ (il gas dominante nelle manifestazioni gassose in quest'area) possa essere considerata come un ottimo *marker* tettonico, in quanto la sua distribuzione risente fortemente dell'assetto strutturale profondo delle aree investigate.

Le ricerche effettuate negli ultimi anni in particolari settori della PCR (Colli Albani, Sabatini-Tolfa-Bracciano) hanno permesso di ottenere modelli atti a definire le modalità di risalita dei gas determinandone, nel contempo, la loro origine. I gas principali emessi dalle più note manifestazioni della PCR sono dominati dall'anidride carbonica (fino al 98% in volume), con contenuti largamente inferiori di radon, metano, azoto, elio e ossigeno; talvolta, è stata riscontrata anche la presenza di idrogeno solforato. La caratterizzazione isotopica dei gas emessi ($\delta^{13}\text{C}$ della CO₂ e del CH₄, $^3\text{He}/^4\text{He}$, δD del CH₄ e $\delta^{34}\text{S}$ del H₂S) fornisce indicazioni più o meno univoche circa la loro origine profonda (crosta e/o mantello), in ambienti di alta temperatura (> 100°C); solo il radon può avere anche un'origine superficiale, essendo un prodotto del decadimento di elementi radiogenici come U, Th e Ra arricchiti nelle litologie vulcaniche che affiorano nell'area o che ne costituiscono la geologia più superficiale.

Nelle aree ad alta densità abitativa, gas quali CO₂, H₂S e radon possono penetrare all'interno delle abitazioni e, essendo più pesanti dell'aria, possono costituire un potenziale pericolo per la popolazione residente. Tale fenomeno è noto in letteratura come *Natural Gas Hazard*; esso si può verificare principalmente in particolari condizioni, luoghi e stagioni (interrati, cantine, locali poco ventilati, presenza di terreni con estese fratture di trazione come avviene generalmente d'estate, presenza di impianti di riscaldamento durante il semestre invernale con la creazione del così detto effetto camino, ecc). Le situazioni di potenziale pericolo

derivano dalla tossicità di alcune specie gassose come CO₂ e H₂S, e dall'accertata carcinogenicità del radon, una volta superato un determinato livello di concentrazione all'interno di abitazioni e luoghi di lavoro (i.e. *indoor*). Occorre distinguere tra *Short Term Effect* (anidride carbonica e idrogeno solforato) e *Long Term Effect* (radon); infatti, i primi due gas (per concentrazioni *indoor*, rispettivamente, > 3% in volume e 100 ppm) possono avere effetti immediati sugli esseri viventi (dall'aumento del battito cardiaco fino alla morte per asfissia, come risulta da www.ivhhn.org/gas/guidelines.htm), mentre per il radon gli effetti nocivi (cancro alle vie respiratorie) sono riscontrabili solo a lungo termine. Uno studio il più possibile dettagliato della distribuzione di questi gas sia nelle acque di sottosuolo e superficiali che nei gas del suolo, è stato effettuato esclusivamente nei complessi vulcanici situati a nord (Sabatini) e a sud (Colli Albani) di Roma (Pizzino et al., 2002; Annunziatellis et al., 2003; Beaubien et al., 2003; Carapezza et al., 2003; Barberi et al., 2007; Frondini et al., 2008; Cinti et al., 2011; Cinti et al., 2013; Cinti et al., 2014); tali ricerche hanno fornito indicazioni sul degassamento in atto e sono risultate di notevole aiuto nella identificazione e delimitazione delle aree caratterizzate da potenziali alti livelli di *Natural Gas Hazard*. L'applicazione di tale tipo di indagine potrebbe risultare particolarmente interessante nell'area urbana di Roma, in quanto poco o niente si conosce, ad esempio, delle caratteristiche chimiche delle acque di sottosuolo della capitale. Infatti, i pochi dati a disposizione sono estremamente frammentari e largamente incompleti (Camponeschi & Nolasco, 1982; Ventriglia, 1971, 1990 e 2002; Vivona, 2001; Lanzarone, 2003; Corazza & Lombardi, 2005; Barberi et al., 2008; Capelli et al., 2008; La Vigna et al., 2008; De Simone, 2012; Bersani et al., 2013), e non hanno permesso, nella maggior parte dei casi, né la classificazione geochimica delle acque circolanti né fornito spiegazioni approfondite ed esaurienti circa l'elevato contenuto salino e gassoso di alcune di esse. Spesso, inoltre, i dati ottenuti non si riferiscono a tutto il territorio comunale, ma a settori molto circoscritti di esso. Probabilmente, l'incrementata urbanizzazione della città negli ultimi decenni ha ostacolato in maniera significativa il reperimento dei punti di campionamento, causando l'attuale dispersione e/o mancanza dei dati. È opportuno ricordare che il territorio comunale di Roma presenta degli indizi particolarmente "stimolanti" dal punto di vista geochimico quali:

- i)* la presenza di sorgenti mineralizzate ricche in CO₂, alcune delle quali sede di stabilimenti di imbottigliamento di acque minerali (per le analisi chimiche si veda www.acqua2o.it), ubicati in maniera diffusa nell'area meridionale della città, e più sporadicamente nel suo settore centro-settentrionale;
- ii)* episodi di degassamento improvviso dal suolo e/o rinvenimento di acque calde in occasione di scavi per pozzi di acqua e/o sondaggi esplorativi

(Novarese, 1926; Camponeschi & Nolasco, 1982; Bersani et al., 2013), nonché la presenza (prima dell'avvento dell'urbanizzazione) di manifestazioni gassose permanenti (soprattutto CO₂, ma a volte anche CH₄) come il caso di Via dell'Acqua Bullicante (Camponeschi & Nolasco, 1982);

- iii)* *iii)* il ritrovamento, in sondaggi profondi in vari settori di Roma e in affioramento nel suo settore sud-occidentale (Torrino) e centro-settentrionale (Parioli, Valle Giulia, Piazza del Popolo, Via del Corso), di numerose ed estese bancate di travertino che si sono formate essenzialmente per la venuta a giorno di acque calde ricche in CO₂;
- iv)* *iv)* l'evidenza storica della presenza di luoghi sacri caratterizzati da emissioni gassose, testimonianza provata che un tempo esistevano aree dove erano ubicate sorgenti naturali dotate di particolari proprietà curative, oggi occultate dal disordinato e imponente sviluppo urbanistico dell'area urbana (si veda Bersani et al., 2013 e referenze interne).

Gli indizi geochimici sopra riportati sono tutti a favore dell'ipotesi che anche nel territorio urbano di Roma possano esistere settori potenzialmente esposti al *Natural Gas Hazard*. A questo scenario, già di per sé interessante e scientificamente molto "attraente", si aggiunge la recente individuazione di nuovi sistemi di faglie e di fratture sia superficiali che profonde del sottosuolo romano, prima sconosciute (Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia, volume "La geologia di Roma dal centro storico alla periferia", 2008). Si ritiene opportuno ricordare che le faglie e le fratture costituiscono le vie principali per la risalita dei fluidi profondi verso la superficie dove possono disciogliersi negli acquiferi e/o permeare i pori del suolo. Negli ultimi anni, oltre a quelli riguardanti l'assetto geologico e stratigrafico di Roma, sono stati condotti numerosi studi aventi come obiettivo la conoscenza della mineralogia dei suoli, dell'idrogeologia, della gravimetria e dell'assetto strutturale, sia superficiale che profondo; tali ricerche sono riunite nelle Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia, volume "La geologia di Roma dal centro storico alla periferia" del 2008, che verranno prese come principale riferimento nel prosieguo della presente tesi.

Gli obiettivi principali del presente lavoro sono: *i)* la caratterizzazione geochimica delle acque di sottosuolo e l'individuazione dei principali processi di interazione gas-acqua-roccia anche tramite l'utilizzo di isotopi stabili (C, Sr) e radioattivi (H); *ii)* la distribuzione della CO₂ e del radon nelle falde acquifere; *iii)* lo studio delle relazioni esistenti tra strutture profonde e superficiali e le caratteristiche geochimiche delle acque di sottosuolo; *iv)* l'identificazione di aree

anomale caratterizzate da risalite di fluidi profondi per una valutazione preliminare del livello di *Natural Gas Hazard*.

Alla luce di quanto finora esposto, nel presente studio si propone un approccio metodologico già utilizzato sia in Italia che all'estero (Pizzino & Quattrocchi, 1999; Vivona 2001, Pizzino et al., 2002; Pizzino et al., 2004a, Pizzino et al., 2004b; Maluccio, 2008; Cinti et al., 2011; Cinti et al., 2013), che è stato sviluppato attraverso lo studio il più possibile dettagliato (dal punto di vista della densità di campionamento) e completo (dal punto di vista analitico) delle caratteristiche chimiche e isotopiche delle acque di sottosuolo emergenti entro il Grande Raccordo Anulare (da ora in poi G.R.A) e nei settori immediatamente adiacenti.

Abstract

The city of Rome is located in the Roman Comagmatic Province, where large sectors experience a huge degassing both from soils and aquifers; gas composition is dominated by CO₂, that can act as a carrier for other minor components such as N₂, CH₄, H₂S and radon. Gases are produced at depth (throughout mantle degassing and/or decarbonation processes) and upraise towards surface through fault and fracture systems, thus characterising well defined enhanced permeability belts. Rising CO₂ partly dissolves in shallow aquifers, pressurizing them when they are confined. Dangerous blowouts occur, even in urbanized areas, when these pressurized aquifers are reached by wells or excavations, at depths ranging from 350 to 10-15 m. Several human-triggered gas accidents occurred near Rome (Alban Hills volcano, Fiumicino) in the past ten years, creating a big concern for the local population; as a consequence, an evaluation of the level of Natural Gas Hazard (onwards NGH) to which these areas are exposed, with particular attention to urban areas, has to be done. Moreover, gases exhaled from soils and aquifers can enter houses, potentially reaching harmful indoor levels. Indeed, some gases (CO₂, H₂S) can have a short-term toxicity, while others (i.e. radon) can cause lung cancer at prolonged exposures.

A first step to evaluate the NGH level is the identification of actively degassing areas; among other geochemical methods, this target can be achieved through the detailed knowledge of the distribution of dangerous gases in groundwater. By now, detailed information on CO₂ and radon distribution in ground waters was assessed for the volcanic complexes around Rome and, partly, for the Fiumicino area. The study performed in groundwater could allow to discriminate areas where: *i*) analysis of indoor-gas levels has to be carried out and deepened, in order to lessen their impact on human health and *ii*) particular care has to be done in drilling new wells and or performing anthropic activities that could cause dangerous gas eruptions. Such a methodological approach is used to evaluate a possible NGH for the urban territory of the Italian capital, where about 2500000 people habitually live.

In order to achieve the so far presented goals, the present research was aimed at performing an extensive study of both chemical and isotopic features of the groundwater circulating in the urban area of Rome. The main objectives were: *i*) the chemical classification of waters, also to determine their quality, and the definition of the main water-rock interaction processes; *ii*) to assess dissolved CO₂ and radon distribution in groundwater, as well as isotopic characterization of total carbon (i.e. carbon dioxide) to determine its origin; *iii*) the comparison between the gas distribution and both lithological and structural setting of the investigated area

and *iv*) a first evaluation of the Natural Gas Hazard potentially affecting a very populated area. These targets have been reached by considering specific isotopic analysis (He, ^3H , Sr) done on selected samples as a support for the identification of the main water-rock interaction processes (^3H , Sr) and the assessment the origin of the dissolved gases (i.e. He); all acquired data have been used to draw a final model of both shallow and deep groundwater circulations in the frame of the tectonic setting of the investigated area.

Groundwater (192 samples) has been analysed for its chemical composition (major elements) and two main hydro-chemical *facies* have been recognised, each characterised by a different gas-water-rock interaction processes. Statistical approach allowed to divide waters into two main groups, referred to the lithological domains existing in the roman territory: volcanic (K-rich minerals) and sedimentary (alluvial, marls, clays). TDQ stands for *Tor di Quinto*, the third group of waters having chemical features completely different from the other ones and, consequently, considered as a separate entity.

The dominant hydro-chemical *facies* is the bicarbonate-alkaline earth, with an evident differentiation of chemical components between the volcanic and sedimentary waters. The former show a general enrichment in alkali (Na and K) and high alkalinity, while the latter show a quite constant (Na+K/Ca+Mg) ratio and deeply different bicarbonate content and high (Cl + SO₄)/HCO₃. Water interaction with alkali-rich volcanites of the roman area fully justify the observed distribution, while CO₂ dissolution accounts for high alkalinity. On the contrary, waters circulating in sedimentary layers become enriched in SO₄ and Cl, moving towards the Ca-SO₄ (Cl) quadrant. Some waters have a bicarbonate-alkaline chemistry, typical of prolonged interaction of CO₂-rich waters with volcanic rocks (with reaction such as: $2\text{K}(\text{Na})\text{AlSi}_2\text{O}_6 + 2\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{K}(\text{Na})^+ + 2\text{HCO}_3^- + 2\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), and possible cationic exchange with clays that cause the drop in the Ca + Mg content. The importance of discriminating the Na abundance with respect to K has a special meaning in the roman groundwater due to the particular K-rich minerals contained in the volcanic rocks. Indeed, the volcanic waters have an average Na/K = 2, very similar to the *Albani* and *Sabatini* rock compositions, while the sedimentary ones show Na/K = 20 due to interaction with sands, marls and clays. These distribution fully justify the different evolution of these waters due to different types and extent of gas-water-rock interaction processes. TDQ waters show a large range in the Na/K ratio, with bicarbonate-alkaline earth samples having a particularly low Na/K, very similar to the volcanic waters.

Dissolved CO₂ plays an important role in defining the chemical evolution of groundwater. A general positive correlation between log PCO₂ and salinity is observed. It is

especially important for the CO₂-rich waters belonging to the volcanic domain (south-eastern sector of Rome) that, apart few exceptions, have moderate saline content due to both the low solubility of silicate minerals and their low dissolution rate, even in acidic environment. Yet, CO₂ increases the aggressiveness of the groundwater on the aquifer-hosting rocks, allowing the transfer of chemical elements into the solution. It is worthy of note the elevated log PCO₂ and salinity of the TDQ waters.

By taking K as representative of the vulcanite compositions, the degree of the water-rock-interaction can be evaluated. Volcanic waters are enriched in the main constituent of the mineral-forming rocks, either major, minor (SiO₂, Sr) and trace (Ba, Rb). Same trend is observed in the sedimentary waters for Cl, Na and SO₄ (interaction with clays and marls). Both TDQ and some volcanic waters with high salinity circulating in the southern sector of Rome probably represent a diluted and/or a mixed term of geothermal aquifers hosted in the deep carbonate platform. The B/Cl ratio, the strontium isotopes and the tritium content of these waters fully support our inference.

CO₂ distribution in groundwater, expressed as log PCO₂, emphasised the presence of five sectors actively degassing in Rome: *Cassia, Salaria, Tor di Quinto-Flaminio-Saxa Rubra* in the north and *Eur-Torrino* and *Appio-Tuscolano-Capannelle* in the south. CO₂ isotopic characterisation of these waters point out an inorganic (i.e deep) provenance of carbon dioxide, as recognised in the natural gas manifestations of Central Italy. Conversely, CO₂-poor waters have an isotopic signature highlighting an organic (i.e. shallow) provenance of CO₂.

Radon-rich waters only partially mimic the CO₂ distribution, mainly reflecting the outcrops of U and Ra-rich vulcanites; they have been recognised in the southern-eastern (*Appio-Tuscolano-Ardeatino*) and eastern (*Centocelle, Colli Aniene*) sectors of Rome, where thick Alban Hills volcanic products largely outcrop. In the former huge sector, additional radon, beyond that produced by volcanic rocks, could be carried out toward surface by CO₂. The other roman aquifers are hosted in the sedimentary layers, where a scarce presence of radon precursors have been found; as a consequence, average radon activity is low.

Summarising, four CO₂ and one huge radon (and partly CO₂) degassing areas have been recognised in the urban area of Rome. CO₂ is produced both in the mantle and in the structural highs (through decarbonation process) of the carbonate platform beneath Rome (*Tor di Quinto, Eur-Torrino and Appio-Tuscolano-Capannelle*), upraise through faults and fractures, dissolving into shallow aquifers. In particular, the role of deep CO₂ as a sound marker of deep tectonic structures in this sector of central Italy, was emphasised. He isotopes were used to evaluate the mantle contribution: values span from 24 to 50% in CO₂-rich waters, emphasising the existence

of deep-rooted faults beneath the city of Rome; they have the role of tectonic-derived pathways for deep-originated fluids.

Radon distribution is mainly controlled by the lithological setting of the investigated area. Indeed, high-activity radon waters circulate into the U and Ra-rich volcanites of the Alban Hills (south-eastern and eastern sectors), and only locally they receive an additional contribute from the huge flux of deep CO₂, acting as carrier gas for radon.

This research is only the first step for the evaluation of the NGH in Rome. In the actively degassing areas a detailed soil-gas survey is highly recommended in order to measure and quantify how much gas, dissolved in the shallow aquifers, can reach and permeate soils, where houses and dwellings are built. Quick exploratory surveys to determine the CO₂ and radon indoor levels in the individuated NGH-prone areas must be promoted by local authorities, mainly in the most populated sectors, where the presence of gas in soil and/or indoor could represent a very big concern.

1. Inquadramento Geologico

1.1 Evoluzione paleogeografica e geologica dell'area romana

Per conoscere la storia geologica dell'area romana si deve risalire ad almeno 200 milioni di anni fa, quando sul fondo dell'oceano chiamato Tetide si depositarono i sedimenti da cui si sono poi formate le rocce che oggi costituiscono l'Appennino centrale: sedimenti di piattaforma carbonatica (simile alle attuali Bahamas) che passavano, lungo pendii sottomarini più o meno accentuati, a depositi di mare più profondo.

Nell'ambito dei complessi processi della tettonica delle placche, circa 30-35 milioni di anni fa iniziò in queste aree il processo di convergenza delle placche europea ed africana, con la conseguente deformazione dei rispettivi margini: i depositi marini furono sollevati e sovrapposti, dando origine alla catena montuosa degli Appennini.

Intorno a 5 milioni di anni fa, il settore occidentale della neonata catena appenninica iniziava ad assottigliarsi e a sprofondare, mentre andava formandosi il Mar Tirreno. Il mare lambiva i Monti Sabini-Lucetili e Tiburtini (**figura 1.1**): l'antica linea di costa è oggi riconoscibile in più punti, nelle fasce di calcari con fori di litodomi che affiorano tra Palombara Sabina, Moricone e Fara in Sabina. Dal mare emergevano alcune isole, che oggi corrispondono al M. Soratte e ai Monti Cornicolani (altre si trovavano più a Nord, come i Monti della Tolfa, e più a Sud, come l'attuale promontorio del M. Circeo). Quelle isole erano le cime più elevate di dorsali montuose del tutto simili, per struttura e per litologia, a quelle del vicino Appennino. Il substrato su cui il mare avanzava era, quindi, molto articolato e i depositi marini pliocenici hanno perciò spessori molto diversi. I pochi sondaggi profondi effettuati in varie occasioni indicano che la loro base è tra -350 m e -400 m a nord di Roma, a -300 verso Sud (-450 m a Fogliano), e a circa -900 m sotto la città (sondaggio Circo Massimo, realizzato nel 1939 in occasione della "Mostra autarchica del Minerale"), **figura 1.2**. I dati sulla profondità del mare (che si approfondiva verso ovest) sono molto pochi, per la scarsità di affioramenti, soprattutto delle parti più antiche, ma sembra molto probabile che la sedimentazione sia stata condizionata anche da una tettonica attiva. I sedimenti marini non appartengono a un unico ciclo; la parte inferiore, con gli spessori maggiori, è costituita dalle ben note "Argille azzurre *Auctt.*", riferibili al Pliocene inferiore e superiore. Affiorano a Roma (M. Mario), fino a 110 m s.l.m., ma sono ribassate per faglia di oltre 80 m, sia a nord che a sud. Costituiscono la *formazione di M. Vaticano*.

Al di sopra delle argille azzurre segue una successione di argille sabbiose, limi sabbiosi e sabbie grigie, con ricche faune a molluschi (tra cui l'ospite freddo *Arctica islandica*), che costituiscono la *formazione di M. Mario*. Questi sedimenti si sono depositi in acque poco profonde (qualche decina di metri nei Monti della Farnesina), in facies da infralitorale a transizione, mentre le argille azzurre sono di facies batiale (almeno qualche centinaia di metri); l'età è Pleistocene inferiore.

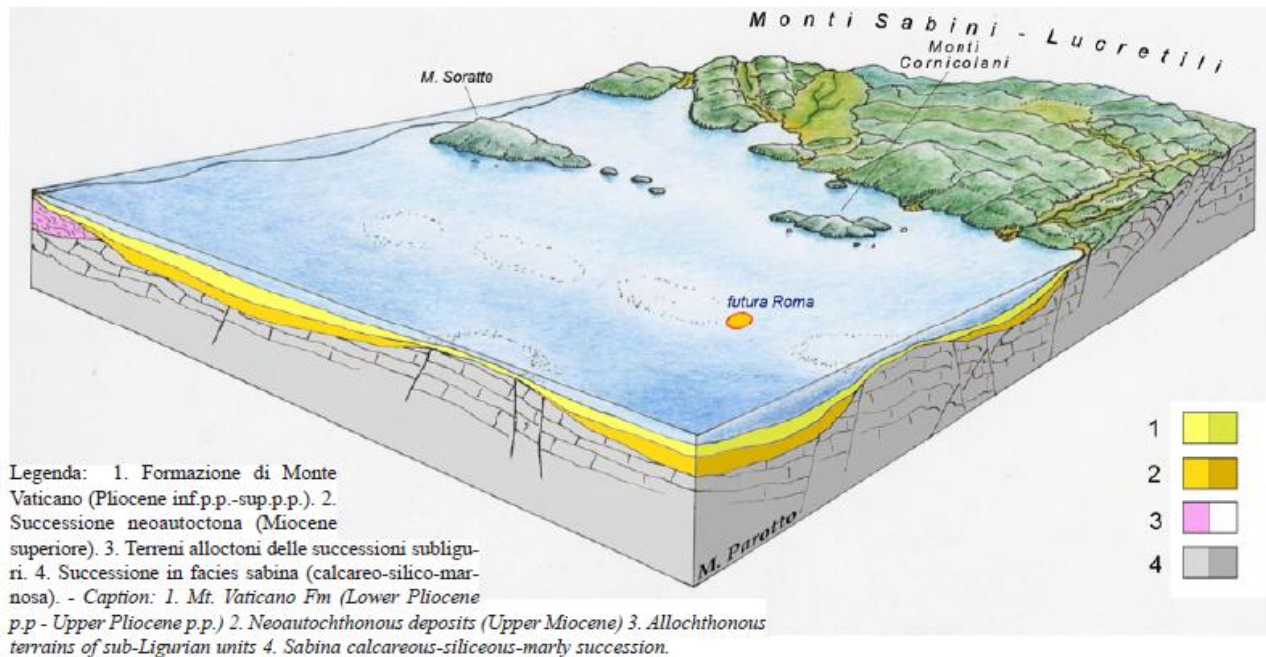


Figura 1.1. Ricostruzione dell'area Romana circa 5 milioni di anni fa. (Parotto, 2008).

Tutti questi elementi indicano che tra la fine del Pliocene e la parte basale del Pleistocene si è verificato un sollevamento dell'area allungato in direzione prossima a NW-SE, con conseguente diffusa erosione, seguita da una trasgressione che ha riportato il mare su tutta l'area, ma con profondità molto minori, che hanno favorito l'impostarsi di facies di transizione. Il sollevamento ha prodotto nella formazione di M. Vaticano una serie di faglie con modesto rigetto, suturate dai sedimenti della formazione di M. Mario. I segni di una instabilità tettonica continuano nel tempo: verso ovest, infatti, si trovano facies di mare aperto di età successiva (le argille della *formazione di M. delle Piche*), ribassate di oltre 200 metri rispetto alle sabbie ad *Arctica islandica* di M. Mario; la dislocazione sarebbe attribuibile a una faglia distensiva a direzione NW-SE, localizzata probabilmente lungo il Fosso della Magliana.

La fase successiva dell'evoluzione comprende l'intervallo di tempo in cui, esaurito il ciclo marino, si diffondono ovunque ambienti continentali, derivanti essenzialmente dal modellamento fluviale, fortemente "ritmato" da complesse vicende eustatiche. Il passaggio a diffusi ambienti

subaerei è avvenuto, però, attraverso più eventi. Un sollevamento del margine appenninico (probabilmente per riequilibrio isostatico, quindi a livello regionale, con movimento lento ed esteso nel tempo) provocò il graduale ritiro del mare verso ovest. La superficie che emergeva veniva progressivamente modellata dall'attività fluviale, ad opera soprattutto del Paleotevere e dei suoi affluenti, e per il successivo accumulo di grandi volumi di sedimenti alluvionali. Il Paleotevere allungò il suo corso scendendo verso sud, aggirando a NW il M. Soratte, e cominciò a costruire un vasto delta, con clasti la cui natura indica che era in atto la demolizione erosiva delle successioni meso-cenozoiche in facies umbro-marchigiana e sabina.

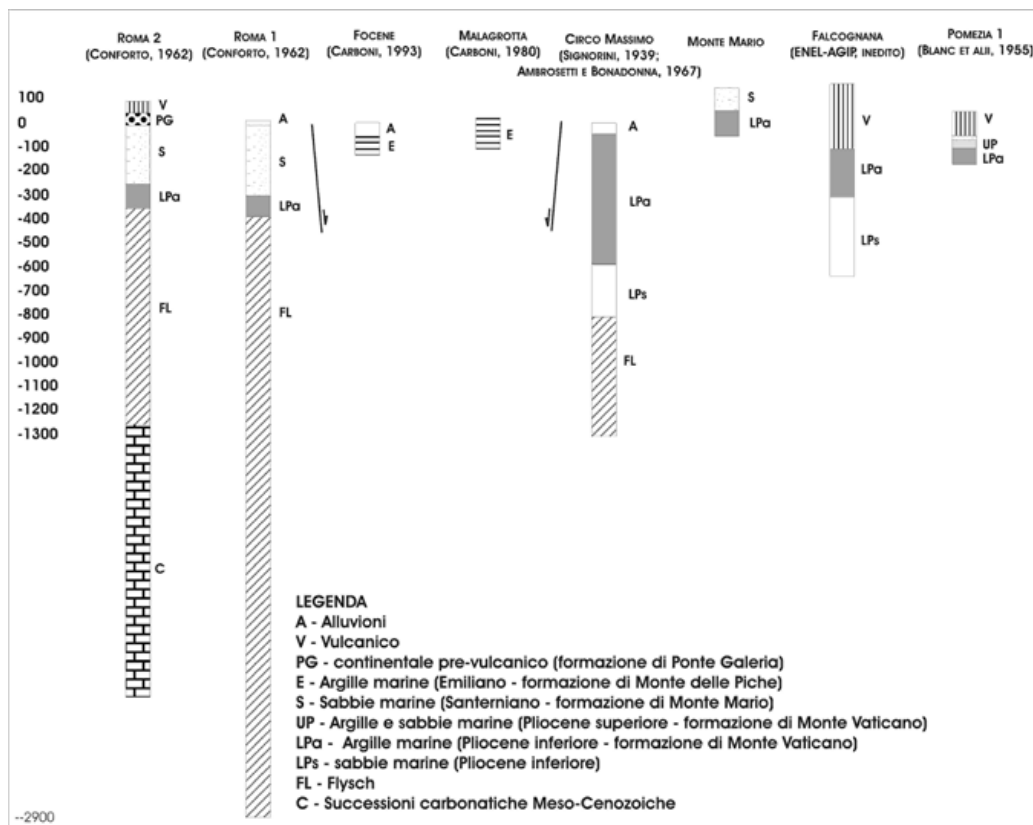
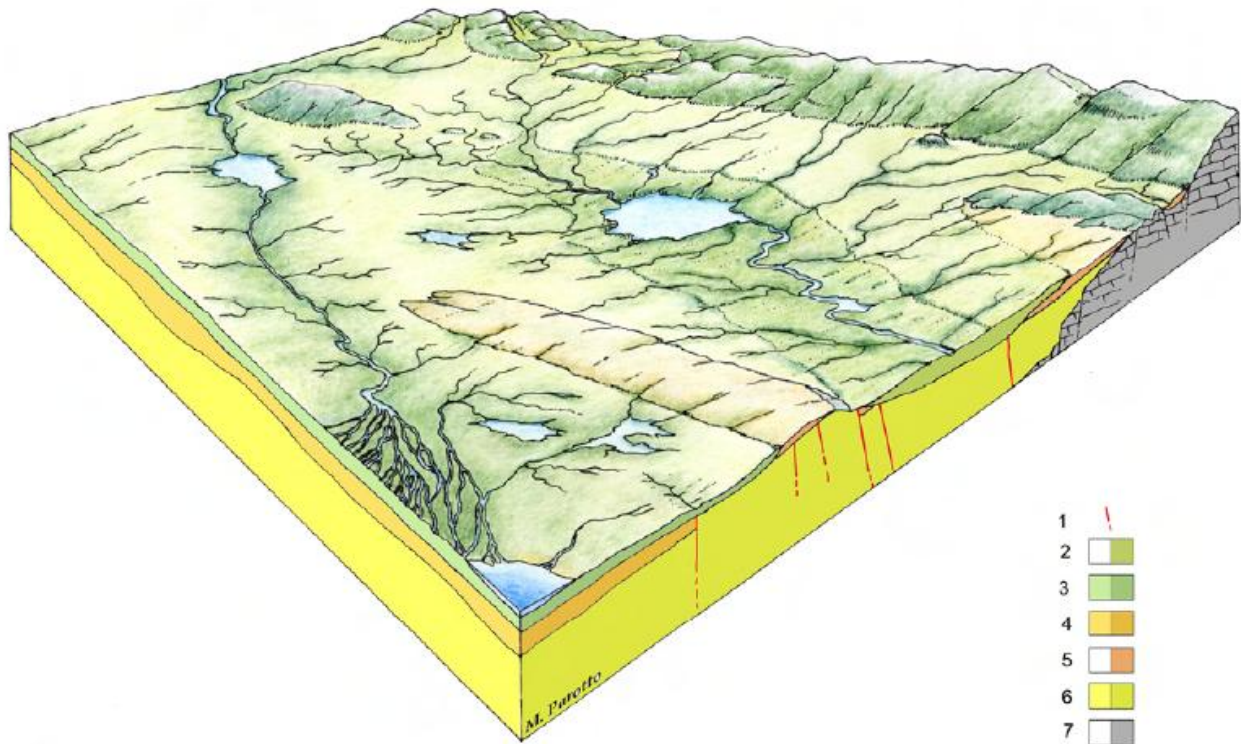


Figura 1.2. Correlazione tra dati di pozzi profondi perforati nell'area romana (Funicciello & Parotto, 1978).

L'insieme di quei depositi sedimentari (conglomerati, sabbie, limi) costituisce oggi la *formazione di Ponte Galeria* (Pleistocene inferiore), che rappresenta nel suo insieme la costruzione di un ampio delta, con passaggi da facies continentali a infralitorali e intertidali (**figura 1.3**). Il sollevamento delle argille di M. Vaticano, già iniziato verso la fine del Pliocene, deve essere continuato anche dopo la deposizione della formazione di M. Mario (si ricordi la faglia del Fosso della Magliana). A est del rilievo di M. Mario mancano depositi della formazione di Ponte Galeria, e affiorano invece, lungo il Fosso della Crescenza, ghiaie fluviali

(provenienti dall'erosione di rilievi sabini) seguite da sabbie fluviali, con argille e limi di ambiente palustre; al tetto della successione si osservano lenti sabbiose con scorie vulcaniche e pomici. La base della successione poggia localmente sulle sabbie della formazione di M. Mario.



Legenda: 1. Faglie. 2. Formazione del Fosso della Crescenza. 3. Formazione di Ponte Galeria. 4. Formazione di M. del-le Piche (e altri termini sottostanti pre-pliocenici, non affioranti). 5. Formazione di M. Mario. 6. Formazione di M. Vaticano. 7. Substrato meso-cenozoico.

Figura 1.3. Schema paleogeografico al tempo della formazione di Ponte Galeria. (Parotto, 2008).

Depositi analoghi sono stati rintracciati in sondaggio sotto la parte orientale della città, lungo la stessa direttrice NNW-SSE, dove riempiono con spessori fino a 60 m di ghiaie e limi un'antica valle, incisa entro le argille marine plioceniche. L'interpretazione paleoambientale di questi depositi indica che il Paleotevere, dopo aver a lungo alimentato il grande delta rappresentato dalla formazione di Ponte Galeria, è stato deviato dal suo percorso, probabilmente proprio per l'accentuarsi del sollevamento della struttura di M. Mario, ed è stato costretto a scorrere verso SSE, aprendosi una nuova via e accogliendo nel suo reticolo numerosi corsi minori che scendevano dalle pendici dei Monti Sabini e Tiburtini (**figura 1.4**).

Il grosso spessore delle ghiaie della formazione del Fosso della Crescenza indica che la fascia di territorio tra l'alto di M. Mario e i rilievi era in lenta subsidenza. Con il tempo, il colmamento della valle portò all'instaurarsi di diffusi ambienti palustri e lacustri, testimoniati dai

depositi della parte superiore della formazione. Il delta del Paleotevere si era ricostruito più a sud e i suoi resti sono stati coperti dai depositi più recenti della Pianura Pontina.

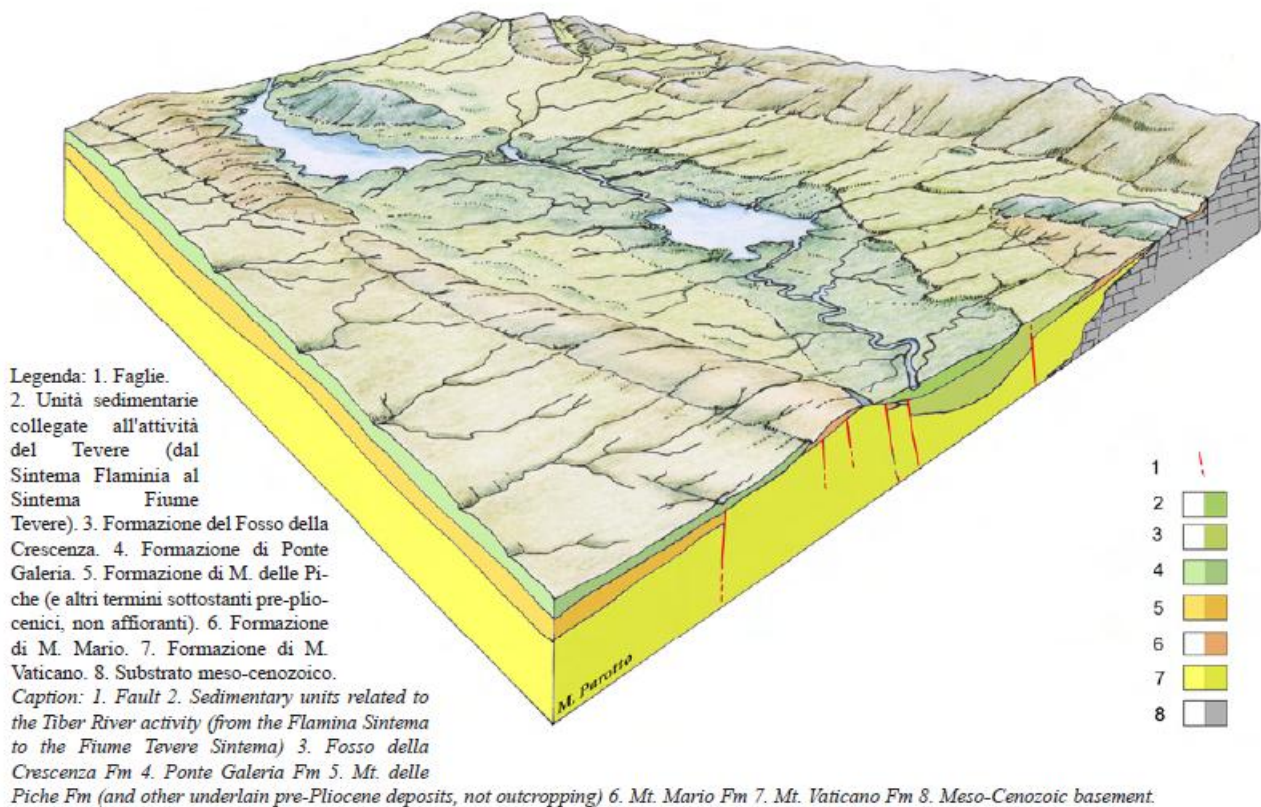


Figura 1.4. Deviazione dell'antico corso del Tevere verso Sud-sud est con la costruzione di un nuovo delta nella Pianura Pontina. (Parotto, 2008).

La presenza di materiali detritici di origine vulcanica nella parte più alta della formazione del Fosso della Crescenza indica l'inizio di un nuovo evento, che, a partire da 600.000 anni fa, ha fortemente condizionato l'evoluzione di gran parte del margine laziale dell'orogeno: lo sviluppo di un intenso vulcanismo esplosivo. I segni di una tettonica attiva, più volte sottolineati nell'evoluzione precedente, erano la manifestazione superficiale di forze ben più profonde, responsabili del progressivo assottigliamento e della subsidenza della crosta che portarono all'origine del Bacino tirrenico. Tra le conseguenze di quell'evoluzione geodinamica, che coinvolse l'intero margine appenninico occidentale, si ebbe anche la risalita delle grandi quantità di magmi prevalentemente in corrispondenza delle zone di intersezione dei tre principali sistemi di faglie, ad andamento rispettivamente NW-SE, NE-SW e N-S. Questi magmi alimentarono il vulcanismo tosco-laziale-campano e l'evoluzione della futura Campagna Romana fu fortemente condizionata dalla nascita dei due grandi centri di attività vulcanica sabatino e albano.

L'attività vulcanica interessò inizialmente l'area a Nord di Roma, dando origine al Distretto Vulcanico dei Monti Sabatini (**figura 1.5**); i prodotti di questa attività arrivano ad

interessare anche l'area urbana di Roma, dove affiorano fino alle rive del Tevere. Questo materiale vulcanico ricoprì quasi interamente i terreni precedenti, e fu in seguito interessato da intensi fenomeni erosivi che modellarono profondamente la topografia.

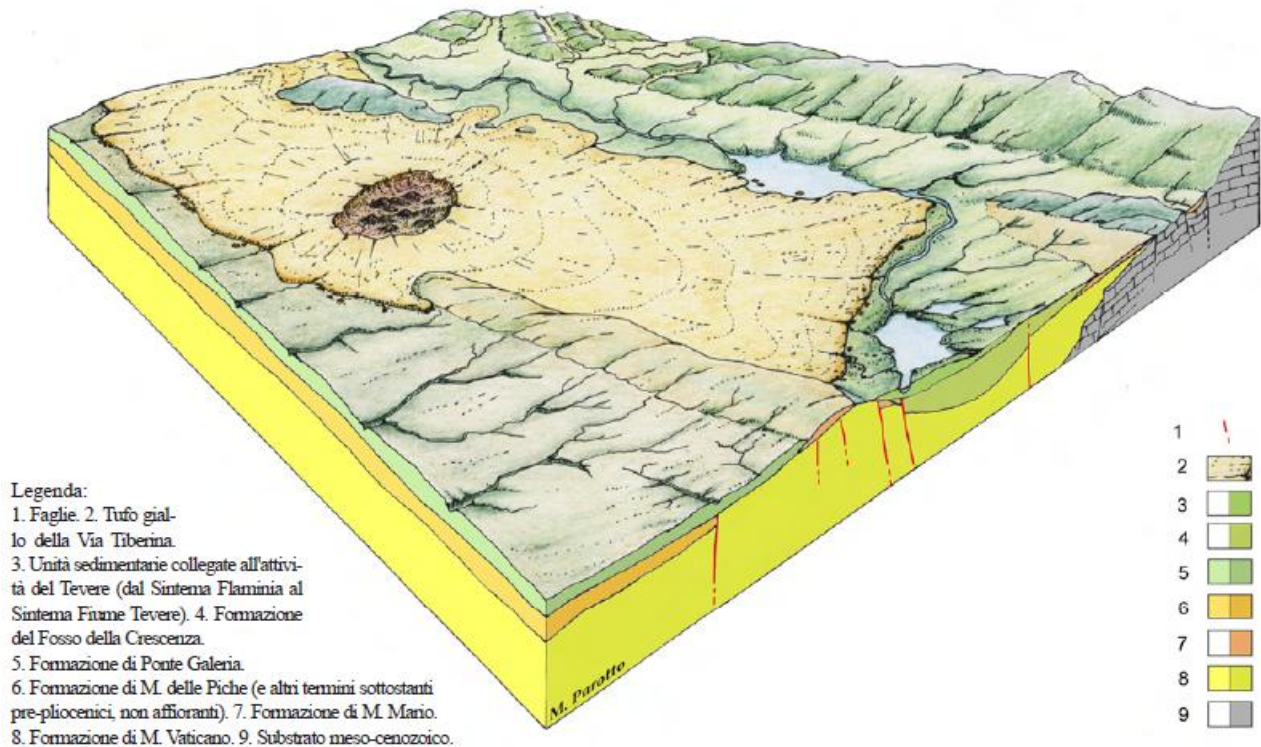
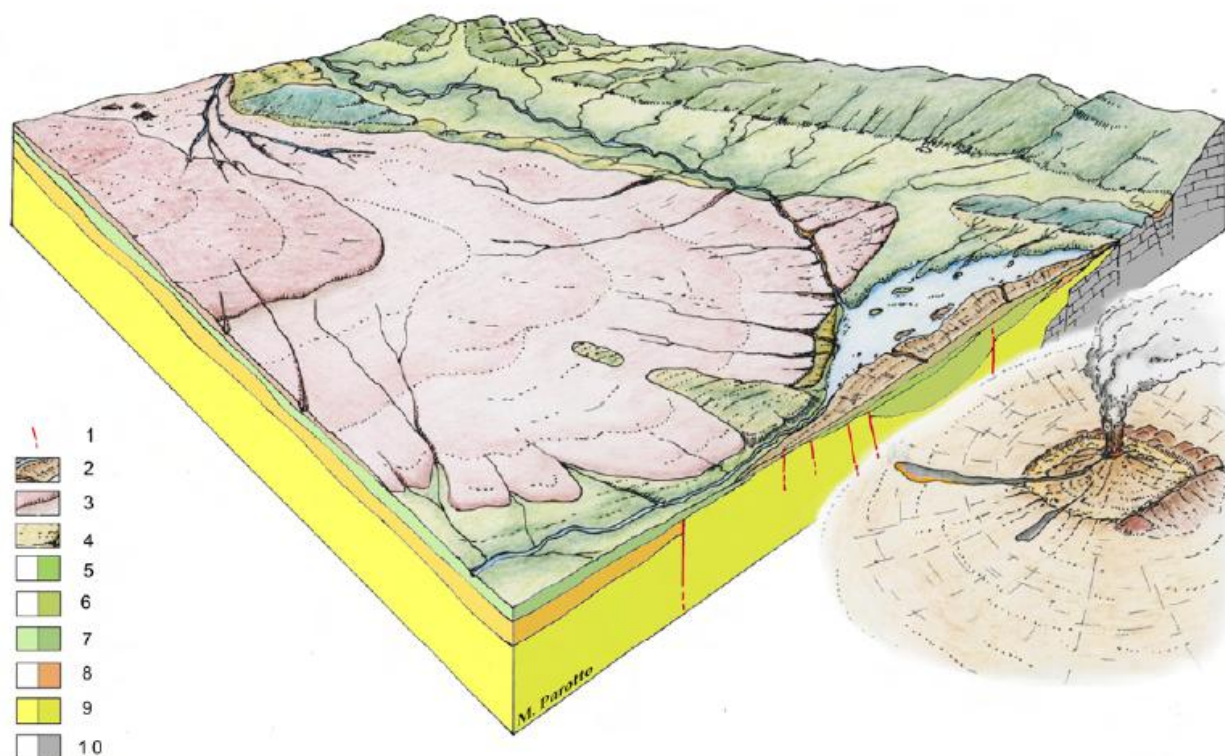


Figura 1.5. Inizio dell'attività del distretto vulcanico sabatino (circa 600000 anni fa, Parotto, 2008).

In questo periodo inizia l'attività vulcanica anche a Sud di Roma, nel Distretto Vulcanico dei Colli Albani (o Vulcano Laziale, **figura 1.6**). Tutto il settore Albano e le aree limitrofe sono coperte da una coltre di depositi vulcanici estesi su una superficie di circa 1500 Km², da poco a sud della Bassa Valle del Tevere sino alla Pianura Pontina. La formazione dell'apparato ha inizio tra i 500.000 e i 600.000 anni fa, mentre i prodotti più recenti sono stati datati a circa 7.500 anni fa. I Colli Albani rappresentano l'apparato vulcanico caratterizzato dalle maggiori dimensioni e, tra i vulcani centrali, dal maggior volume di lava e di prodotti piroclastici eruttati. Nel corso delle diverse fasi che ne hanno segnato l'evoluzione è stata emessa una quantità notevole di prodotti, pari a circa 295 Km³. Il complesso vulcanico dei Colli Albani è caratterizzato dalla presenza di un edificio centrale ad attività mista. L'edificio centrale è prevalentemente costituito da piroclastiti e colate piroclastiche con subordinate effusioni di lave leucitiche provenienti sia dall'apparato centrale che da fratture e centri locali.



Legenda: 1 .Faglie. 2. Prodotti vulcanici dell'attività dei centri eruttivi di Bracciano. 3. Tufo giallo della Via Tiberina. 4. Unità sedimentarie collegate all'attività del Tevere (dal Sintema Flaminia al Sintema Fiume Tevere). 5. Formazione del Fosso della Crescenza. 6. Formazione di Ponte Galeria. 7. Formazione di M. delle Piche (e altri termini sottostanti pre-pleiocenici, non affioranti). 8. Formazione di M. Mario. 9. Formazione di M. Vaticano. 10. Substrato meso-cenozoico.

Figura 1.6. Inizio dell'attività del distretto vulcanico albano (tra 600000 e 500000 anni fa, Parotto, 2008).

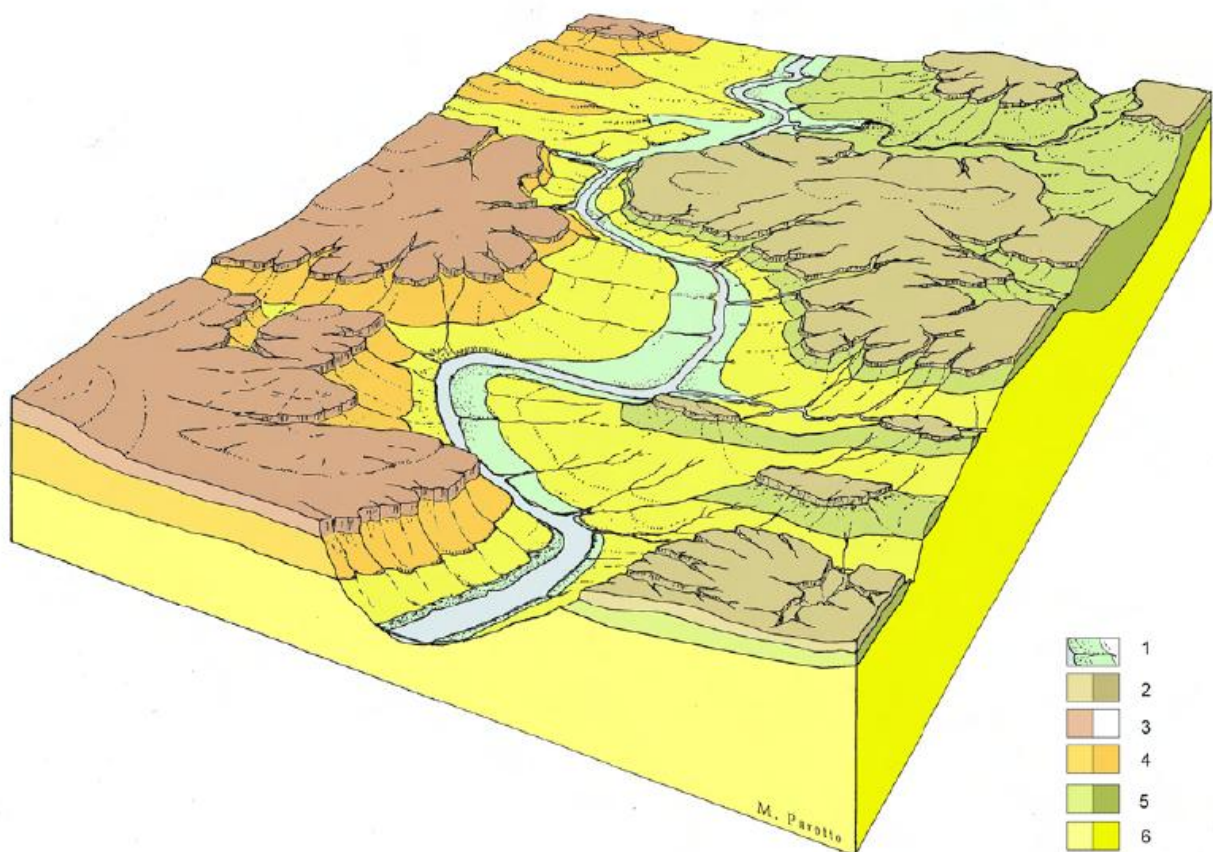
Come per gli altri vulcani, anche per i Colli Albani si possono individuare varie fasi di attività e nel particolare del nostro distretto essa si è manifestata in tre fasi principali, denominate come di seguito indicato, dalla più antica alla più recente (De Rita et al., 1995; Funiciello et al., 2003):

- Prima Epoca denominata del Tuscolano-Artemisio (tra 561.000 e 351.000 anni);
- Seconda Epoca denominata dei Campi di Annibale o delle Faete (tra 277.000 e 250.000 anni);
- Terza Epoca denominata freato-magmatica finale (tra 45.000 e 7.500 anni).

L'atto conclusivo della storia evolutiva dell'area romana è segnato dall'ultima glaciazione, quando, a partire da 80000 anni fa, l'abbassamento del livello del mare scese progressivamente di oltre 110 metri (ultima fase Würm). L'attività erosiva, rimasta incontrastata, si intensificò e il Tevere con i suoi affluenti incisero profonde valli nei depositi vulcanici e pre-vulcanici, fino a raggiungere le formazioni marine plio-pleistoceniche. L'attività vulcanica albana, dopo la costruzione dell'edificio delle Faete, si ridusse drasticamente e si manifestò solo con eruzioni

eccentriche essenzialmente freato-magmatiche, attraverso alcuni apparati indipendenti sparsi lungo i versanti occidentale e settentrionale.

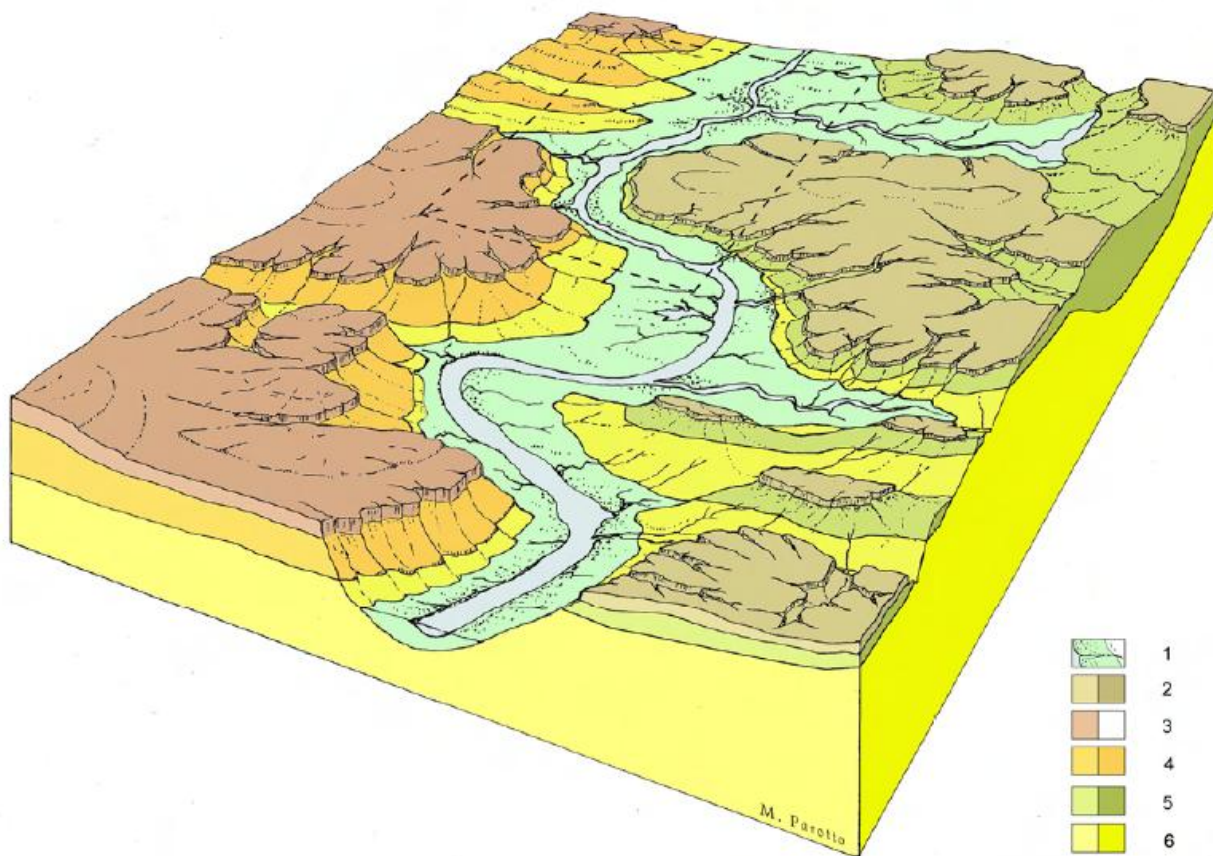
La **figura 1.7** mostra in modo semplificato l'aspetto generale della morfologia nella fase di basso stazionamento del mare. L'ampio mantello di vulcaniti sabatine e albane, profondamente tagliato in due dalla valle del Tevere, appare disarticolato in lembi da numerosi corsi d'acqua, separati da larghi interfluvi. Lungo il versante destro della valle tiberina emerge dalla coltre piroclastica l'alto di Monte Mario, con i depositi marini, che nel resto del versante affiorano, invece, a quote inferiori. Lungo il versante opposto, meno rilevato, sotto le vulcaniti e a copertura delle formazioni marine affiorano i sedimenti in facies fluviali e lacustre - palustri della formazione del Fosso della Crescenza, legati essenzialmente all'attività del reticolo del Paleotevere, quando questo scendeva più a sud.



Legenda: 1. Depositi alluvionali del Tevere e dei suoi affluenti. 2. Prodotti dell'attività del Vulcano dei Colli Albani. 3. Prodotti dell'attività del Distretto vulcanico sabatino. 4. Formazione di M. Mario. 5. Formazione del Fosso della Crescenza. 6. Formazione di M. Vaticano.

Figura 1.7. Aspetto della morfologia dell'area romana durante il basso stazionamento del mare nell'ultima fase del glaciale Würm. (Parotto, 2008).

Il fondo della valle del Tevere si trova oggi, nell'area di Roma, a -40 m rispetto al livello del mare. Con la fine della fase glaciale e la progressiva risalita del mare, le incisioni fluviali vennero progressivamente colmate da sedimenti fluviali e lacustre- palustri, che nella valle del Tevere raggiunsero i 60 m di spessore (**figura 1.8**). Si costruì, così, l'attuale piana che attraversa tutta la città, all'interno della quale si è inciso l'odierno corso del fiume. La topografia che si osserva al di sopra dei fondovalle, elaborata nel periodo glaciale, si è modificata di poco: solo verso SE, il vulcanismo albano ha introdotto una sensibile trasformazione del paesaggio. Il reticolo di paleo-valli incise nella fase glaciale è stato completamente colmato da prodotti freatomagmatici da flusso piroclastico e da colate di fango (lahar) provenienti dal cratere di Albano; la quantità e il tipo di materiali messi in posto hanno dato origine a un'ampia zona pianeggiante (nota un tempo come "Tavolato"), di cui fa parte, tra l'altro, la piana di Ciampino-Capanelle.



Legenda: 1. Depositi alluvionali del Tevere e dei suoi affluenti. 2. Prodotti dell'attività del Vulcano dei Colli Albani. 3. Prodotti dell'attività del Distretto vulcanico sabatino. 4. Formazione di M. Mario. 5. Formazione del Fosso della Crescenza. 6. Formazione di M. Vaticano.

Figura 1.8. Colmamento delle valli del Tevere e dei suoi affluenti con depositi alluvionali (ghiaie, sabbie, limi, torbe). (Parotto, 2008).

1.2 Tettonica superficiale plio-pleistocenica

Le osservazioni di faglie e fratture nelle unità geologiche affioranti nell'area romana sono scarse sia per numero che per qualità del dato (note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala, 1:50000 Foglio 374 Roma). Ciò è dovuto prevalentemente alle loro caratteristiche reologiche (i.e. rocce poco consolidate) e alla loro età deposizionale (Pliocene-Quaternario).

Come già accennato nel paragrafo precedente, l'esistenza di elementi deformativi che interessano i terreni argillosi pliocenici, e che sono suturati dalle formazioni quaternarie, è stata riconosciuta e studiata negli scavi realizzati per la costruzione della galleria "Giovanni XXIII" (Cosentino et al., 2008). I dati strutturali rilevati mostrano che: 1) gli elementi principali osservati sono sistemi di faglie coniugate orientate tra NW-SE e NNW-SSE, con immersione prevalente verso NE; 2) elementi importanti, ma subordinati ed antecedenti, sono orientati NE-SW e N-S; 3) la cinematica delle faglie è a prevalente componente *dip-slip* e carattere estensionale; 4) le faglie appaiono interessare sedimenti già consolidati, in quanto non si osservano deformazioni pre-litificazione; infatti i piani di faglia sono in genere ben definiti e frequentemente presentano evidenze cinematiche come striature; 5) si osservano sia faglie estensionali a basso angolo (angoli $< 45^\circ$), sia faglie estensionali ad alto angolo.

Durante lo scavo della galleria "Giovanni XXIII" è stata intercettata all'entrata dell'imbocco Farnesina una fascia di deformazione ampia circa 50 m e con orientazione N 340° - 60° , che mette a contatto le argille della formazione di Monte Vaticano con le "Sabbie gialle con intercalazioni limose" della parte alta della formazione di Monte Mario (Cosentino et al., 2008). La natura sabbiosa della formazione di Monte Mario non ha reso possibile rilevare strie lungo i piani di faglia, ma il corteo di deformazioni associate indica una cinematica essenzialmente estensionale. Tale elemento deformativo potrebbe corrispondere con il sistema di faglie che bordano l'alto strutturale di Monte Mario, a direttrice NW-SE. La ricostruzione effettuata tramite sondaggi, eseguiti durante le diverse fasi di realizzazione della galleria, e i dati di campagna indicano che la base della formazione di Monte Mario viene ribassata da quota 58 m s.l.m. a quota 25 m s.l.m. (Cosentino et al., 2008). Un secondo importante elemento tettonico a carattere estensionale, con direzione N 320° , 60° , è stato rilevato nella galleria. Tale elemento, che ribassa di circa 12 m verso NE la successione sopra menzionata, può essere seguito verso NO, lungo il Fosso dell'Acquatraversa, che ne eredita la direzione, e fa sì che a NE di esso affiori solo la formazione di Monte Mario.

Elementi associati al sollevamento dell'alto strutturale sono stati identificati su basi stratigrafiche anche più a sud, ed in particolare faglie a direttrice NW-SE sono state cartografate tra la zona di P.le Clodio e il quartiere Balduina (Funciello & Giordano, 2005), per accomodare

le brusche variazioni di quota della *unconformity* tra le formazioni di Monte Vaticano e di Monte Mario. Il rigetto minimo cumulato su questo sistema di faglie, che si può calcolare tra la zona della Balduina ed il fosso dell'Acquatraversa, è di circa 85 m.

Le formazioni continentali, vulcaniche e vulcano clastiche dell'area romana si presentano per larga parte indisturbate dalla tettonica, anche se il campo di fatturazione superficiale ha un evidente riscontro nell'organizzazione dei lineamenti morfologici dell'area (Marra & Florindo, 2014). Le poche evidenze di terreno mostrano faglie a componente estensionale, con rigetti di pochi metri. L'analisi strutturale, comunque, è fortemente limitata dalla natura poco consolidata delle rocce interessate dalle deformazioni, con i piani di faglia che risultano poco definiti, a cui è molto difficile attribuire una geometria e tantomeno una cinematica. Altre faglie sono state definite nella redazione dei profili geologici, essenzialmente sulla base delle correlazioni dei dati di sondaggio, laddove le variazioni di quota delle unità vulcaniche e continentali non fossero attribuibili a condizioni paleo topografiche.

È possibile che siano legati ad un elemento tettonico NW-SE, probabilmente coincidente con la faglia bordiera dell'alto di Monte Mario, anche i travertini della formazione di Valle Giulia (tra Valle Giulia e Vigna Clara). Altri travertini della stessa formazione sono presenti nella zona Eur-Torrino, lungo la proiezione della faglia che borda il bacino della formazione di Monte delle Piche. Di età medio-pleistocenica è anche la faglia NW-SE, ipotizzata lungo il fosso della Magliana per giustificare il brusco salto di quota dei livelli stratigrafici della formazione di Ponte Galeria tra la sponda destra e quella sinistra. Le principali strutture tettoniche sopra menzionate sono riportate in **figura 1.9** (Foglio CARG Roma 1:50.000, <http://sgi.isprambiente.it/GMV2/index.html>).

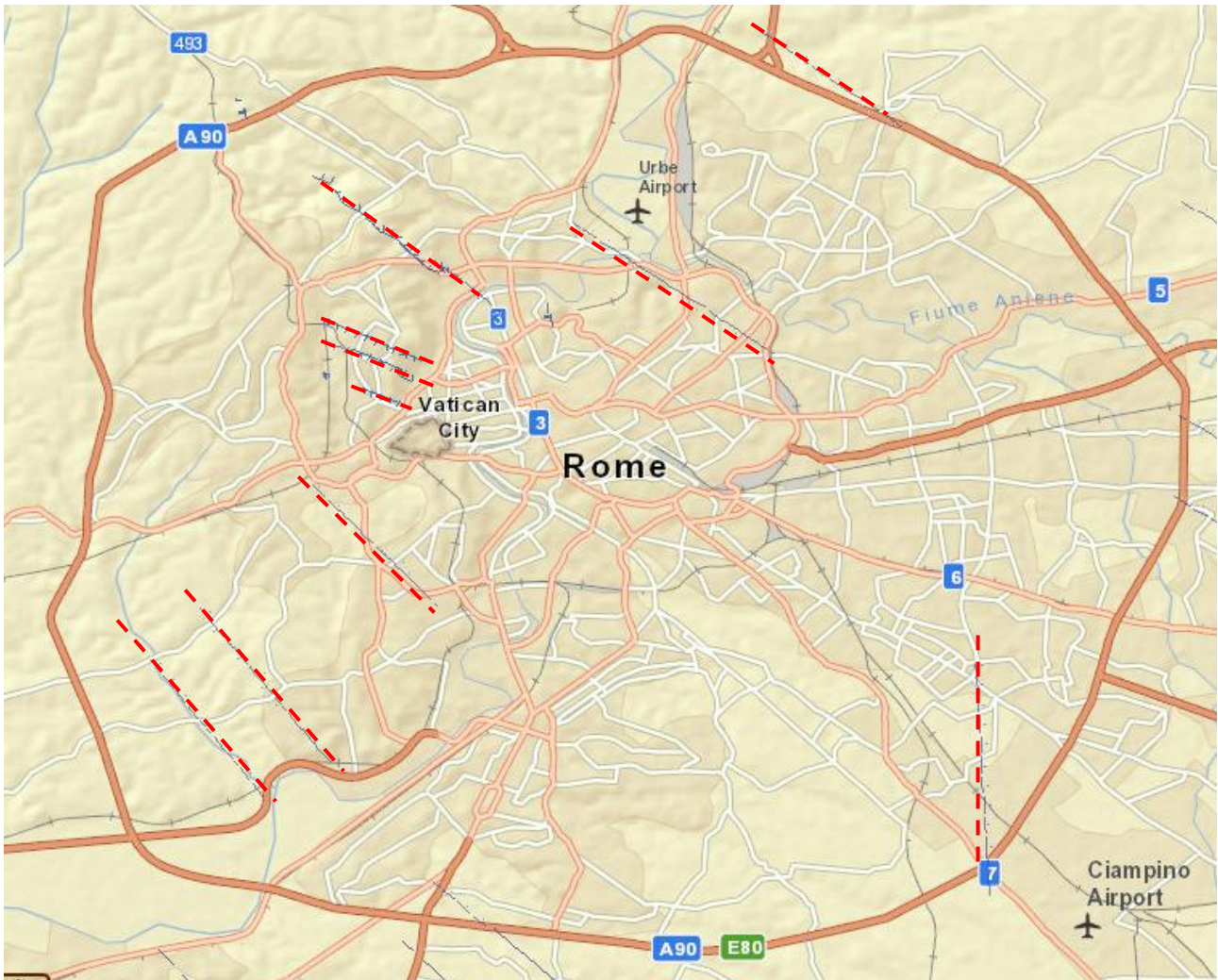


Figura 1.9. Principali strutture tettoniche nell'area urbana di Roma (Foglio CARG Roma 1:50.000, <http://sgi.isprambiente.it/GMV2/index.html>).

Recentemente, Bersani et al. (2013), basandosi su osservazioni derivanti da diverse discipline quali sismologia (epicentri di terremoti storici e recenti, allungamento delle isosisme di due importanti terremoti avvenuti nell'area romana), geochimica dei fluidi (allineamento di acque mineralizzate, sorgenti di emissione gassosa), informazioni storiche (*sinkholes*, ubicazione di luoghi termali e sacri dell'antica Roma) hanno ipotizzato la presenza di un elemento tettonico NW-SE (N 165° W, **figura 1.10**), che dall'area urbana si estende fino al litorale sud (Anzio). Tale allineamento risulta coincidente con la fascia di deformazione rilevata sul terreno da Cosentino et al. (2008) nella galleria Giovanni XXIII.

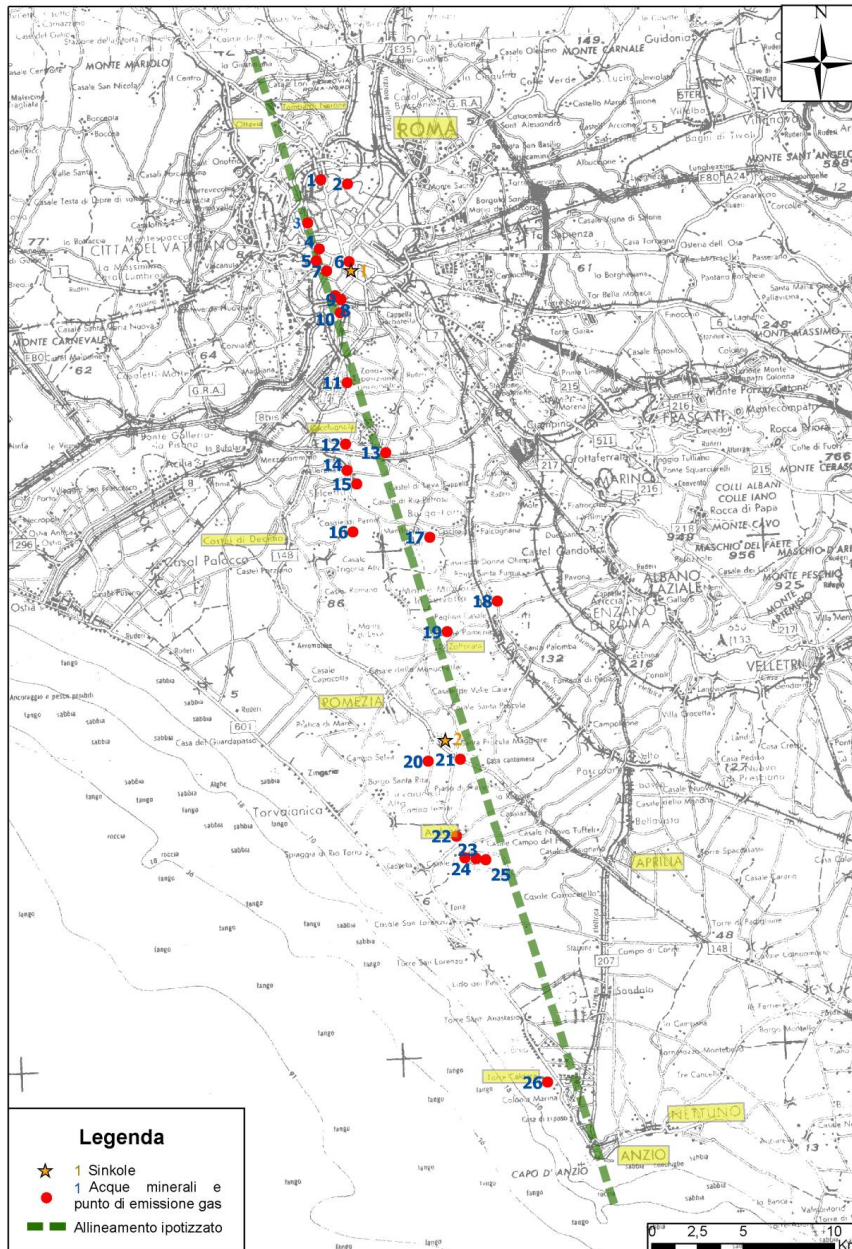


Figura 1.10. Allineamento N 165°W ipotizzato sulla base di osservazioni derivanti da diverse discipline quali sismologia (epicentri di terremoti storici e recenti, allungamento delle isosisme di due importanti terremoti avvenuti nell'area romana), geochimica dei fluidi (allineamento di acque mineralizzate, sorgenti di emissione gassosa), informazioni storiche (*sinkholes*, ubicazione di luoghi termali e sacri dell'antica Roma). (Bersani et al., 2013).

1.3 Tettonica profonda: Gravimetria nell'area romana

Un valido supporto per l'analisi e l'interpretazione delle strutture profonde del Lazio centrale e dell'area romana è lo studio del quadro gravimetrico effettuato da Cesi et al., 2008, dal quale provengono tutte le informazioni riportate in questa sezione. Gli autori, tramite l'utilizzo di

11180 stazioni gravimetriche, comprese in un'area tra 12° e 13° di longitudine Est e 41.5° e 42.5° di latitudine Nord, e l'elaborazione di un ampio *dataset* di misure di gravità (per un totale di 1.2- per km²) archiviate nella Banca Dati Geofisica gestita dal Servizio Geofisica di APAT (ora ISPRA) hanno individuato i principali elementi gravimetrico-strutturali nel contesto geodinamico dell'area.

L'elaborazione dei dati ha permesso la produzione della relativa cartografia gravimetrica, tra cui la carta delle Anomalie di Bouguer (**figura 1.11**), che ha rivelato la presenza di un importante gradiente regionale che si immerge verso Nord - Est, interpretato da molti autori quale effetto di variazioni di profondità densità e spessore della crosta inferiore in questo settore dell'Appennino Centrale, e una mappa Passa Alto (**figura 1.12**), la cui analisi ed interpretazione ha permesso di individuare più efficacemente lo stile strutturale del complesso sedimentario ed i rapporti tra le varie serie.

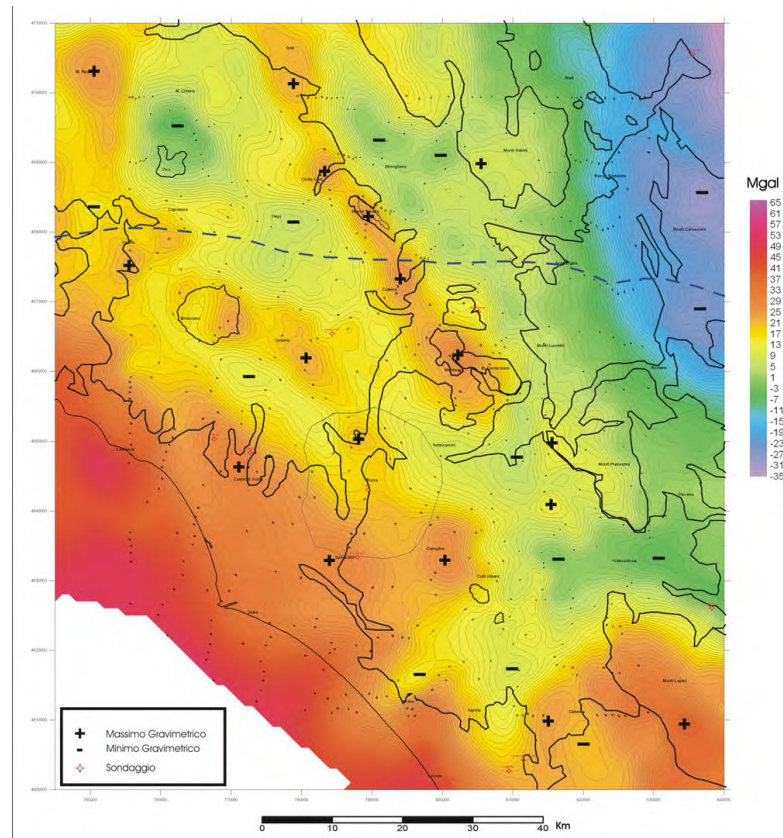


Figura 1.11. Mappe delle anomalie di Bouguer nell'Italia centrale. (da Cesi et al., 2008).

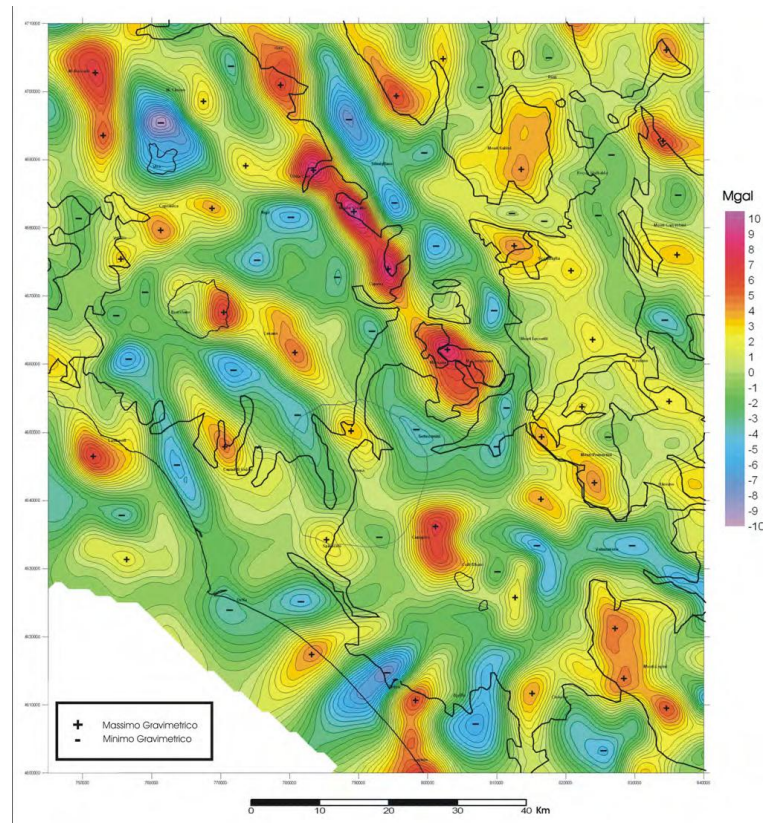


Figura 1.12. Mappa Passa Alto delle anomalie di Bouguer nell'Italia centrale. (Cesi et al., 2008).

Il segnale gravimetrico sembra dipendere principalmente dall'andamento del basamento calcareo e, ove presenti, dei depositi alloctoni silico-clastici. I dati gravimetrici mostrano che il basamento sedimentario è composto da una serie complessa di alti e bassi strutturali come effetto del regime estensionale Tirrenico che si è sovrapposto alle fasi compressive Mioceniche. Gli assi e le discontinuità gravimetriche principali, riportati in una mappa di sintesi, hanno direzione preferenziale NW - SE, SW - NE, N - S e riflettono i principali campi di sforzo riconosciuti.

Per la costruzione delle mappe focalizzate sulla città di Roma (area di 600 km²), sono state ricavate dalla Banca Dati 629 stazioni gravimetriche (ridotte poi a 596 dopo i test di affidabilità) situate entro il GRA; inoltre sono state recuperate ulteriori 200 misure gravimetriche (ubicate per la maggior parte nel centro storico di Roma), descritte in una pubblicazione edita dall'Istituto di Topografia e Geodesia dell'Università di Roma (Di Fonzo et alii, 1986). I due set di dati sono stati integrati ed uniformati in modo da consentire di preparare una mappa di Bouguer calcolata con una densità (valore medio 1.9 g/cm³) tipica per i terreni affioranti nell'area in studio. Tale mappa (**figura 1.13**) descrive gli andamenti e le geometrie delle strutture geologiche costituenti il sottosuolo della Città di Roma, ovviamente con i limiti imposti dalla metodologia.

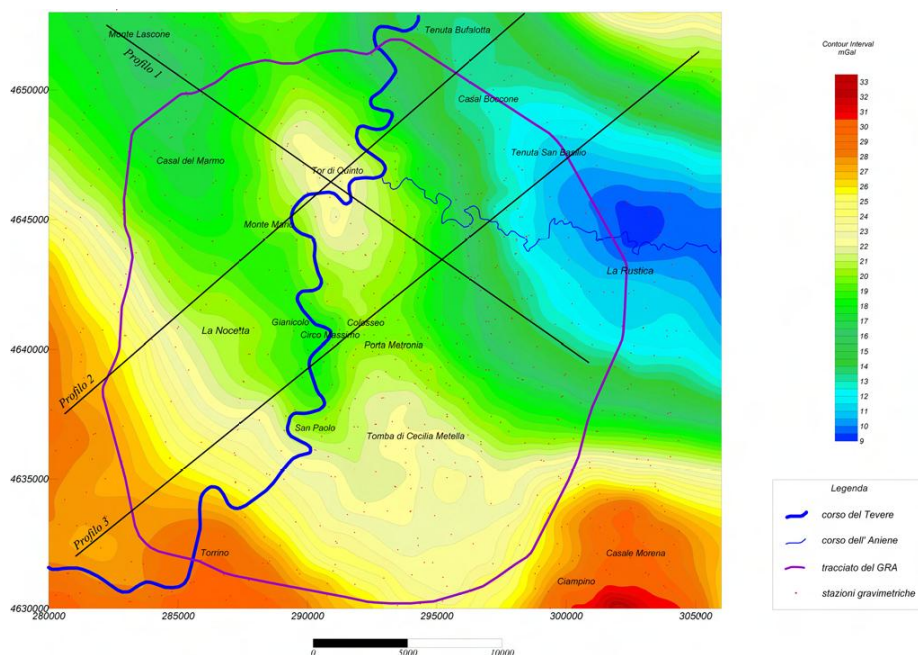


Figura 1.13. Mappa delle anomalie di Bouguer nell'area urbana di Roma. (Cesi et al., 2008).

Il quadro delle anomalie ripropone gli elementi già individuati nell'analisi regionale, consentendo di coglierne un maggior dettaglio e qualche peculiarità. Il campo dei valori si estende dai + 9,5 mGal del minimo assoluto di La Rustica – corso dell'Aniene nel settore orientale, ai + 32,5 mGal del massimo di Ciampino al margine SE dell'area. Un'altra culminazione di massimo a + 30 mGal si delinea al margine SW, nell'area del Torrino. Elemento rilevante nel panorama delineato dalle isoanomale è un'ampia struttura di massimo gravimetrico che domina il settore centro-settentrionale dell'area esaminata con andamento NNW-SSE e raggiunge il culmine all'altezza di Tor di Quinto, ove mostra valori di anomalia di 22,5 mGal; esso sembra collegarsi, nel settore meridionale, ad un'altra area di massimo localizzato sull'Appia Antica, tra la Tomba di Cecilia Metella ed il Tempio di Giove, ove i valori di anomalia si attestano sui 23 mGal; i due massimi sono separati da un'area di sella impostata tra il Colosseo e Porta Metronia. Tale configurazione gravimetrica sembra rappresentare l'effetto di un'unica morfologia di alto strutturale, parte di quella più estesa a carattere regionale che si prolunga verso nord fino a Cesano e che può essere interpretata come un sollevamento del substrato carbonatico mesozoico, come peraltro riconosciuto da vari autori (e.g. Faccenna et al, 1995).

L'alto gravimetrico di Tor di Quinto è bordato da fasci di isoanomale sub-parallele che sul bordo orientale si dispongono dapprima circa NW-SE e poi N-S, mentre sul bordo occidentale la successione è inversa. Nel settore meridionale della mappa (Cecilia Metella) il

gradiente diviene più blando e l'asse di massimo gravimetrico si dispone quasi in direzione NW-SE.

Nella porzione nord-orientale della mappa, in corrispondenza dell'allineamento Tenuta Bufalotta – Casal Boccone – Tenuta S. Basilio, si rileva un minimo gravimetrico allungato in direzione NWSE che all'altezza del corso dell'Aniene muta direzione disponendosi in chiaro orientamento Est-Ovest mostrando i valori anomali più bassi dell'intera area (+ 9,5 mGal). L'ampiezza dell'anomalia negativa ed i forti gradienti con cui si raccorda ai massimi gravimetrici verso Nord e verso Sud depongono per una morfologia sepolta controllata dalla tettonica. Nell'angolo nord-orientale della mappa l'elevato gradiente verso valori di massimo è chiaramente legata ad una risalita del substrato carbonatico che più a NE si identifica in affioramento nella struttura dei Monti Cornicolani, mentre l'intensa anomalia presente nell'angolo sud-orientale corrisponde al noto alto strutturale di Ciampino, localizzato a SE appena al di fuori del GRA. Nel settore occidentale, alla già descritta struttura di Tor di Quinto si affianca l'area di minimo gravimetrico che costituisce la propaggine sudorientale dell'estesa struttura ubicata a Sud del Lago di Bracciano. Nel settore sud-occidentale le isoanomale sono disposte NW-SE con andamento regolare ed incremento dei valori verso le aree strutturalmente rilevate di Spinaceto- Torrino e di Tragliata- Castel di Guido. Il trend delle isoanomale individua un importante elemento tettonico orientato NW-SE. Per meglio evidenziare l'andamento del tetto del substrato calcareo gli Autori hanno separato le anomalie a maggior lunghezza d'onda, imputabili a sorgenti più profonde, da quelle caratterizzate da una lunghezza d'onda minore. Il filtro "passa alto" è stato costruito sulla base dell'analisi dello spettro di potenza del segnale gravimetrico, determinando una lunghezza d'onda di taglio di 11 Km. La mappa filtrata (**figura 1.14**) descrive con una maggiore articolazione le strutture gravimetriche presenti nella mappa di Bouguer fino a dettagliare aree anomale localizzate, anche di estensione ed intensità limitata.

Tra queste si evidenziano:

a) quella positiva, ampia 2 - 3 Km, che si colloca ad Ovest del Gianicolo (zona La Nocetta – Via Gregorio VII); in tale zona il massimo relativo sulla mappa passa alto ben si raccorda con una quota più elevata del tetto del substrato plio-pleistocenico;

b) il debole andamento di minimo con asse SW-NE che dall'autostrada per l'aeroporto di Fiumicino si allunga fino a Sud de La Nocetta;

c) il massimo relativo del Torrino;

d) il massimo di Tor di Quinto;

e) Il massimo tra la Via Anagnina e la Via Tuscolana (all'altezza di via di Casal Morena), che il processo di filtraggio mostra come entità separata dall'alto di Ciampino;

f) l'area di massimo relativo nella zona di La Rustica che si colloca all'interno della vasta area di minimo gravimetrico dell'asta fluviale dell'Aniene e che può essere interpretato come un innalzamento localizzato del substrato;

g) L'area di massimo di Cecilia Metella, che si separa decisamente da quella di Ciampino, articolandosi in due massimi relativi.

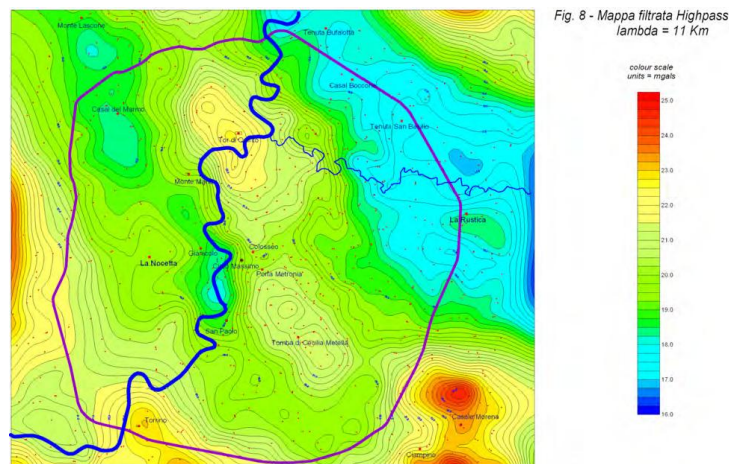


Fig. 8 - Mappa filtrata Highpass
lambda = 11 Km

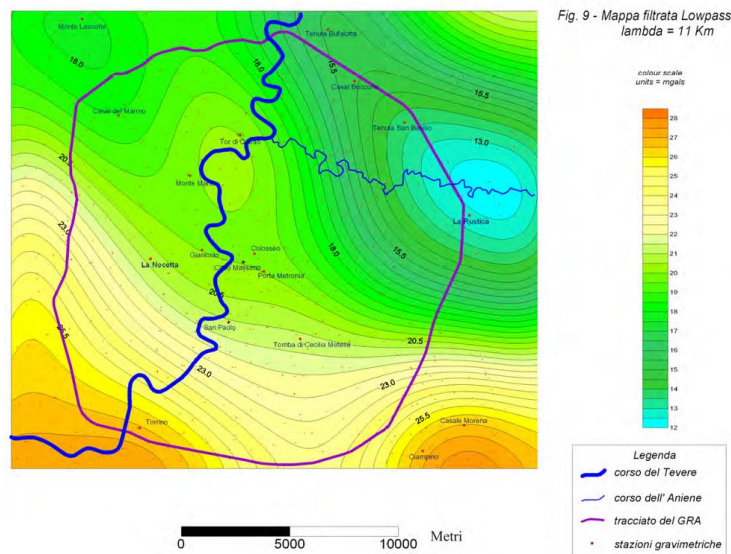


Fig. 9 - Mappa filtrata Lowpass
lambda = 11 Km

Figura 1.14. Mappa filtrata *High pass* (sopra) e *Low pass* (sotto). (Cesi et al., 2008).

Per quanto concerne i lineamenti che la mappa passa alto evidenzia, oltre a quelli già descritti nella mappa di Bouguer, vengono dettagliati i seguenti elementi:

a) l'asse di massimo Tor di Quinto Cecilia Metella, che appare decisamente suddiviso in tre segmenti a direzione NW-SE (dal GRA a Tor di Quinto), N-S (fino a Porta Metronia) e di nuovo NW-SE (nel settore di Cecilia Metella);

b) gli andamenti dei due fasci di isoanomale che bordano a NE e a SW l'asse di massimo descritto in precedenza e che ripetono anch'essi una strutturazione in tre segmenti di pari

orientazione. La deflessione di questi elementi può essere posta in relazione con una struttura tettonica NE-SW, passante per la zona Circo Massimo – Colosseo e che potrebbe spingersi sino al minimo relativo ubicato in corrispondenza dell'autostrada per Fiumicino;

c) l'allineamento N-S delle isoanomale immediatamente a ovest del massimo relativo di Morena, che procedendo verso Nord piegano a ginocchio verso Est, delineando elementi tettonici ad analogo trend.

A completamento dell'analisi gravimetrica gli Autori hanno elaborato una mappa usando un filtro passa basso corrispondente ad una lunghezza d'onda di taglio pari a 24 Km, per valutare gli andamenti delle strutture presenti a maggior profondità; essa evidenzia la persistenza in profondità dei principali andamenti di massimo e minimo gravimetrico, soprattutto nel settore settentrionale della mappa. Nel settore meridionale, gli allineamenti si confondono con gli intensi effetti legati ai massimi gravimetrici di Ciampino a Sud Est e dell'asse Tragliata-Torino-Spinaceto a Sud-Ovest.

La **figura 1.15** illustra i principali elementi di discontinuità gravimetrica dedotti dall'analisi qualitativa delle mappe precedentemente descritte. Sono anche riportate per un confronto le faglie note in letteratura (Foglio CARG Roma 1:50.000; Marra & Rosa, 1995).

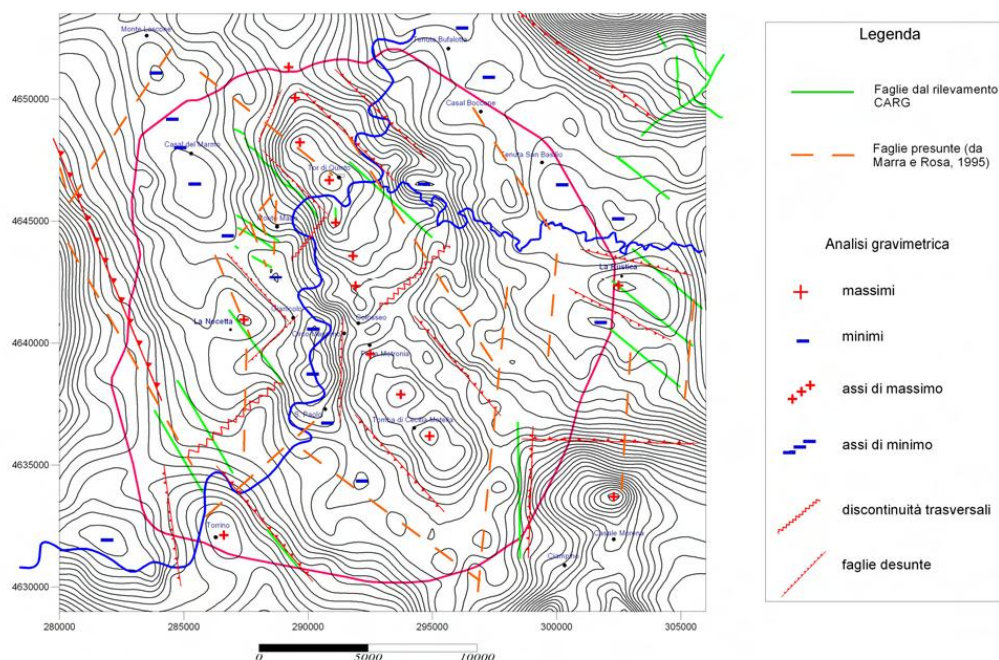


Figura 1.15. Ubicazione degli elementi tettonici sulla mappa High pass 11 km. (Cesi et al., 2008).

In alcune aree gli elementi tettonici e quelli delineati dagli andamenti gravimetrici appaiono dispersi con orientazioni pressoché analoghe, come ad esempio: in località La Rustica;

nell'area a ovest di Ciampino – Casal Morena; in parte ai bordi della struttura di Tor di Quinto; lungo la direttrice del fosso della Magliana; Al riguardo va tenuto presente che gli allineamenti generali delle strutture gravimetriche riflettono in prevalenza gli andamenti della tettonica estensionale che ha strutturato l'area in esame in una serie di *horst* e *graben* ad orientamento appenninico, coinvolgendo il basamento carbonatico e le successioni alloctone. Le fasi tettoniche successive che hanno interessato i depositi argillosi plio-pleistocenici possono aver riattivato, in alcuni casi, precedenti strutture di faglia (vedi paragrafo precedente).

Allo scopo di completare le informazioni ottenute dall'analisi qualitativa delle anomalie sono stati costruiti dei modelli gravimetrici 2.5 D lungo tracce di sezioni ritenute interessanti dal punto di vista interpretativo (profili 1, 2 e 3 della **figura 1.16**). L'elemento più evidente che risulta dai modelli è l'articolazione in alti e bassi strutturali del basamento calcareo mesozoico e delle sovrastanti unità alloctone (flysch).

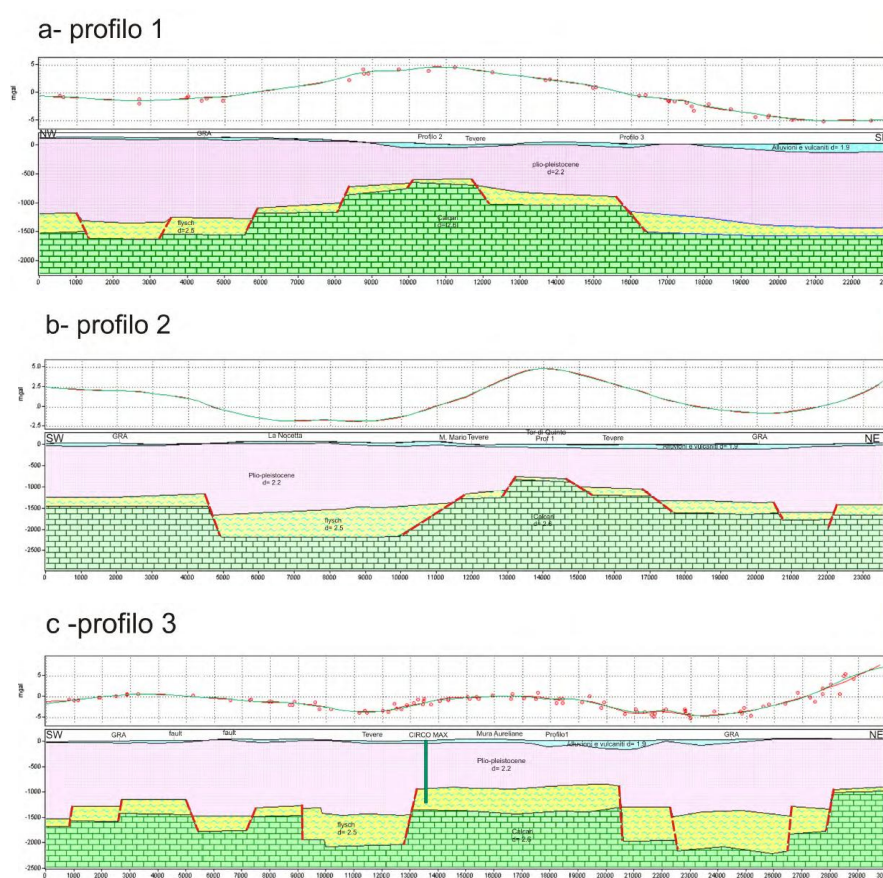


Figura 1.16. Modelli gravimetrici 2.5 D. (Cesi et al., 2008).

In secondo luogo i profili evidenziano come la tettonica quaternaria che ha interessato i sedimenti più recenti generalmente non ha riflessi sugli andamenti gravimetrici che risentono essenzialmente dell'assetto strutturale più profondo. Anche alcuni alti o bassi morfologici del

tetto delle formazioni argillose plio-pleistoceniche (Alto di Monte Mario, Paleotevere a NE di Tor di Quinto) non vengono messi in risalto sulla curva delle anomalie. Nell'area della Magliana, invece, alcune strutture riconosciute in superficie risultano nel modello come possibili prosecuzioni di strutture profonde che hanno dislocato il basamento carbonatico (Profilo 3). Il modello relativo al profilo 1 (**figura 1.16a**) che attraversa l'area in senso NW-SE, mostra come l'alto gravimetrico di Tor di Quinto possa essere interpretato come una risalita del basamento carbonatico profondo, da circa 2000 metri a meno di 1000 metri, con relativo innalzamento anche del tetto delle unità flyschoidi. Anche nel modello relativo al profilo 2 (**figura 1.16b**) l'area di Tor di Quinto mantiene il suo carattere di massimo gravimetrico corrispondente ad un alto strutturale con profondità all'incirca concordanti con quelle ottenute con il *modeling* lungo il profilo 1; nel settore nord-orientale del profilo si accenna la risalita dei calcari e delle formazioni alloctone connesse alla struttura dei Monti Cornicolani. Il profilo 3, ortogonale al profilo 1 (**figura 1.16c**) delinea, proprio in corrispondenza dell'attuale asta fluviale del Tevere, un'area ribassata del basamento, estesa per circa 3 Km lungo la traccia del profilo.

In sintesi, lo studio di Cesi et al., 2008 ha evidenziato come il panorama gravimetrico della Città di Roma entro il GRA sia costituito da un susseguirsi di strutture di massimi e minimi gravimetrici disposti secondo assi orientati principalmente NW-SE, riconducibili rispettivamente ad una serie di alti e bassi strutturali della successione carbonatica mesozoica e anche dei sovrastanti depositi alloctoni. Oltre agli elementi di carattere spiccatamente regionale, lo studio di Cesi et al., 2008 ha consentito di evidenziare delle anomalie di moderata entità riconducibili a strutture isolate che interessano specificatamente l'area urbana.

2. Idrogeologia nella città di Roma

2.1 Stato dell'arte

L'avvio di studi idrogeologici estesi all'intero territorio della Città di Roma risale agli anni '60-'70 (Martini et al., 1961; Albani et al., 1972, 1973). Da allora sono stati prodotti lavori di grande interesse, supportati da consistenti banche dati e da analisi approfondite dell'assetto idrogeologico dell'area urbana e dei settori immediatamente adiacenti (Corazza & Lombardi 1995; Barberi et al., 2008; Capelli et al., 2008; Di Salvo, 2012), basate anche su modellazioni numeriche (Capelli et al., 2008; Di Salvo et al., 2014).

Tra i principali prodotti esistenti in letteratura deve essere senza ombra di dubbio menzionata l'opera del Prof. Ugo Ventriglia, per anni Direttore dell'Istituto di Geologia Applicata presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza". Egli, infatti, nel 1971 realizzò la monografia dal titolo "La geologia della città di Roma", ancora oggi considerata fondamentale e di riferimento per tutti gli studiosi e i tecnici che operano nell'area urbana.

Tale lavoro nasceva dall'esigenza di implementare la conoscenza delle caratteristiche geologiche del territorio romano, presupposto fondamentale per la pianificazione territoriale, per la programmazione di tutti gli interventi che su di esso si vanno a realizzare, nonché per la valutazione e la gestione dei rischi collegati allo stato del sottosuolo. Se tale premessa è valida in assoluto, nel caso della Città Eterna diviene senza dubbio ancora più evidente: infatti nel corso dei secoli si è spesso edificato prestando minore attenzione alle caratteristiche geologiche e morfologiche dei luoghi, confidando maggiormente nelle nuove possibilità offerte di volta in volta dalle tecnologie.

Nel periodo 1988-1990, l'autore pubblicò il volume "Idrogeologia della Provincia di Roma", in cui prese in considerazione le sub-aree Tolfetana, Vulcanica-Sabatina, Vulcanica dei Colli Albani e settore pre-appenninico. Questi volumi riportano anche le mappe con le ubicazioni delle principali manifestazioni di acque mineralizzate e termali, sia da sorgente che da pozzo.

Nei lavori sopra riportati fu considerato in maniera molto marginale l'assetto idrogeologico dell'area romana. Per questo motivo, l'Amministrazione Provinciale di Roma auspicò e promosse la realizzazione ad opera del prof. Ventriglia di una nuova opera riguardante lo studio della idrogeologia di tutto il Comune di Roma. Nel 2002, con la collaborazione del Servizio Geologico, Difesa del Suolo del Dipartimento I della Provincia di Roma, è stato

pubblicato il lavoro dal titolo “Geologia del territorio del Comune di Roma”. L’autore ha raccolto circa seimila dati relativi a sondaggi, a scavi eseguiti, ad affioramenti, in modo che, con l’interpretazione ragionata dei vari dati, è possibile per ogni sito del Comune tracciare le sezioni geo-litologiche almeno fino alla profondità che può interessare i tecnici. Inoltre, è stato dato ampio sviluppo alla trattazione sulle cavità sotterranee e, per quanto riguarda l’idrogeologia, all’analisi dei bacini idrografici rientranti nell’ambito del Comune di Roma, alle loro caratteristiche idrologiche, alla portata massima prevedibile per determinati tempi di ritorno (20, 50 e 100 anni), alla pericolosità dei bacini ecc. Nello stesso volume sono state indicate le curve isofreatiche e le principali direzioni di deflusso delle acque superficiali circolanti nell’ambito del Comune.

Lo studio recente più completo ed esauriente sull’assetto idrogeologico della città di Roma è stato effettuato da Capelli et al., 2008; da tale ricerca derivano la maggior parte delle informazioni riportate, a volte anche in maniera integrale, in questo capitolo.

Gli autori hanno identificato, tramite la raccolta, la validazione e l’archiviazione di molte centinaia di log stratigrafici e di molte decine di profili geologici, i complessi acquiferi presenti nei vari municipi di Roma e le unità idrogeologiche a cui essi appartengono e che definiscono la loro possibilità di ricarica. In particolare sono state ricostruite, con l’ausilio della modellazione numerica, le superfici dei complessi idrogeologici principali dell’Unità Albana su cui la Città di Roma si estende ampiamente. Nel corso di una campagna di rilevamento durata alcuni mesi è stato definito lo scenario piezometrico aggiornato al 2006, mediante il rilevamento di un migliaio di pozzi e piezometri. Nella fase sperimentale sono state altresì rilevate le portate delle sorgenti e dei corsi d’acqua perenni e drenanti ricadenti nell’area di studio. Analizzando la carta idrogeologica e i numerosi profili riportati, si possono osservare i rapporti esistenti tra la circolazione sotterranea, definita al tetto della falda basale, e il reticolo idrografico.

Recentemente, Di Salvo et al. (2012) hanno presentato un modello idro-stratigrafico per il settore centro-settentrionale della città di Roma, basandosi su analisi geologiche e idrogeologiche (circa 300 logs di alta qualità provenienti dai 1800 pozzi esistenti) rivisitate e analizzate utilizzando la piattaforma GIS. In particolare, gli Autori, hanno definito cinque complessi idro-stratigrafici, dalle argille di Monte Vaticano (Complesso 1) fino ai terreni di riporto di origine antropica (complesso 5), analizzando con grande dettaglio le loro caratteristiche idrogeologiche, con particolare riguardo alla conduttività idraulica. Gli Autori propongono cinque sezioni idrogeologiche, ottenute georeferenziando e digitando tutti i dati in loro possesso tramite uno strumento ArcGis; tali sezioni, molto dettagliate, riportano anche le

principali faglie dell'area, alcune note a altre solo ipotizzate in base ai contatti non stratigrafici tra le varie Unità geologiche.

Di Salvo et al., 2014 descrivono una metodologia per la stima della risorsa idrica sotterranea in una valle alluvionale (quella del Tevere) in un'area urbana (quella di Roma) caratterizzate da un assetto idro-stratigrafico complesso. La valutazione proposta è effettuata tramite un modello numerico 3D (Modello Roma). Particolare attenzione è stata rivolta alla stima del bilancio idrico delle alluvioni del Tevere, e ai rapporti idrologici tra queste ultime e gli acquiferi confinanti. Il modello numerico utilizzato ha permesso la stima dei differenti contributi (ricarica meteorica, fiumi e acquiferi) al flusso idrico sotterraneo della Valle del Tevere e dell'intera area in studio.

2.2 Le unità idrogeologiche del territorio romano

L'assetto idrogeologico e lo schema di circolazione delle acque sotterranee nel territorio di Roma sono condizionati dall'assetto strutturale, dai rapporti di scambio idrico tra cinque diverse Unità Idrogeologiche e dalla presenza di due importanti corsi d'acqua perenni.

Le depressioni e le elevazioni strutturali, unitamente alle differenti permeabilità che caratterizzano alcuni principali complessi litologici, determinano i limiti tra i grandi acquiferi e le linee di flusso delle acque sotterranee in essi presenti.

Nel territorio comunale si incontrano domini geologici diversi, che danno luogo a cinque Unità Idrogeologiche (**figura 2.1**):

- Unità Idrogeologica dei Monti Sabatini
- Unità Idrogeologica dei Colli Albani
- Unità Idrogeologica di Ponte Galeria
- Unità Idrogeologica dei depositi alluvionali recenti e attuali
- Unità Idrogeologica del Delta del Fiume Tevere

I molteplici acquiferi presenti in queste idro-strutture hanno una circolazione complessa che tende a raccordarsi con le quote dei livelli di base fondamentali, costituiti dai Fiumi Tevere, Aniene ed il mare. Le Unità Idrogeologiche del territorio romano sono limitate inferiormente dalla formazione di Monte Vaticano e dai livelli inferiori della formazione di Monte Mario che, essendo costituite prevalentemente da termini argillosi, fungono da aquiclude rendendo, di fatto, impossibile alcuna circolazione idrica al di sotto di esse. Le stesse unità acquifere vengono in parte ricaricate anche da aree esterne all'ambito comunale. Il tetto del complesso argilloso

presenta una superficie fortemente articolata, derivante dalle condizioni morfo-strutturali e dall'azione di modellamento del reticolo idrografico antecedente alla messa in posto dei depositi vulcanici. La circolazione delle acque sotterranee, negli acquiferi maggiormente profondi, è influenzata dalla presenza di questo complesso a bassissima permeabilità.

Nel seguito vengono descritte le caratteristiche stratigrafiche e strutturali delle Unità Idrogeologiche citate, sulla base di alcuni profili, la cui traccia è riportata in **figura 2.2**.

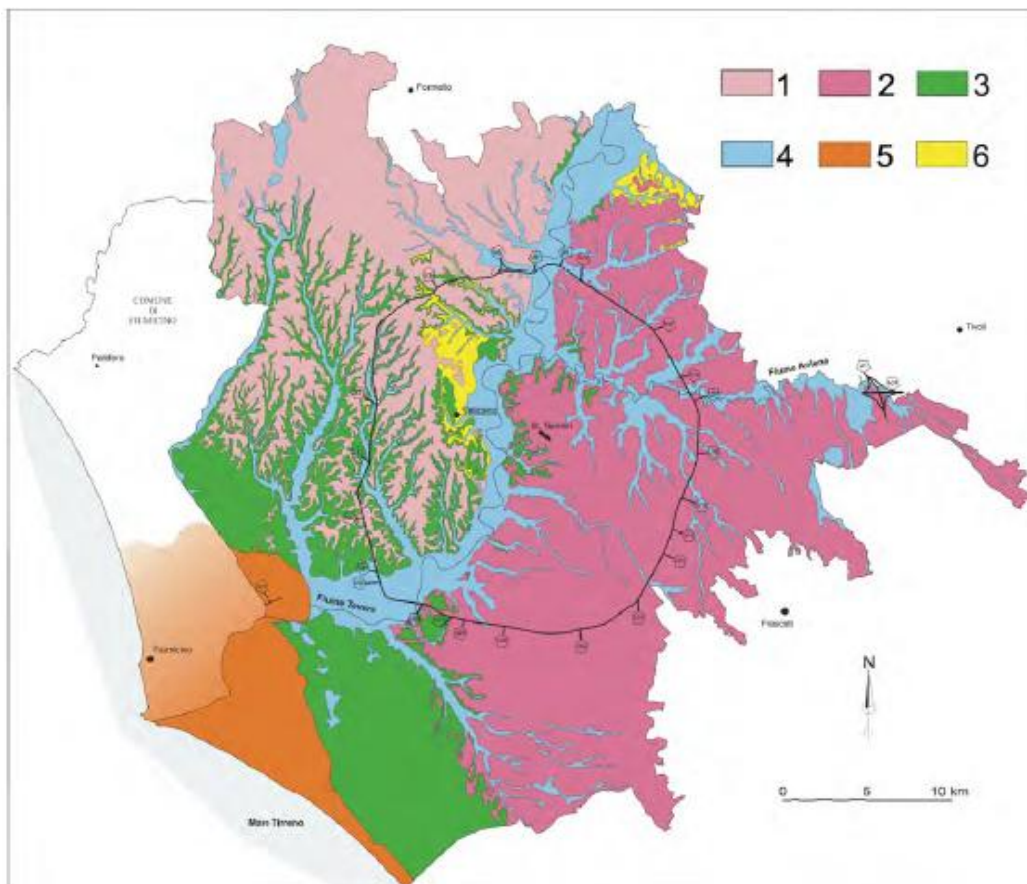


Figura 2.1. Carta delle Unità Idrogeologiche del territorio romano (Capelli et al., 2008). La linea nera continua rappresenta il Grande Raccordo Anulare (G.R.A.) e delimita l'area investigata nel presente lavoro. Unità idrogeologiche: (1) dei Monti Sabatini; (2): dei Colli Albani; (3): di Ponte Galeria; (4): dei depositi alluvionali recenti e attuali; (5): del delta del delta del Fiume Tevere; (6): Complesso idrogeologico dei depositi argilloso-marnosi a bassa permeabilità.

2.2.1 Unità idrogeologica dei Monti Sabatini

Il drenaggio dell'Unità Sabatina verso il settore tiberino, su cui si estende la Città di Roma, pur costituendo un'interessante risorsa non è molto consistente, anche a seguito del modesto spessore dei depositi (qualche metro) e della loro limitata continuità laterale (**figure 2.3, 2.4 e 2.5**). Inoltre la circolazione sotterranea alimentata dalle vulcaniti interferisce, in questo settore, con complessi geologici che, per le loro caratteristiche, ne condizionano le direttrici.

Sulla riva destra del Tevere, l'alto strutturale di Monte Mario (**figura 2.6**), formato prevalentemente da rocce a bassissima permeabilità, determina una divergenza del flusso idrico sotterraneo verso sudovest e verso nord-est.

Studi recenti (Capelli e Mazza, 2005; Capelli *et al*, 2005) hanno riconosciuto nei Monti Sabatini tre bacini idrogeologici:

1) Bacino Idrogeologico dei Monti Sabatini a sud dei Monti della Tolfa; 2) Bacino Idrogeologico dei Monti Sabatini orientali; 3) Bacino Idrogeologico dei Monti Sabatini nord occidentali.

Il flusso proveniente dal bacino 1) alimenta i settori più meridionali dei Fossi Galeria e Magliana, mentre la circolazione sostenuta dal bacino 2) determina il flusso di base dei Fossi della Mola (Cremera – Valchetta) e dell'Acquatraversa. I drenaggi verso questi ultimi corsi d'acqua risultano decisamente superiori ai precedenti e possono raggiungere portate ordinarie complessive di circa 800 l/s.

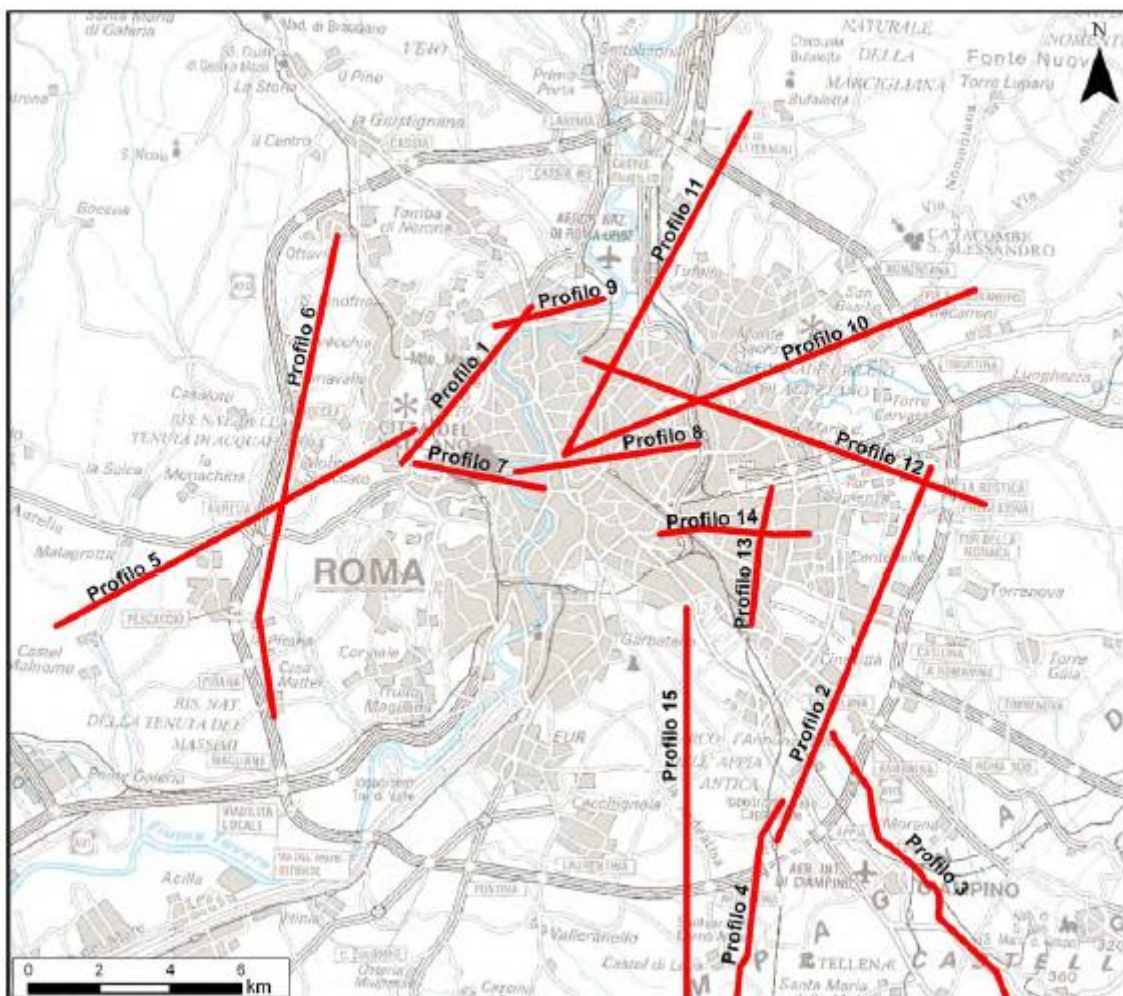


Figura 2.2. Ubicazione dei profili geologici. (Capelli *et al.*, 2008).

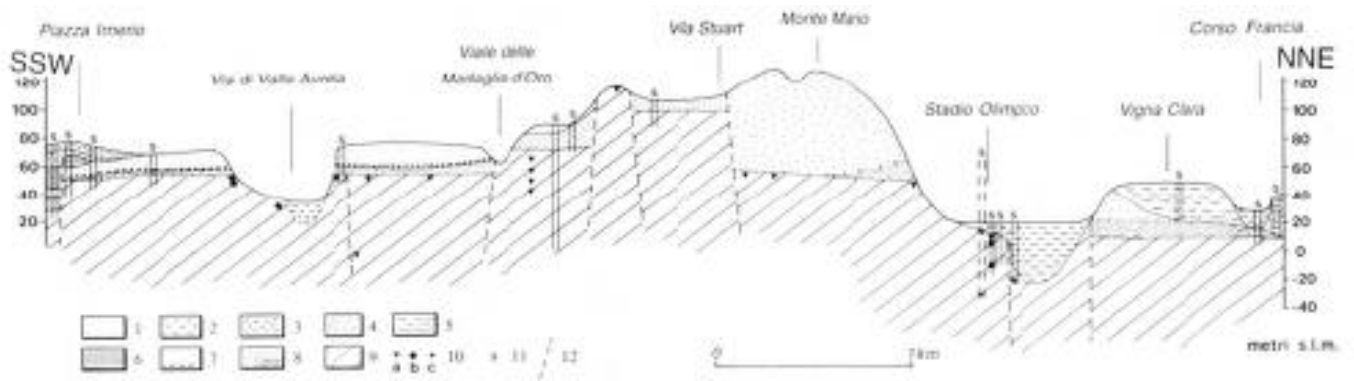


Figura 2.3. Profilo geologico n.1 (Capelli et al., 2008).

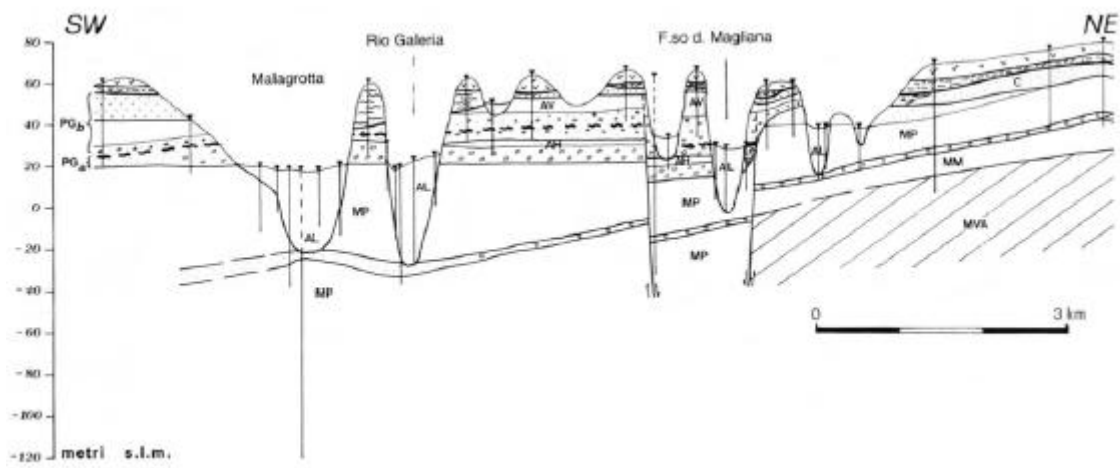


Figura 2.4. Profilo geologico n.5 (Capelli et al., 2008).

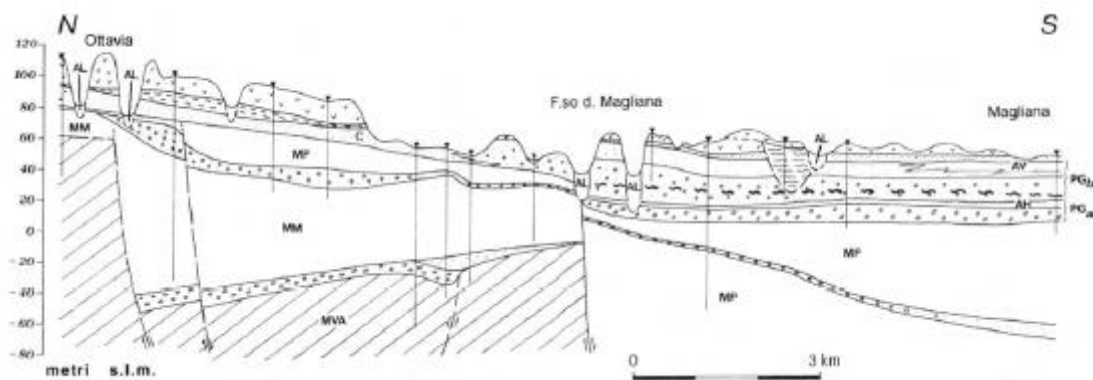


Figura 2.5. Profilo geologico n.6 (Capelli et al., 2008).

2.2.2 Unità idrogeologica dei Colli Albani

Ben diverso potenziale offre l'Unità Idrogeologica Albana su cui il Comune di Roma si estende ampiamente, soprattutto nel settore in riva sinistra del Tevere. In questo dominio, essendo il substrato argilloso prevulcanico mediamente molto depresso come quota, gli acquiferi risultano caratterizzati da elevato spessore e drenano verso i Fiumi Tevere e Aniene senza trovare particolari ostacoli alla circolazione idrica sotterranea (**figure 2.6 e 2.7**). Particolarmente elevato (fino a 20-40 metri) risulta lo spessore della coltra vulcanica nel settore sud-orientale della capitale (Appio-Tuscolano-Tor Sapienza, fig. 6). Nel territorio comunale i corsi d'acqua perenni alimentati dalla falda regionale albana sono numerosi e di portata sostenuta. Tra i principali vanno ricordati i Fossi di: Malafede, Vallerano, Acqua Acetosa, Cecchignola, Vigna Murata, Tor Carbone, Almone, Acqua Mariana, Caffarella, Giardino, Centocelle, Tor Sapienza, Osa.

Oltre al drenaggio nei corsi d'acqua sopra riportati l'Unità Albana sostiene il deflusso dei Fiumi Tevere e Aniene. Pur non esistendo studi specifici sulla valutazione degli interscambi falda-fiume relativamente a questi ultimi, sulla base di calcoli empirici si ritiene che i Colli Albani cedano ai due fiumi mediamente nell'anno dai 4 ai 5 m³/s.

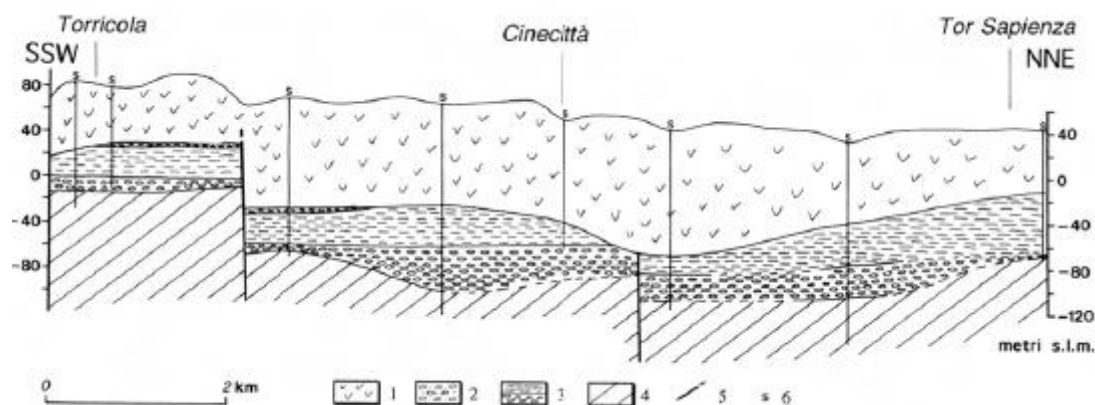


Figura 2.6. Profilo geologico n.2 (Capelli et al., 2008).

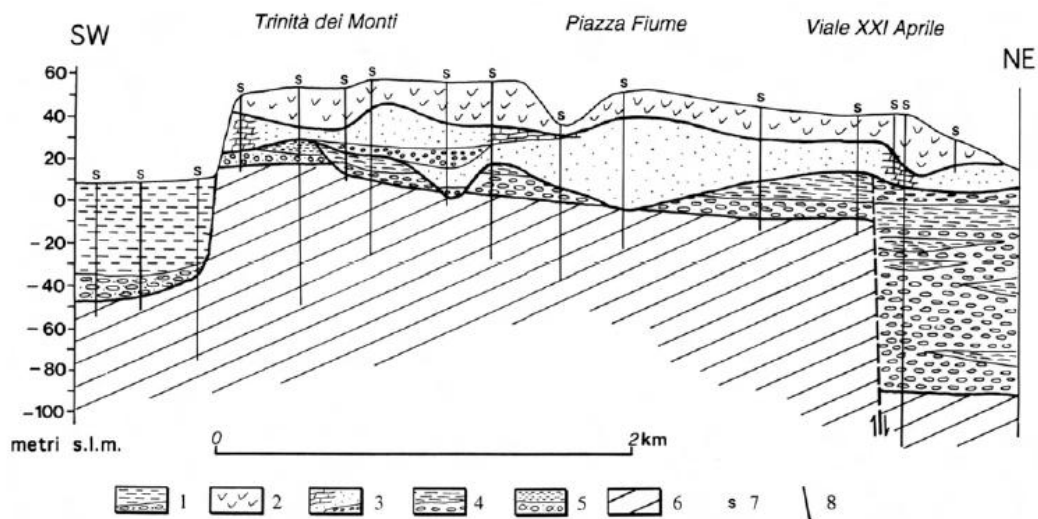


Figura 2.7. Profilo geologico n.8 (Capelli et al., 2008).

2.2.3 Unità idrogeologica di Ponte Galeria

L'Unità Idrogeologica di Ponte Galeria, estesa nel territorio romano per circa 100 Km², affiora esclusivamente nel settore ovest della capitale (riva destra del Tevere, **figure 2.1, 2.8 e 2.9**). Essa ospitava fino agli anni sessanta due acquiferi principali: 1) l'acquifero a falda libera legato al banco di ghiaie superiore; 2) l'acquifero a falda confinata contenuto nel sottobanco o banco inferiore. Questo gergo minerario è legato al fatto che si sta considerando un'area estrattiva. A seguito di questa attività il "consumo di territorio" ha portato, in quaranta anni di coltivazione mineraria, alla perdita irreversibile di centinaia di milioni di m³ di materiale solido e, con essi, anche di falda. Tuttavia ancora oggi i Fossi della Magliana e di Ponte Galeria e altri minori sono perenni.

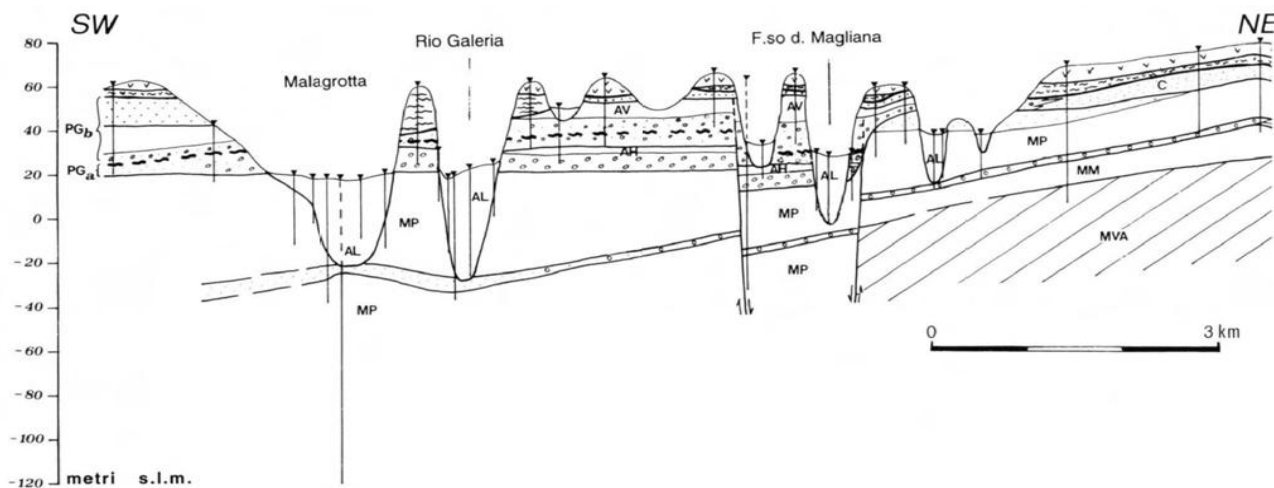


Figura 2.8. Profilo geologico n.5 (Capelli et al., 2008).

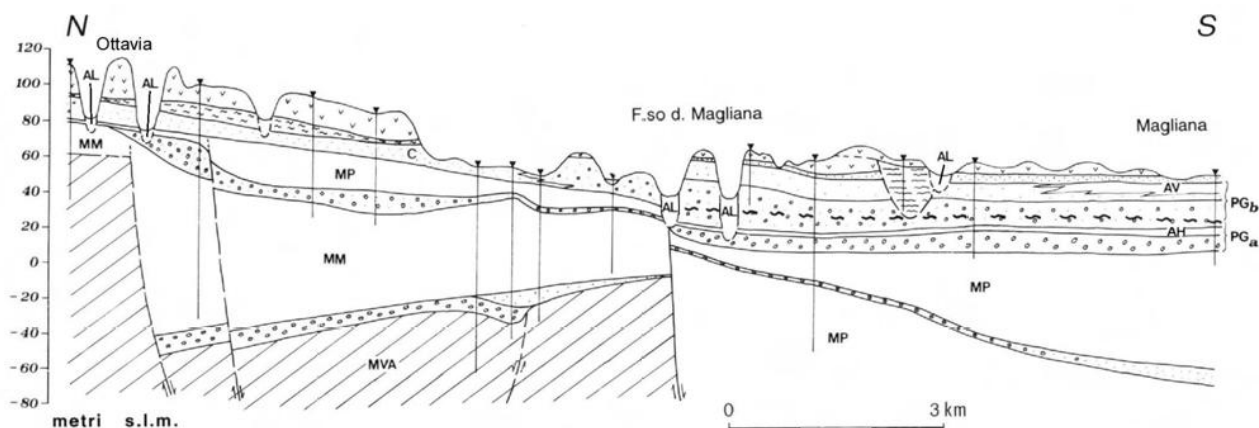


Figura 2.9. Profilo geologico n.6 (Capelli et al., 2008).

2.2.4 Unità idrogeologica dei depositi alluvionali recenti e attuali

La Valle del Fiume Tevere, all'interno del territorio del Comune di Roma, è prevalentemente incisa

nel complesso delle argille e marne plio-pleistoceniche. Gli spessori del complesso tiberino sono compresi tra i 40 e gli 80 metri. La serie è essenzialmente limoso-sabbiosa, ma presenta anche potenti livelli sabbiosi e ghiaiosi. Il termine ghiaioso si trova alla base della serie, sopra le argille plioceniche. Esso ospita una importante falda confinata, caratterizzata da una notevole continuità laterale. E' probabile che questo orizzonte sia ricaricato lateralmente dalle unità idrogeologiche incise dal Tevere; infatti l'acquifero dei conglomerati è molto sfruttato all'interno del territorio urbano e la potente copertura di argille molli e limi argillosi non può consentire una ricarica significativa da parte del fiume e delle precipitazioni. Per l'importanza economica che ha assunto, questo acquifero meriterebbe di essere studiato approfonditamente, così come altri corpi idrici minori presenti all'interno della Città di Roma.

2.2.5 Unità idrogeologica del delta del fiume Tevere

Come l'Unità dei depositi alluvionali, anche l'Unità dei depositi deltizi presenta acquiferi di vario tipo e potenziale; tra questi ricordiamo: 1) l'acquifero delle ghiaie e delle sabbie; 2) l'acquifero delle sabbie; 3) l'acquifero dei silt sabbiosi; 4) l'acquifero delle sabbie dunari.

Tale Unità non affiora nell'area investigata nel presente studio.

2.3 Complessi idrogeologici

In relazione alla cartografia geologica del Progetto CARG, e sulla base delle caratteristiche fisiche e sedimentologiche dei vari termini della serie affioranti e non, sono stati definiti dei complessi litologici che raggruppano formazioni tra loro idrogeologicamente omogenee (Capelli et al., 2008). Ogni complesso, quindi, presenta in grande una peculiare capacità trasmissiva e di immagazzinamento.

Dal punto di vista idrogeologico, i complessi che rivestono maggiore interesse sono quelli appartenenti alle due serie riconosciute come formazione di Ponte Galeria (“Unità del Paleotevere 1”), formazione del Fosso della Crescenza e formazione di S. Cecilia (“Unità del Paleotevere 2”). Oltre a queste, soprattutto nel settore sud-orientale, sono sede di importanti falde i depositi vulcanici relativi all’attività tuscolano-artemisia del Distretto Vulcanico Albano.

Nel seguito vengono descritti nel dettaglio, dal più antico (Pliocene) al più recente (olocene), i diversi complessi su cui si basa lo schema idrogeologico della Città di Roma (in **figura 2.10** un esempio riferito al centro storico di Roma, Corazza et al., 1999).

2.3.1 Complesso delle argille di Monte Vaticano

Il complesso è costituito da argille marnose grigie e grigio azzurre stratificate, da consolidate a molto consolidate, appartenenti alla formazione di Monte Vaticano. In relazione agli spessori sempre notevoli che esso presenta in tutto il territorio romano (alcune centinaia di metri, fino ad un massimo di 873 metri come riscontrato nella perforazione dell’AGIP denominata “Roma 1”, ubicata al Circo Massimo) e al bassissimo valore di permeabilità che lo caratterizza (coefficiente k dell’ordine di 10^{-10} - 10^{-8} m/s; Corazza et al., 1999), il complesso assume la funzione di acquiclude per tutte le formazioni acquifere, rendendo praticamente impossibile ogni circolazione di acqua al di sotto di esso.

2.3.2 Complesso delle argille sabbiose, limi sabbiosi e sabbie

Alternanze di argille sabbiose, limi sabbiosi e sabbie relative alla formazione di Monte Mario, membro di Farneto, e alla formazione di Ponte Galeria, litofacies argilloso-sabbiosa, e membro della Pisana, litofacies argillosa. E’ presente estesamente su tutta la riva destra del Tevere. Nel bacino estrattivo dei Fossi Galeria e Magliana il complesso affiora nelle superfici di scavo attive e abbandonate. E’ caratterizzato da una permeabilità assai scarsa (coefficiente k compreso tra 10^{-6} e 10^{-8} m/s, Corazza et al., 1999).

PERIODI	ETA' (MA)	GEOLOGIA	LITOLOGIA	COMPORTEMENTO GEOMECCANICO PREVALENTE
Recente ed attuale		TA - TERRENI ANTROPICI Riperti antropici antichi e recenti ed alluvioni storiche	TA - Terreni antropici con elementi eterometrici ed eterogenei, in matrice sabbiosa-limosa; variabile addensamento e/o consistenza; permeabilità molto variabile	comportamento geomeccanico variabile da coesivo ad attritivo, in assetto caotico; variabile deformabilità
Olocene-Pleistocene sup.	< 0.02	All - ALLUVIONI RECENTI Depositi alluvionali recenti del Tevere e dei suoi affluenti, con sedimenti limo-argillosi e sabbiosi. Presenza di componenti di natura piroclastica e di orizzonti organici. Ambienti deposizionali di tipo fluviale, fluvio-palustre e fluvio-lacustre.	LAV - Limi argillosi e argille limose marroni e verdastre; mediamente consistenti; mediamente-poco permeabili	comportamento geomeccanico coesivo; media deformabilità
			SLV - Sabbie limose e limi sabbiosi grigio-verdastri; poco addensate e/o consistenti; mediamente permeabili	comportamento geomeccanico congiuntamente attritivo-coesivo
			S - Sabbie medio-grossolane e localmente medio-fini, grigiastre; mediamente addensate; permeabili	comportamento geomeccanico attritivo; media deformabilità
			AG - Argille limose e limi argillosi grigiastri, con livelli organici; poco consistenti fino a circa 30-35 m. dal p.c. (AG2), mediamente consistenti a quote inferiori (AG1); permeabilità da bassa a molto bassa	AG2: comportamento geomeccanico coesivo; elevata deformabilità AG1: comportamento geomeccanico coesivo; medio-elevata deformabilità
			SLG - Sabbie limose grigiastre, più o meno torbose; da mediamente a poco addensate; mediamente permeabili	comportamento geomeccanico attritivo; medio-elevata deformabilità
	< 0.022	G - GHIAIE DI BASE Deposito ghiaioso legato alla fase erosiva precedente all'alluvionamento olocenico.	G - Ghiaie sabbiose molto evolute di dimensioni centimetriche; molto addensate; molto permeabili	comportamento geomeccanico attritivo; bassa deformabilità
Pleistocene medio-superiore e medio-inferiore	0..2-0.8	DEPOSITI PLEISTOCENICI CONTINENTALI - Depositi piroclastici provenienti dal vulcano dei Colli Albani - Depositi fluvio lacustri del Paleotevere 1 e Paleotevere 2	- Piroclastiti di ricaduta e di deposito da colata piroclastica - Ghiaie, sabbie ed argille	
Pleistocene inferiore	1.2-1.6	DEPOSITI PLEISTOCENICI MARINI E CONTINENTALI - Unità di Monte Mario - Unità di Monte Ciocci	Argille, sabbie, ghiaie	
Pliocene sup.	>1.8	Apl - UNITA' DEL MONTE VATICANO Depositi limo-argillosi con intercalazioni sabbiose e faune a planctonici; ambiente marino.	Apl - Argille grigio-azzurre, con livelli sabbiosi grigiastri; molto consistenti; permeabilità da bassa a molto bassa	comportamento geomeccanico coesivo, sovraconsolidate, bassa deformabilità

Figura 2.10. Sequenza stratigrafica riferita al centro storico di Roma (Da Corazza et al., 1999).

2.3.3 Complesso delle sabbie grossolane delle formazioni di Monte Mario e di Ponte Galeria

E' costituito da sabbie grossolane, sabbie sciolte in alternanza a livelli di limi, appartenenti al membro della Farnesina della formazione di Monte Mario e al membro della Pisana, litofacies sabbiosa, della formazione di Ponte Galeria. Il complesso, che risulta mal

ricaricato, ha una permeabilità che varia a seconda dei diversi livelli, ma che nell'insieme può essere considerata come media (coefficiente k compreso tra 10^{-4} e 10^{-6} m/s, Corazza et al., 1999).

2.3.4 Complesso delle argille sabbiose, relative alle formazioni di Monte delle Piche e di Ponte Galeria

Argille tabulari fortemente diffuse nel sottosuolo di tutto il settore sud occidentale, ma scarsamente affioranti, appartenenti alla formazione di Monte delle Piche e di Ponte Galeria. Esse sono probabilmente in continuità con le argille grigie e grigio-azzurre della formazione di Monte Vaticano. Permeabilità e circolazione sotterranea limitatissime.

2.3.5 Complesso delle ghiaie e delle sabbie relative alla formazione di Ponte Galeria

Genericamente costituito da conglomerati basali, con matrice scarsa, o più abbondante, presenti nel sottosuolo di tutto il settore sud occidentale, ma non affioranti se non a seguito dell'attività di coltivazione mineraria del bacino dei Fossi di Galeria e Magliana. Nel settore di Ponte Galeria, tra i Fossi Magliana e Malagrotta, il complesso è caratterizzato dalla presenza di livelli sabbiosi a matrice scarsa. Al complesso, che è saturato da una falda libera di elevato potenziale, si attribuisce una elevata permeabilità.

2.3.6 Complesso della successione di ghiaie e clasti calcarei e silicei della formazione del Fosso della Crescenza

Ghiaie fluviali embricate, associabili alle facies del Paleotevere 2, con livelli limosi nella parte alta. Il complesso è presente nel settore nord orientale della città ed è osservabile in affioramento con spessori fino a 40 metri nella valle del Fosso della Crescenza. In sondaggio il complesso è stato attraversato fino a spessori di 100 metri nella zona di Monte Sacro. I depositi risultano molto permeabili e sono caratterizzati da una circolazione a volte in pressione.

2.3.7 Complesso fluvio palustre di S. Cecilia

Il complesso è costituito da litoformazioni estremamente differenziate (da ghiaie a limi) ed è caratterizzato dalla presenza di materiale vulcanico. Il complesso poggia su una superficie erosiva ad alto rilievo e presenta spessori massimi in corrispondenza di quelli dei depositi attuali dei Fiumi Aniene e Tevere. Esso è caratterizzato da scarsi valori di permeabilità ed è sede di scambio idraulico tra i *plateaux* vulcanici e i depositi fluviali degli attuali corsi d'acqua.

2.3.8 Complesso dei Tufi Pisolitici

Vulcaniti relative al Distretto Vulcanico Albano, di cui rappresentano le colate piroclastiche più antiche, cosiddetti Tufi Pisolitici e Tufi Terrosi. La permeabilità che caratterizza questo complesso è assai bassa e la presenza, tra i diversi corpi vulcanici, di orizzonti anche fortemente pedogenizzati, contribuisce ulteriormente ad abbassare la conducibilità idraulica verticale.

2.3.9 Complesso Vulcanico Sabatino

Il complesso è costituito dall'insieme delle vulcaniti derivate dall'attività del Distretto Vulcanico Sabatino. Si tratta prevalentemente di colate piroclastiche di facies distale, spesso fortemente alterate e di depositi di ricaduta indifferenziati. Granulometricamente i depositi sono assimilabili a sabbie fini, con abbondante presenza di matrice limosa e livelli pedogenizzati. Nell'insieme la permeabilità del complesso è da media a medio-bassa, ma è caratterizzata da elevate eteropie laterali e verticali che producono variazioni locali del coefficiente idraulico.

2.3.10 Complesso della formazione di Valle Giulia

Travertini, fitoclastici in banchi inglobanti lenti di sabbie vulcaniche rimaneggiate; sabbie e limi sabbiosi a concrezione carbonatiche; livelli di ghiaie minute poligeniche. La permeabilità varia da valori medi a medio elevati, ma data la limitata estensione in affioramento, il complesso non ha rilevanza sulla circolazione idrica sotterranea.

2.3.11 Complesso delle Pozzolane Rosse e delle Pozzolane Nere

Il complesso è costituito da depositi di colata piroclastica genericamente massivi e caotici, prevalentemente litoidi messi in posto dall'attività del Distretto Vulcanico Albano, con spessori medi nell'ordine dei 20 metri e valori massimi di circa 40. Il complesso è caratterizzato da una permeabilità variabile da media a medio-alta per porosità e secondariamente per fratturazione. La permeabilità verticale è condizionata dalla presenza di paleosuoli molto estesi e spesso con potenze di ordine metrico. Ove le vulcaniti hanno subito un processo di zeolitizzazione la permeabilità risulta nettamente minore. Questo complesso idrogeologico costituisce il principale acquifero dell'intera Città di Roma, in particolare nell'area in riva sinistra del Tevere, dove il complesso è estesamente diffuso con spessori continui e rilevanti. Tale caratteristica conferisce un'elevata continuità alla falda ospitata dal complesso e alla circolazione in essa presente.

2.3.12 Complesso della formazione del Fosso del Torrino

Ghiaie, sabbie e limi poligenici in facies fluviale e fluvio-lacustre con rapide variazioni laterali di facies, caratterizzate dalla presenza di elementi vulcanici; si riconosce un evento deposizionale discreto (*debris flow* con abbondante matrice limosa) corrispondente al Conglomerato Giallo in forte eteropia laterale con il precedente. I valori di permeabilità relativa sono medio-bassi e le particolari modalità di messa in posto all'interno di paleo depressioni fluviali, determinano una canalizzazione dei flussi idrici sotterranei.

2.3.13 Complesso del Tufo Lionato

Deposito da colata piroclastica, massivo e caotico, localmente mal stratificato, litoide per effetto della zeolitizzazione. E' costituito da due facies sovrapposte appartenenti all'attività del Distretto Vulcanico Albano: una inferiore con abbondante matrice cineritica e una superiore più grossolana. Per affinità litologiche in questo complesso viene associata la formazione di Fontana Centogocce affiorante nel settore nord-orientale della città. I valori di permeabilità sono mediamente scarsi, ma essendo il complesso caratterizzato a luoghi da fenomeni di intensa fratturazione, il parametro può assumere localmente valori più elevati. Il ruolo idrogeologico del complesso è quello di un acquitardo che separa la circolazione più superficiale da quella più profonda, spesso semiconfinata.

2.3.14 Complesso delle Pozzolanelle

Deposito massivo e caotico, da incoerente a litoide. Generalmente questa unità piroclastica presenta una matrice scoriacea cineritico grossolana, ma povera della frazione cineritica fine. Questo complesso comprende anche sabbie e ghiaie generalmente a stratificazione incrociata e a festoni, da classate a malclassate, malstratificate in facies fluviale e da flusso iperconcentrato, derivanti dal rimaneggiamento del medesimo complesso di deposizione primaria e del complesso del Tufo Lionato. In relazione ai valori di permeabilità medi o medio-alti, all'estensione e spessore del complesso, nonché alla posizione stratigrafica, esso può ospitare falde libere di discreta potenzialità. Nel quadrante sud orientale della città il complesso ospita una delle falde più utilizzate.

2.3.15 Complesso della formazione Aurelia

Il complesso è costituito da ghiaie e sabbie quarzose da fini a grossolane a laminazione incrociata, che passano verso l'alto a limi argillosi avana grigiastri con frustoli vegetali.

L'ambiente di formazione è fluvio-lacustre e presenta fenomeni di pedogenesi nella parte alta del deposito.

In relazione alla sua limitata estensione (lungo le valli dei corsi d'acqua principali) e alla presenza di termini pelitici nella parte alta della formazione, il complesso presenta una scarsa possibilità di ricarica. Di conseguenza pur dotato di una permeabilità media e/o medio-alta, ospita acquiferi di interesse locale.

2.3.16 Complesso delle lave

Il complesso comprende i diversi depositi lavici presenti nella serie albana in diverse posizioni stratigrafiche: le lave di Vallerano e le lave della formazione di Capo di Bove comprensive delle litofacies piroclastiche.

Il complesso presenta un elevato valore di permeabilità per fratturazione, ma costituisce un acquifero significativo solo quando i depositi hanno una rilevante estensione e una posizione stratigrafica che li colloca alle quote in cui è presente la circolazione regionale (lave di Vallerano).

2.3.17 Complesso delle ghiaie e sabbie della formazione di Vitinia e dell'unità di Saccopastore

Il complesso è costituito da ghiaie, sabbie e limi, con elementi vulcanici che a volte presentano una giacitura di terrazzo fluviale. La permeabilità in massa è elevata. In relazione agli spessori e alla conformazione geometrica dei depositi il complesso ospita delle falde discontinue, di interesse locale.

2.3.18 Complesso del Peperino di Albano, dell'unità di Valle Marciana e della formazione del Tavolato

Nel complesso vengono accorpati i depositi appartenenti all'attività finale dei Colli Albani sia di deposizione primaria, costituita prevalentemente da cineriti, sia da prodotti rimaneggiati. In considerazione del fatto che nell'area di studio i depositi hanno una posizione stratigrafica sommitale e che le estensioni, gli spessori e il grado di permeabilità sono modesti, risulta che il complesso ha una scarsa rilevanza idrogeologica.

2.3.19 Complesso dei depositi lacustri e delle alluvioni oloceniche

Il complesso comprende i depositi alluvionali dei principali corsi d'acqua e quelli alluvionali in evoluzione all'interno delle arginature artificiali del Fiume Tevere e del Fiume Aniene. Nell'insieme si tratta di depositi di riempimento, siltoso-sabbiosi con discreta componente pelitica e livelli di torbe. Alla base dei depositi alluvionali sono presenti livelli di ghiaie più o meno potenti. I valori di permeabilità sono mediamente scarsi e praticamente assenti sono eventuali livelli di saturazione se non in relazione ai depositi ghiaiosi basali, da molto a mediamente permeabili (coefficiente k compreso tra 10^{-4} e 10^{-5} m/s), Corazza et al., (1999), che sono sede di una falda in pressione. La ricarica dei depositi grossolani di fondo è legata alla continuità idraulica che essi hanno con corpi acquiferi esterni alle serie alluvionali.

2.3.20 Complesso dei depositi antropici olocenici

Depositi eterogenei dovuti all'ammassamento e allo spostamento dei materiali per rilevati stradali, ferroviari, terrapieni, colmate. La permeabilità del complesso è media e, in base all'indicazione di molti piezometri, essi risultano spesso sede di una circolazione superficiale, a volte alimentata nuovamente anche dai versanti dei rilievi.

2.3.21 Complesso dei depositi di discarica di cava

Depositi dovuti all'accumulo dei materiali di risulta delle cave, con spessori fino a 30 m. Questi depositi sono particolarmente estesi nel bacino estrattivo di Ponte Galeria e sono prevalentemente costituiti dalle frazioni più fini della serie omonima. La rilevanza idrogeologica di questo complesso consiste nel fatto che, essendo caratterizzato da scarsi valori di permeabilità, la sua collocazione determina un'alterazione della circolazione idrica di superficie, aumentando i rischi di piena e/o disturbando la circolazione idrica sotterranea con locali deviazioni delle linee di drenaggio.

3. Geochimica dei fluidi nell'area romana: stato dell'arte

3.1 Studi pregressi

Come già riportato nel capitolo precedente, in letteratura sono presenti pochi studi di carattere geochimico sulle acque di sottosuolo dell'area romana; inoltre, i dati riportati riguardano essenzialmente i parametri chimico-fisici e il chimismo, senza mai considerare, ad es. l'aspetto isotopico. A volte si tratta di opere contenenti una enorme mole di dati frutto di raccolte bibliografiche, censimenti e misure sul campo, a volte si tratta di lavori di tesi e tesine universitarie o relazioni geologiche tecniche con un numero limitato di osservazioni, aventi una valenza molto locale in quanto riferiti a settori limitati della città. Di seguito verranno illustrate, in ordine cronologico, le principali caratteristiche di questi studi e gli obiettivi da essi raggiunti.

- Novarese, nel 1926 riporta due episodi di degassamento che avevano interessato settori differenti dell'area urbana di Roma: *i*) nel 1893, durante l'esecuzione dei lavori per il Palazzo di Giustizia a Roma (Piazza Cavour), si verificò una fuoriuscita di anidride carbonica durante un saggio di scavo a una profondità di circa 6,50 m; *ii*) nel 1923, nella Tenuta della Marcigliana, a nord-est della città, in un pozzo nelle sabbie alluvionali fuoriuscì anidride carbonica che fece sospendere lo scavo. Curioso è il modo con il quale venne identificato il tipo di gas: "Poiché alla bocca del pozzo non si avvertivano odori era facile supporre che si trattasse di emanazioni di anidride carbonica. Ed infatti calata lentissimamente insieme allo scandaglio una candela accesa, dopo 8 m la luce si affievolì e poi si spense alla profondità di 9 m. Ripetuto l'esperimento più volte, restò assodato che l'emanazione era accumulata al fondo del pozzo per m 2,20".

- Camponeschi & Nolasco (1982), nella sezione dedicata alle risorse naturali di Roma e dei Colli Albani, presentano una ricchissima raccolta omogenea ed elaborata dei dati fino ad allora conosciuti (sia da letteratura che tramite ricerca diretta dei dati di campagna) riguardanti manifestazioni sorgentizie o incontrate in sondaggio di acque mineralizzate fredde (T all'emergenza < 20°C) e termali (T all'emergenza ≥ 20°C). In particolare, per la città di Roma l'area presa in considerazione è quella compresa tra il Tevere alla sua confluenza con l'Aniene a nord e il settore meridionale del Grande Raccordo Anulare (tra la Laurentina e la Tuscolana, **figura 3.1**). Per ogni sito (pozzo o sorgente), identificato da un numero d'ordine, sono riportate tutte le informazioni di carattere idrologico ed idrogeologico disponibili (portate delle sorgenti, livello piezometrico nei pozzi, stratigrafia della perforazione) oltre alle caratteristiche chimico-fisiche e chimiche (temperatura, pH, TDS, alcalinità, contenuti dei gas disciolti, durezza,

elementi maggiori, minori e in traccia). Gli autori riportano i dati riferiti a 438 acque mineralizzate fredde e 22 termali in tutta l'area investigata (Roma e i Colli Albani). Nell'area romana solo 2 acque risultano termali (**figura 3.1**): la storica sorgente “Lautole” vicino al colle Palatino, ormai scomparsa, e una delle fonti più famose, la sorgente Acqua Acetosa San Paolo, al Laurentino. Tale sorgente è stata chiusa nel 2004 a causa di infiltrazioni, nella falda, di inquinanti di origine antropica e per la presenza di elevate concentrazioni di arsenico e manganese. Tra le acque mineralizzate fredde gli Autori includono sorgenti molto conosciute nella città di Roma quali l'Appia (oggi chiusa per inquinamento), l'Egeria, Laurentina (chiusa nel 2004 per concentrazioni elevate di arsenico) e, pochi chilometri oltre il raccordo, sulla via Appia, la fonte San Pietro. In questo volume, inoltre sono riportate informazioni circa manifestazioni gassose naturali ora scomparse (p.es. le venute a CO₂ di via dell'Acqua Bullicante, al Prenestino) ed emissioni gassose indotte da attività umana (scavo di pozzi, indagini geognostiche, ecc.) facendo riferimento, a volte, al tipo di gas emesso.

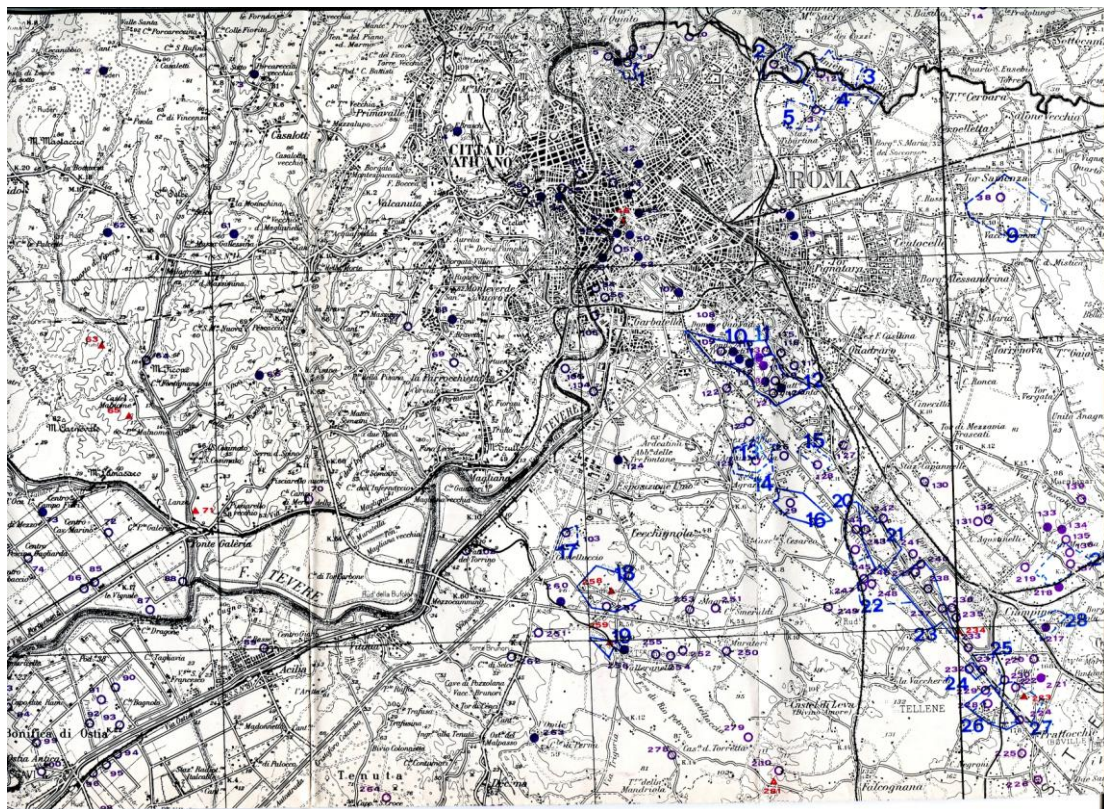


Figura 3.1. Ubicazione delle acque mineralizzate fredde (blu) e termali (rosse) nell'area di Roma (Camponeschi & Nolasco, 1982).

Gli Autori, nelle conclusioni, evidenziano la stretta relazione tra l'ubicazione delle acque e i principali allineamenti tettonici di importanza regionale, riportando, nel contempo, un'ampia

spiegazione inerente la corrispondenza tra le caratteristiche chimiche delle acque, il loro contenuto gassoso e l'assetto tettonico profondo;

- Di Ventriglia, (1990, Regione vulcanica dei Colli Albani) e Ventriglia (2002, Geologia del territorio del comune di Roma) si parlerà nel capitolo dedicato all'idrogeologia del comune di Roma; qui si ricorda che questi due lavori, pubblicati dall'Amministrazione Provinciale di Roma, forniscono un'ampia descrizione, rispettivamente, dell'idrogeologia dell'area dei Colli Albani e dell'area romana. In maniera molto simile rispetto a Camponeschi & Nolasco (1982), Ventriglia (1990) riporta la carta delle manifestazioni termominerali e delle acque mineralizzate fredde (**figura 3.2**), mostrando il tentativo di correlazione tra gruppi di acque e lineamenti tettonici locali e regionali. Ventriglia (2002) è un'opera molto vasta in cui l'Autore mostra lo stato dell'arte delle conoscenze sulla geologia, stratigrafia, caratteristiche geotecniche dei terreni, idrogeologia e sulle cavità sotterranee dell'area urbana. In particolare, l'Autore divide la città di Roma in 7 fogli idrogeologici in cui sono inclusi migliaia di pozzi d'acqua corredati da informazioni quali l'ubicazione (a volte molto sommaria), la stratigrafia, il tipo di falde incontrate, il livello statico, ecc. Tale opera rappresenta ancora oggi il punto di riferimento per gli studiosi dell'assetto geologico superficiale e idrogeologico della città di Roma. Purtroppo, dal punto di vista idrochimico le informazioni sono molto scarse, in quanto nell'opera viene dato solo un rapido accenno (par. 5.4) alle caratteristiche chimiche e chimico-fisiche di un centinaio di acque di sottosuolo (misure speditive di durezza, resistività, residuo secco e cloruri) circolanti nel territorio del Comune di Roma;

- Vivona (2001) ha effettuato una tesi di laurea presso l'INGV sulla valutazione del *Natural Gas Hazard* (CO₂ e radon) nel settore sud di Roma (Trigoria, Vallerano, Valleranello) e del versante settentrionale dei Colli Albani (Ciampino, Marino, Frascati). Per raggiungere tale obiettivo è stata studiata la caratterizzazione chimica e isotopica (carbonio) delle acque di sottosuolo circolanti nell'area di interesse. Su un totale di 158 acque campionate, 28 ricadono nell'area presa in considerazione nel presente lavoro.

- Lanzarone (2003), per un saggio di laboratorio presso l'Università di Roma 3 ha effettuato le analisi chimiche degli elementi maggiori (Calcio, Magnesio, Sodio, Potassio, Cloro e Solfato) e misure di radioattività (radon) in 3 sorgenti mineralizzate ubicate nella Tenuta di Tor Marancia, nel settore meridionale di Roma (EUR-Ardeatino). I risultati analitici sono stati commentati dall'Autore e confrontati con quelli presenti sulle etichette dell'Acqua Egeria, la cui sorgente è ubicata nei pressi dell'area studiata;

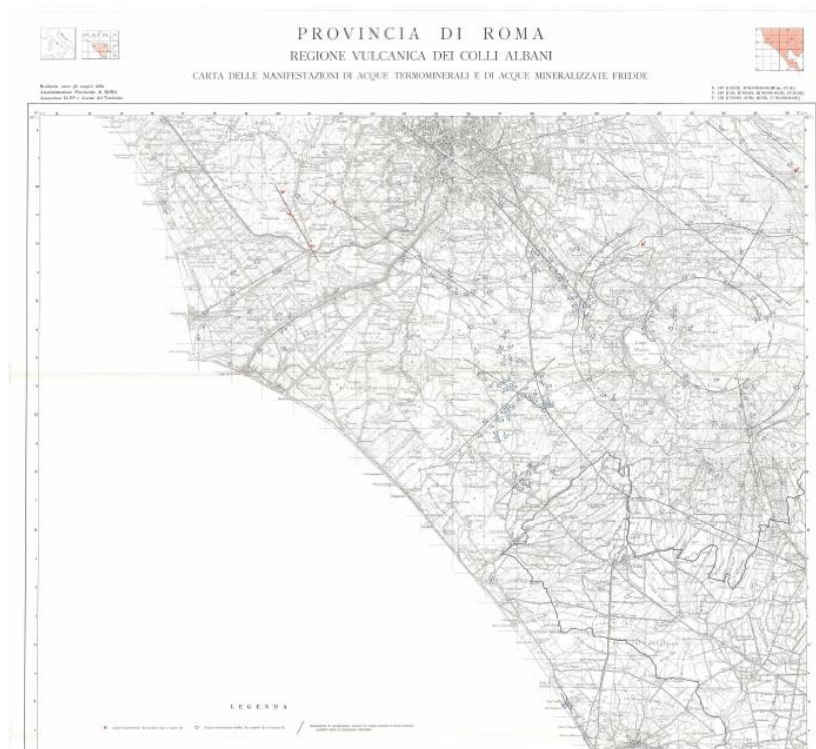


Figura 3.2. Ubicazione delle acque mineralizzate fredde e termominerali dell'area di Roma (Ventriglia, 1990).

- Corazza & Lombardi (2005) nel capitolo III (idrogeologia) descrivono i risultati dello studio idrogeologico condotto nell'area del centro storico di Roma. L'indagine si è basata sulle informazioni derivate dall'ampia bibliografia e dall'analisi critica dei dati geologici e idrogeologici di oltre 400 perforazioni. Lo studio riporta le caratteristiche idrologiche delle sorgenti storiche presenti nell'area, corredate da pochi dati idrochimici. Dati più completi riguardano 20 acque prelevate da pozzi, sorgenti e cunicoli romani di captazione, tutti ubicati nel centro storico di Roma (e zone adiacenti), durante una campagna di indagine condotta da Rughi (1986). Gli Autori, dopo aver classificato le acque da un punto di vista geochimico tramite diagrammi binari e ternari, e dopo aver mostrato e discusso il contenuto degli elementi maggiori e definito le abbondanze dei vari ioni, hanno attribuito il chimismo dei fluidi circolanti ai differenti complessi idrogeologici presenti nel sottosuolo. In particolare, in questo studio vengono mostrati i dati chimici di due pozzi situati in Via del Corso, dalla cui analisi risulta evidente l'alto contenuto sia in sali sia in CO₂. Purtroppo, non è riportata l'analisi isotopica del carbonio disciolto e, di conseguenza, non è possibile effettuare alcuna considerazione sulla sua origine;

- Barberi et al. (2008) hanno effettuato uno studio approfondito sulle ghiaie di base del Tevere quale risorsa per lo sfruttamento dell'energia geotermica nella capitale. Oltre ad aver ricostruito lo spessore di queste ghiaie nel territorio urbano, gli Autori riportano alcuni parametri

chimico-fisici (temperatura, pH, salinità) e idrologici (livello statico) di 17 pozzi ubicati nell'area tra Monte Mario a nord e l'Università Roma 3 a sud. Inoltre, vengono riportate le principali faglie dell'area investigata (Faglia di Fosso della Crescenza, Faglia dell'Acquatraversa, Faglia di Monte Mario e Faglia della Magliana) che gli Autori mettono in relazione con le risalite di emergenze termali e saline. Purtroppo, non avendo effettuato l'analisi chimica completa, gli Autori non sono in grado di fornire alcuna spiegazione circa l'origine dei sali disciolti in alcune acque che presentano valori di conduttanza elettrica estremamente interessanti ($5000 \mu\text{S}/\text{cm}$);

- Capelli et al. (2008) è forse il lavoro, insieme a quello di Camponeschi & Nolasco (1982), che riporta più dati geochimici sulle acque di sottosuolo dell'area romana e settori immediatamente adiacenti. Gli Autori presentano le mappe della distribuzione dei parametri chimico-fisici (temperatura e salinità, **figure 3.3 e 3.4**) di un centinaio di acque di sottosuolo raccolti durante le numerose campagne effettuate negli ultimi anni. Purtroppo, il territorio non è stato coperto in maniera omogenea: le aree investigate con maggior dettaglio sono principalmente i settori est e nord-est, mentre nei settori sud-est, sud-ovest e zona centrale i dati risultano in numero nettamente minore e con una conseguente minore densità per km^2 . Senza dati risultano i settori nord-ovest e meridionale.

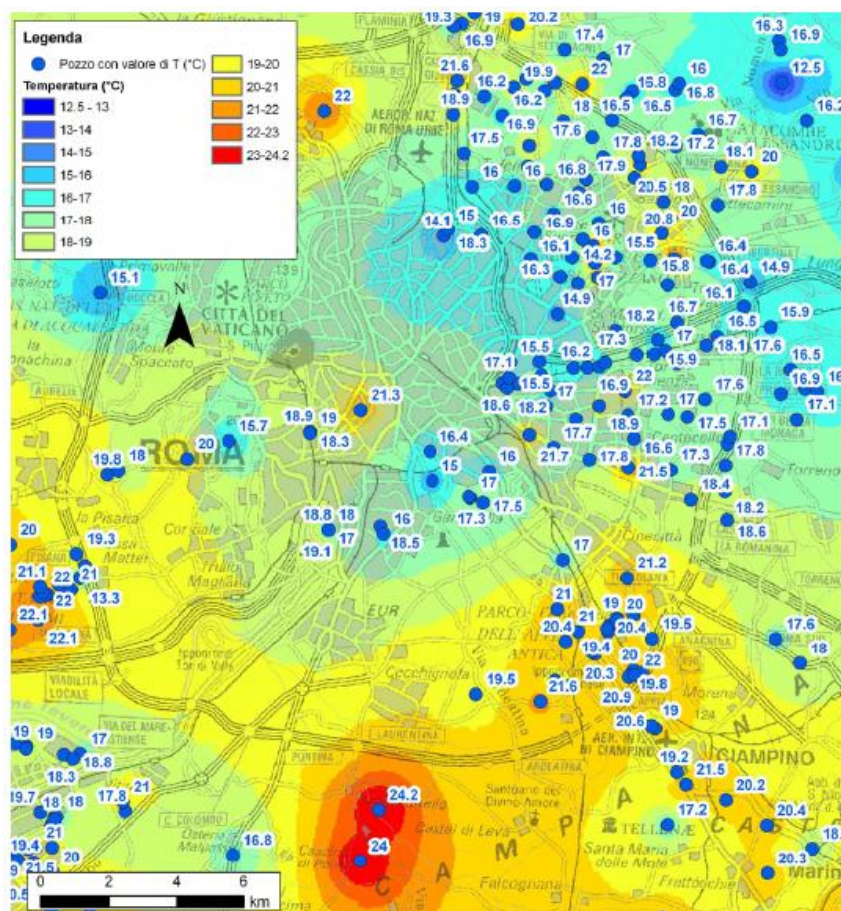


Figura 3.3. Distribuzione della temperatura nelle acque di sottosuolo dell'area di Roma (Capelli et al., 2008).

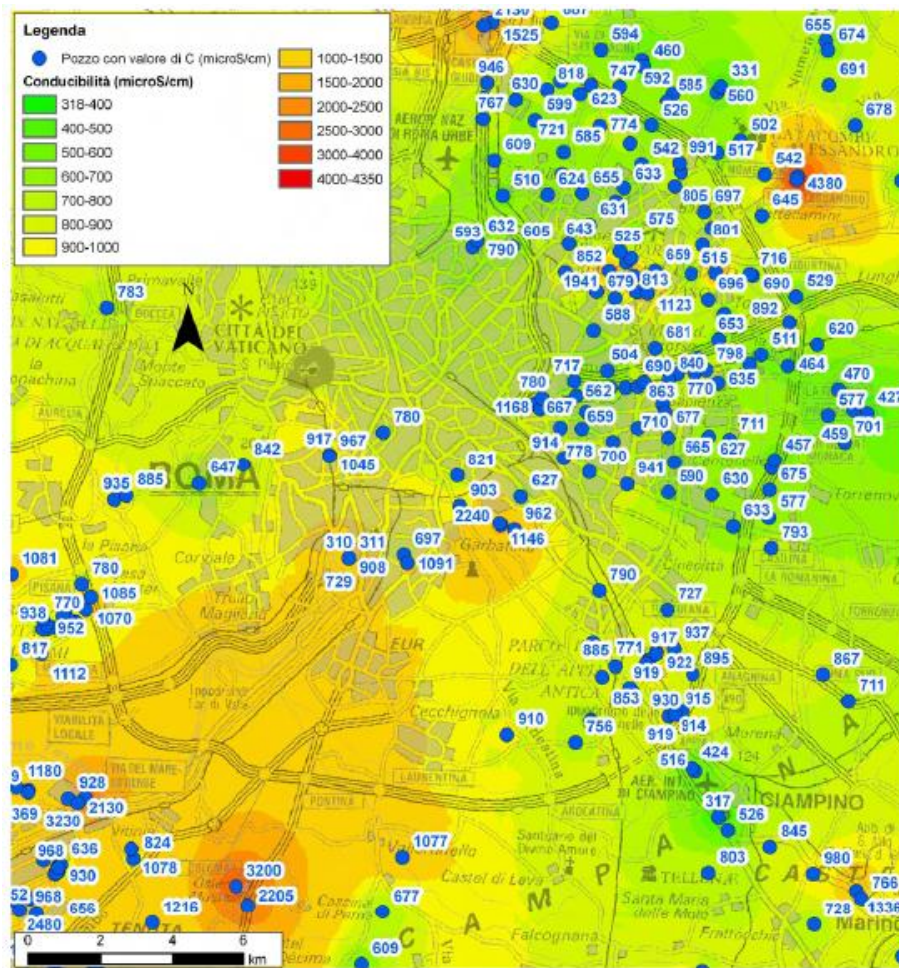


Figura 3.4. Distribuzione della conducibilità nelle acque di sottosuolo dell'area di Roma (Capelli et al., 2008).

Anomalie nelle acque (temperature $\geq 19^{\circ}\text{C}$, **figura 3.3**) sono state riscontrate a sud del G.R.A (zone Valleranello Casale di Perna), nell'area della Pisana, tra la Via Cassia e Via dei Due Ponti, dal Parco dell'Appia Antica fino al G.R.A, e nel settore nord-orientale lungo i versanti del bacino terminale dell'Aniene. Per quanto riguarda la salinità (**figura 3.4**) sono state individuate quattro aree anomale: una compresa tra la Pisana e la tenuta Presidenziale di Castel Porziano, una a sud-est di Ciampino, una in località S. Alessandro (Settecamini) e un'altra lungo la Via Salaria, in località Settebagni. Gli Autori mettono in relazione l'elevato contenuto salino delle acque di Ciampino con la risalita di fluidi endogeni ricchi in gas, mentre per le acque di Settebagni si ipotizza un processo di inquinamento dovuto agli scarichi delle numerose industrie presenti in zona, seppur acque leggermente mineralizzate siano conosciute da tempo. Nessuna spiegazione viene fornita per giustificare la salinità delle acque nelle restanti due aree.

- La Vigna et al. (2008) riportano, all'interno di un più completo studio idrogeologico, i parametri chimico-fisici (temperatura, pH, salinità) misurati nel 2004 durante una campagna svolta sulle acque di sottosuolo (141 siti tra pozzi e sorgenti) nell'area del tratto terminale

dell'Aniene. Sui dati geochimici (156 di temperatura e salinità e 153 di pH) è stata effettuata una trattazione statistica tramite istogrammi, *box plots*, *normal probability plots*; inoltre, i parametri sono stati mappati tramite isolinee di distribuzione (**figura 3.5**). Le anomalie di salinità sono state attribuite dagli Autori a fenomeni di miscelamento con acque superficiali inquinate (Aniene, Tevere). Al contrario, le anomalie di temperatura sembrano distribuirsi su una prevalente direzione appenninica e sono attribuite dagli Autori alla risalita di fluidi endogeni caldi lungo le discontinuità tettoniche del settore nord-orientale di Roma riconosciute in letteratura;

- De Simone (2012) nella sua tesi di laurea presenta i dati geochimici misurati e/o presenti in letteratura in/di 20 pozzi di acqua pubblici e privati ubicati nella zona di Monte Mario e Tor di Quinto. La maggior parte delle acque sono state analizzate per determinare i parametri chimico-fisici, ma per alcune di loro i dati sono particolarmente completi, in quanto si dispone del chimismo degli elementi maggiori, alcuni minori e in traccia, dei gas disciolti e degli isotopi stabili di C, O e H. Lo studio ha permesso l'identificazione di acque saline, termicamente anomale e con pH acidi, dovuti ad alte concentrazioni di CO₂ (fino a 441 cc/l); queste acque sono ubicate nell'area di Tor di Quinto. L'analisi isotopica del carbonio (i.e. della CO₂ disciolta) evidenzia un valore molto simile a quelli della CO₂ emessa dalle principali manifestazioni gassose naturali dell'Italia centrale, identificandone la sua chiara origine profonda. L'Autore ipotizza che questi convogli caldi e ricchi in CO₂ risalgano lungo le principali faglie a direzione appenninica che attraversano l'area (Faglia di Monte Mario, Faglia dell'Acquatraversa, Faglia del Fosso della Crescenza). Ricordiamo che Cesi et al. (2008) hanno individuato nella zona di Tor di Quinto un alto gravimetrico dovuto, probabilmente, alla presenza del basamento carbonatico (più denso) a bassa profondità. Tale struttura geologica fungerebbe da serbatoio per la CO₂ originata in profondità, permettendole di poter esalare verso la superficie e disciogliersi negli acquiferi superficiali. De Simone ha effettuato anche un'indagine molto dettagliata per determinare il degassamento dai suoli delle principali specie, evidenziando settori di Tor di Quinto con elevate concentrazioni di CO₂ e radon (**figura 3.6**).

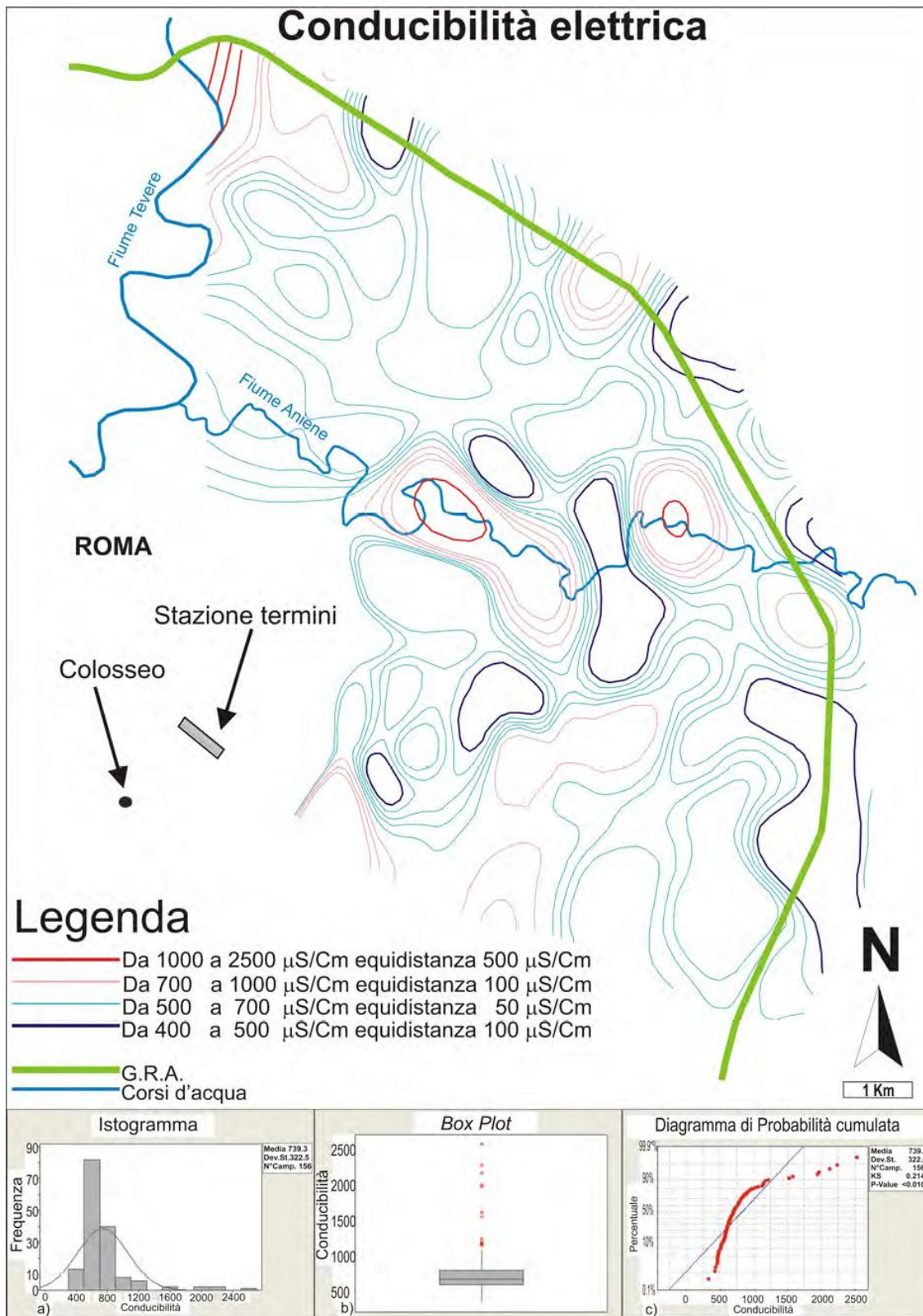


Figura 3.5. Distribuzione della conducibilità elettrica nelle acque di sottosuolo del tratto terminale dell'Aniene (La Vigna et al., 2008).

Le distribuzioni osservate in superficie si allineano secondo i principali disturbi tettonici NW-SE, confermando che le strutture riconosciute in letteratura sono permeabili ai flussi di gas di origine profonda, modulando la loro distribuzione nei pori che permeano i suoli;

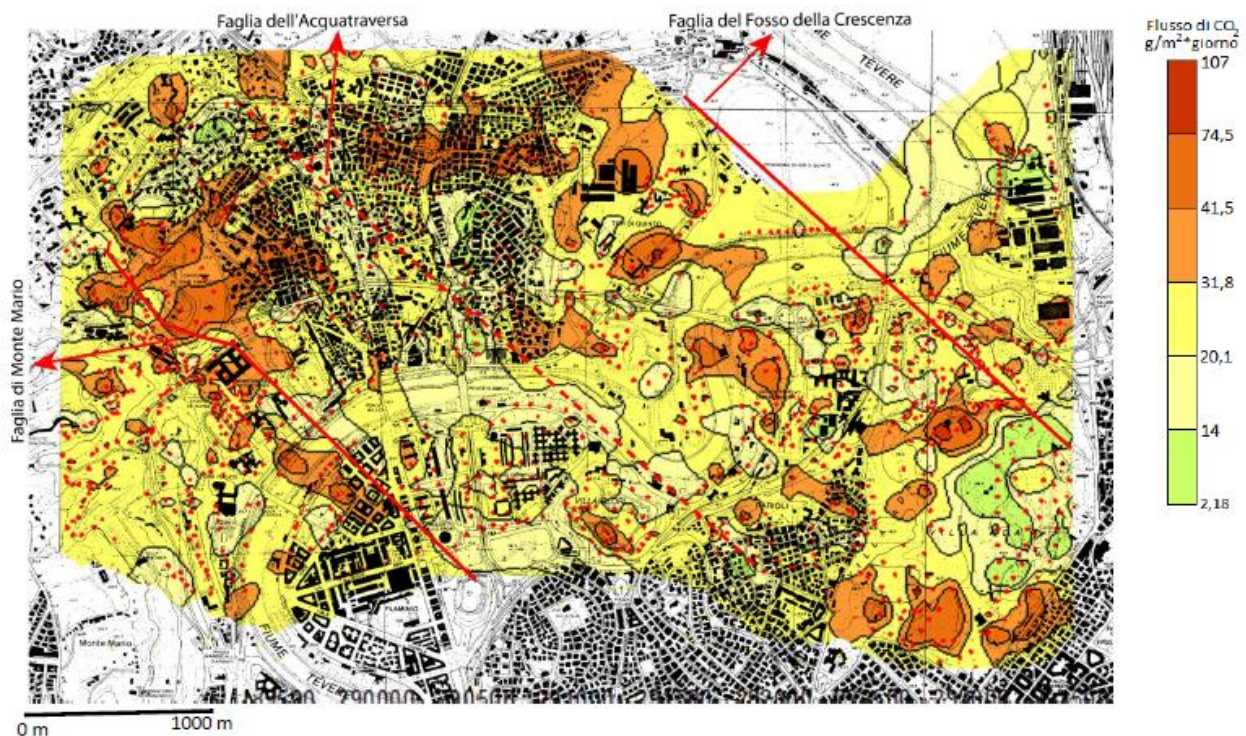


Figura 3.6. Degassamento di CO₂ dal suolo nell'area di Tor di Quinto (De Simone, 2009).

- Bersani et al. (2013) presentano un primo contributo allo studio dei circuiti termominerali, all'individuazione di emergenze mineralizzate divenute sacre, presenti o estinte e delle emissioni gassose nel centro urbano romano (oltre a quanto è già noto in letteratura). Il lavoro è consistito in una prima fase di raccolta e ubicazione di tutte le manifestazioni di acque mineralizzate ed emissioni gassose già note nella città, estendendo lo studio all'area a sud di Roma fino al litorale di Anzio. Gli Autori hanno apportato ulteriori contributi ai dati geochimici mediante nuove conoscenze derivanti da recenti perforazioni, da analisi chimico-fisiche delle acque prelevate in pozzi o sorgenti e dall'analisi di gas *indoor*. La localizzazione di tutti i punti di interesse ha permesso di individuare un *trend* preferenziale nelle ubicazioni delle emergenze mineralizzate e dei punti di emissione gassosa, orientato in direzione NNW-SSE, in buon accordo con le conoscenze esistenti nell'area di Roma (**figura 3.7**). Lungo tale allineamento le manifestazioni geochimiche più importanti sembrano essere presenti in numero più elevato;

- La relazione dell'ISPRA (2013) sulla frana di Via Ugo Bassi a Monteverde riporta alcuni dati idrochimici (19 siti con misure di temperatura, pH, salinità) rilevati in quest'area e in settori limitrofi più l'analisi completa degli elementi maggiori e dell'alcalinità relativi a 11 di queste acque (piezometri, inclinometri, sorgenti, acque di drenaggio, ecc.);

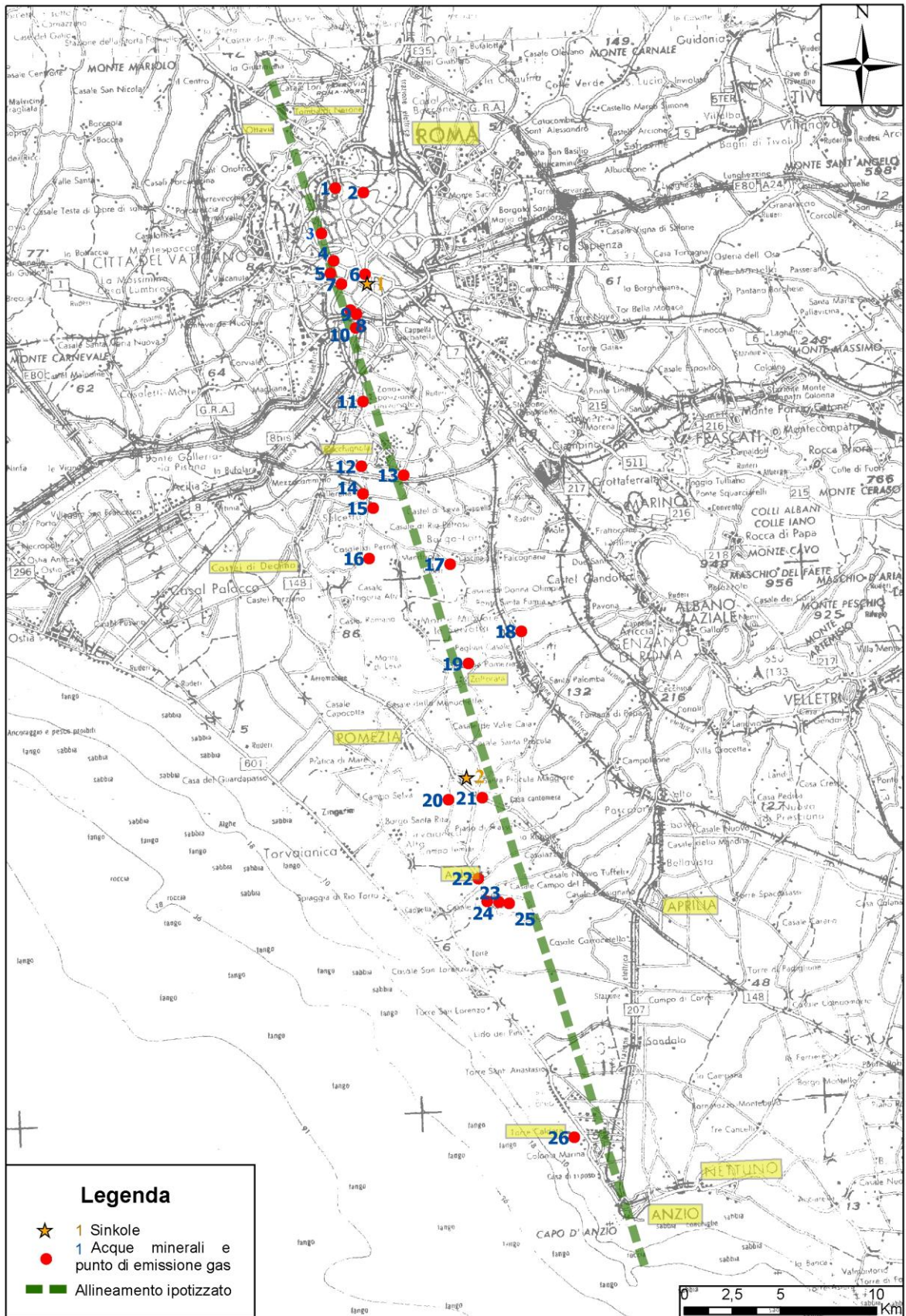


Figura 3.7. Acque minerali, sinkholes e allineamento tettonico NW-SE ipotizzato (Bersani et al, 2013).

- Mattia (2014) ha effettuato misure di radon disciolto nelle acque dell'Acquedotto Vergine (16 campioni), nel tratto compreso tra Salone e la zona del Pincio-Villa Borghese. I valori sono compresi tra 19 e 69 Bq/l e mostrano una diminuzione muovendosi dal primo (zona est di Roma) all'ultimo tratto (zona centrale di Roma); tale andamento è stato attribuito alla presenza delle pozzolane rosse (vulcaniti ricche in radionuclidi precursori del radon) che costituiscono la litologia prevalente nell'area Tiburtina-Collatina. L'Autore conferma questa ipotesi tramite l'analisi e il confronto del contenuto in radon di tre sorgenti del Parco della Caffarella, dove le pozzolane rosse affiorano estesamente. Inoltre, in questo studio sono state analizzate le concrezioni calcaree presenti all'interno dell'ultimo tratto dell'Acquedotto, per caratterizzarle dal punto di vista isotopico e determinare l'origine della CO₂ presente nella soluzione da cui sono precipitate (**figura 3.8**). I valori isotopici ottenuti indicano l'esistenza di CO₂ di origine profonda con un contributo variabile tra il 12 e il 23%. L'Autore attribuisce quanto osservato all'assetto strutturale dell'area del Pincio-Villa Borghese caratterizzato dalla presenza di un alto gravimetrico del basamento carbonatico sottostante che ospita acquiferi ricchi in CO₂ che degassano e rilasciano questo gas fino alla superficie;

- Feroci (2014) ha determinato l'attività del radon disciolto in 13 punti di misura (sorgenti e torrenti) ubicati nel Parco della Caffarella, fornendo una spiegazione sui risultati ottenuti tramite il confronto tra le diverse caratteristiche geologiche e idrologiche dei siti campionati. In particolare, l'Autore evidenzia l'importanza della distanza tra punto di misura e:
i) affioramento delle pozzolane rosse; *ii*) punto di emersione della sorgiva e *iii*) morfologia del punto di misura che può influire in maniera più o meno accentuata sul degassamento subito dalle acque investigate e sul relativo contenuto in radon.

Tutti i dati idrochimici riferiti ai siti riportati nei lavori precedentemente descritti, ove opportunamente georiferiti, sono utilizzati nel presente studio nella classificazione in *facies* idrochimiche, nei diagrammi e nelle mappe di isodistribuzione, a sua naturale implementazione. Per le analisi chimiche tratte dai lavori sopra riportati, è stato effettuato un controllo di qualità secondo procedure standardizzate (bilanciamento di massa, rapporti tra ioni, ecc.).

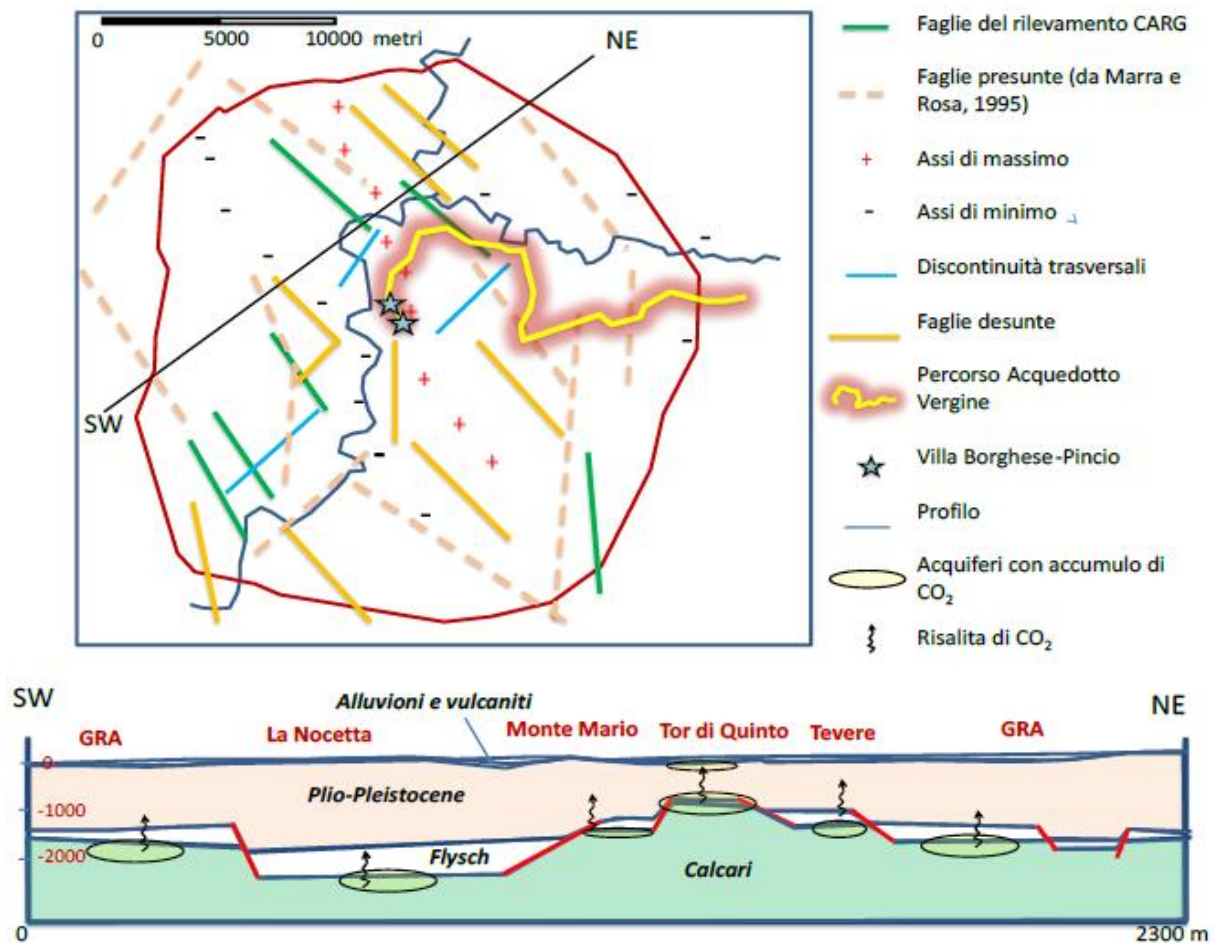


Figura 3.8. Ubicazione dei siti investigati per determinare le analisi isotopiche delle concrezioni calcaree effettuate nel tratto terminale dell'Acquedotto Vergine e sezione geologica SW-NE (Mattia, 2014).

3.2 Natural Gas Hazard: definizione e studi pregressi nel Lazio

Con il termine inglese *Natural Gas Hazard* (da ora in avanti NGH) s'intende la pericolosità connessa a emissioni naturali di gas endogeni sia dai suoli che dagli acquiferi in una determinata area. La valutazione del NGH può essere ottenuta tramite la combinazione di differenti tecniche geochimiche, applicate al sistema aria-suolo-acqua, quali: i) lo studio di flussi e concentrazioni dei gas nei suoli e nelle acque di sottosuolo; ii) le concentrazioni dei gas in aria, a diverse altezze; iii) il loro livello *indoor* (cioè all'interno di abitazioni e luoghi di lavoro).

Le emissioni di gas endogeno interessano prevalentemente le aree vulcaniche e geotermiche italiane, come, ad esempio, i distretti vulcanici della Provincia Comagmatica Romana (da ora in avanti PCR). Essi sono considerati quiescenti o del tutto estinti (Colli Albani, Sabatini, Vulsini, Roccamonfina), e presentano un degassamento diffuso sia dai suoli che dagli acquiferi, che avviene di preferenza in corrispondenza degli alti strutturali del substrato

carbonatico profondo, delle più importanti faglie regionali, dove sistemi di faglia a differente orientazione si incontrano e in aree caratterizzate da un anomalo flusso di calore. Queste particolari condizioni geologiche, infatti, possono favorire l'instaurarsi di settori ad alta permeabilità e di estesi sistemi di fratture attraverso i quali i gas profondi sono veicolati verso la superficie, disciogliendosi negli acquiferi e/o permeando i pori del suolo.

I gas principali emessi dalle più note manifestazioni della PCR sono dominati dall'anidride carbonica (fino al 98% in volume), con contenuti largamente inferiori di radon, metano, azoto, elio e ossigeno; talvolta, è stata riscontrata anche la presenza di idrogeno solforato.

Nelle aree ad alta densità abitativa, gas quali CO₂, H₂S e radon possono penetrare all'interno delle abitazioni (i.e. *indoor*) tramite esalazioni dal suolo per processi diffusivi o avvevanti e, essendo più pesanti dell'aria (1.5 la CO₂ e 1.2 volte l'H₂S, www.ivhhn.org), possono costituire un potenziale pericolo per la popolazione residente, noto come NGH. Tale pericolo deriva principalmente dall'esposizione ad alcune specie gassose che diventano tossiche (come CO₂ e H₂S) o a gas definiti cancerogeni di gruppo 1, come il radon, quando superano un determinato livello di concentrazione *indoor*. L'IVHHN (*International Volcanic Health Hazard Network*) ha definito delle linee guida in relazione agli effetti tossici di alcune sostanze volatili emesse in zone vulcaniche; tali linee guida sono corredate da tabelle in cui si riportano gli effetti per inalazione, tra le altre, di CO₂ e H₂S per vari intervalli di concentrazione crescente in aria (**tabelle 3.1 e 3.2**). La pericolosità di questi due gas si può definire, dal punto di vista effetto temporale, come *Short Term Effect* in quanto, come risulta dalle tabelle per determinate concentrazioni in aria vi potrebbe essere il decesso immediato o in pochissimi minuti. Negli ultimi 30 anni, nel Lazio vi sono state almeno dieci vittime legate all'inalazione di anidride carbonica (Beaubien et al., 2003), mentre misure *indoor* effettuate in aree residenziali dei Colli Albani (Carapezza et al., 2003) hanno rivelato che di frequente sono state raggiunte concentrazioni di H₂S potenzialmente pericolose per la salute umana (**tabella 3.2**), fino a 40 ppm.

Exposure limits (% in air)	Health Effects
2-3	Unnoticed at rest, but on exertion there may be marked shortness of breath
3	Breathing becomes noticeably deeper and more frequent at rest
3-5	Breathing rhythm accelerates. Repeated exposure provokes headaches
5	Breathing becomes extremely laboured, headaches, sweating and bounding pulse
7.5	Rapid breathing, increased heart rate, headaches, sweating, dizziness, shortness of breath, muscular weakness, loss of mental abilities, drowsiness, and ringing in the ears
8-15	Headache, vertigo, vomiting, loss of consciousness and possibly death if the patient is not immediately given oxygen
10	Respiratory distress develops rapidly with loss of consciousness in 10-15 minutes
15	Lethal concentration, exposure to levels above this are intolerable
25+	Convulsions occur and rapid loss of consciousness ensues after a few breaths. Death will occur if level is maintained.

Tabella 3.1. Effetti sulla salute per inalazione di anidride carbonica (www.ivhhn.org/gas/guidelines.htm).

Exposure limits (ppm)	Health Effects
0.008-0.2	Olfactory threshold -"rotten eggs" smell detectable
20	Sense of smell to gas lost Concentrations tolerated for some hours without harm
20-50	Eye irritation
50	Prolonged exposure may cause pharyngitis and bronchitis
60	Prolonged exposure may cause conjunctivitis and eye pain
150+	Irritation of upper respiratory tract Sense of smell lost
250	Pulmonary oedema with risk of death
500	Very dangerous, evacuation should occur well below this level
1000	Loss of consciousness occurs
1000-2000	Acute intoxication: symptoms include rapid breathing, distress, nausea and vomiting. May be rapidly followed by loss of consciousness, coma and cessation of breathing.
2000+	Immediate loss of consciousness and high probability of death

Tabella 3.2. Effetti sulla salute per inalazione di idrogeno solforato (www.ivhhn.org/gas/guidelines.htm).

Le rocce vulcaniche ricche in uranio e radio (come quelle della PCR) e il “trasporto” operato dalla CO₂, possono favorire la presenza sia nei suoli che nelle acque del gas radon; come la CO₂ e l’H₂S, anche il radon penetra all’interno delle abitazioni potendo raggiungere elevatissime attività *indoor* (soprattutto in scantinati e parti interrato di un’abitazione), essendo 8 volte più pesante dell’aria. L’Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro, IARC, che è parte dell’Organizzazione Mondiale della Sanità, lo ha classificato nel 1988 come cancerogeno di gruppo 1, sulla base di indagini epidemiologiche su coorti di minatori di miniere sotterranee, confermando questa classificazione in un’analisi più recente (WHO-IARC, 1988; WHO-IARC, 2001). La pericolosità del radon si può definire, dal punto di vista effetto temporale, come *Long Term Effect* in quanto, solo dopo parecchi anni di esposizione, a volte anche in concomitanza con altri fattori come il fumo, si possono osservare i suoi effetti sull’apparato respiratorio (cancro al polmone). Per questo motivo la normativa vigente prevede dei livelli di azione solo per i luoghi di lavoro, mentre per le abitazioni non esiste, a oggi, un riferimento normativo che stabilisca un livello massimo ammissibile per la concentrazione di gas radon. Si usa pertanto fare riferimento alla raccomandazione europea 90/143/Euratom, la quale indica i valori oltre i quali si “raccomanda” di intraprendere azioni di risanamento. Questi valori sono espressi come concentrazione media annua di radon in aria e corrispondono a 400 Bq/m³ per edifici già esistenti e 200 Bq/m³ per edifici di nuova costruzione (da progettare), anche se, alla luce dei più recenti risultati scientifici è emersa la tendenza di proporre il valore più conservativo di 100 Bq/m³ come livello di riferimento per minimizzare l’impatto sulla salute causato dall’esposizione al radon *indoor*.

Il degassamento osservato nella PCR può essere sia di origine naturale (Chiodini et al., 1995; Chiodini & Frondini, 2001; Pizzino et al., 2002; Annunziatellis et al., 2003; Beaubien et al., 2003; Carapezza et al., 2003; Minissale, 2004; Barberi et al., 2007; Annunziatellis et al., 2008; Mariucci et al., 2008; Frondini et al., 2008; Cinti et al., 2011; Bigi et al., 2014; Cinti et al., 2014) sia causato da attività antropiche quali sfruttamento eccessivo della falda acquifera, scavi e/o approfondimento di pozzi già esistenti come accaduto in passato nei Colli Albani (Pizzino et al., 2002; Carapezza & Tarchini, 2007) e più di recente nell’area di Fiumicino (Barberi et al., 2007; Ciotoli et al., 2013; Sella et al., 2014). Un altro tipo di fenomeno da non sottovalutare, legato ad un meccanismo di rilascio improvviso di CO₂ da acque limniche sature, potrebbe innescare nel Lago di Albano (Martini et al., 1994; Funiciello et al., 2002; Carapezza et al., 2008) un fenomeno simile a quello del Lago Nyos in Camerun (nube silenziosa di CO₂ che causò la morte di oltre 1700 persone fino a 20 km di distanza dal lago, Rice, 2000).

In anni recenti, studi dettagliati della distribuzione di CO₂ e radon (e in misura minore H₂S) sia nelle acque che nei suoli, effettuati nei complessi vulcanici situati a nord (Sabatini e Torre Alfina) e a sud (Colli Albani) di Roma (Pizzino & Quattrocchi, 1999; Pizzino et al., 2002; Annunziatellis et al., 2003; Beaubien et al., 2003; Carapezza et al., 2003; Barberi et al., 2007; Frondini et al., 2008; Cinti et al., 2011; Cinti et al., 2013; Cinti et al., 2014; Carapezza et al., 2015) hanno fornito indicazioni sul degassamento in atto sia a livello locale che regionale, e sono risultati di notevole aiuto nella identificazione e delimitazione delle aree caratterizzate da potenziali alti livelli di NGH.

Nel corso degli ultimi trent'anni sono avvenuti numerosi incidenti connessi all'emissione accidentale di gas da pozzi nell'area dei Colli Albani (Enel, 1990; Pizzino et al., 2002; Barberi et al., 2007; Carapezza & Tarchini, 2007; Mariucci et al., 2008) e Fiumicino (Barberi et al., 2007; Ciotoli et al., 2013; Sella et al., 2014). La maggior parte di questi pozzi sono ubicati sull'alto strutturale carbonatico di Ciampino (**figura 3.9**), che rappresenta (*cap. 1*) la principale struttura permeabile che agisce come serbatoio per il gas che risale dal profondo e dalla quale il gas risale verso la superficie lungo faglie e fratture. Come risulta in **figura 3.9**, anche aree relativamente distanti dall'apparato vulcanico degli Albani, come quella di Fiumicino, sono state interessate da fenomeni di degassamento da acque e suoli di una certa rilevanza.

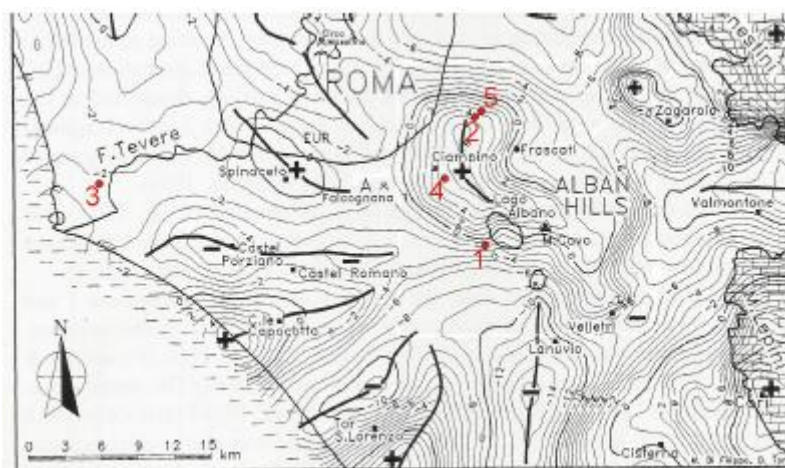


Figura 3.9. Localizzazione degli incidenti con emissione di gas da pozzi. 1) Pozzo ENEL n. 203; 2) Pozzo di Via Valle Cupella; 3) Pozzi di Fiumicino (2005 e 2013); 4) Sondaggi di Via Maciocco; 5) Pozzo di Via Vervio (Tarchini L., 2009).

Un'accurata valutazione del NGH non può prescindere da una attenta e il più possibile completa conoscenza della geologia e idrologia superficiale (tipo di litologia affiorante, reologia delle rocce, presenza di falde acquifere, continuità laterale degli strati geologici) e profonda (strutture tettoniche, faglie, fratture); il contesto geologico e idrogeologico di un'area, infatti,

possono svolgere un ruolo determinante nel modulare il tipo di degassamento e la sua distribuzione in superficie (e.g. Pizzino et al., 2002).

Recentemente, Sella et al., (2014), a seguito della comparsa di un'emissione gassosa in località Coccia di morto (Fiumicino) hanno effettuato uno studio combinato della distribuzione della CO₂ in alcune acque di sottosuolo, della caratterizzazione isotopica del carbonio disciolto e di un'accurata ricostruzione geologica e stratigrafica ottenuta con una densa rete di perforazioni. Tramite questo ampio *data-set*, essi hanno modellizzato la circolazione profonda e superficiale di acque e gas nell'area di Fiumicino. Gli autori hanno riconosciuto un potenziale pericolo derivante dalla falda in pressione ricca in CO₂ di origine profonda, ospitata nelle ghiaie (**figura 3.9**), a una profondità di 40-50 metri. Tale falda, se raggiunta da perforazioni o scavi può causare improvvisi degassamenti e/o eruzioni gassose, come già avvenuto nel 2005 e, più recentemente, nell'agosto del 2013 (Barberi et al., 2007; Ciotoli et al., 2013; Sella et al., 2014), aumentando notevolmente il livello di NGH dell'area. La falda superficiale non confinata, invece, è isolata idraulicamente da quella sottostante (non riceve apporti profondi) e discioglie CO₂ di origine organica (i.e. superficiale).

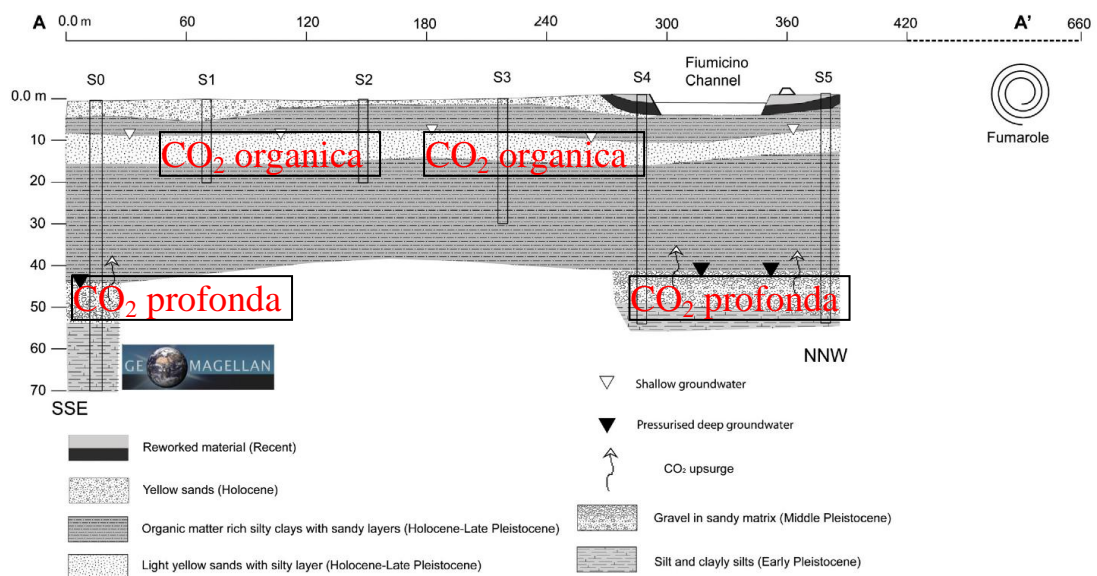


Figura 3.9. Sezione geologica e stratigrafia dell'area di Fiumicino (Sella et al., 2014). Sono riportate le ubicazioni delle perforazioni usate per la ricostruzione proposta. Per la definizione di CO₂ organica e profonda si veda il testo.

Come riportato dagli Autori, la successione litostratigrafica di Fiumicino è comune a molte aree del centro Italia in generale (**figura 3.10**) e di Roma in particolare (e.g. le ghiaie di base del Paleotevere confinate tra le argille di Monte Vaticano e le successioni limose delle alluvioni recenti del Tevere, vedi capitoli 1 e 2, Corazza & Lombardi, 1995), e per questo motivo

non si esclude che altri settori dell'area urbana della città possano risentire, in futuro, di fenomeni come quello avvenuto a Fiumicino nel mese di agosto del 2013. Tale affermazione è supportata da lavori meno recenti (Novarese, 1926; Camponeschi & Nolasco, 1982) che riportano episodi di degassamento avvenuti in occasione della scavo di perforazioni esplorative nell'area della Marcigliana (Roma nord-est) e nel quartiere Prati (Piazza Cavour).

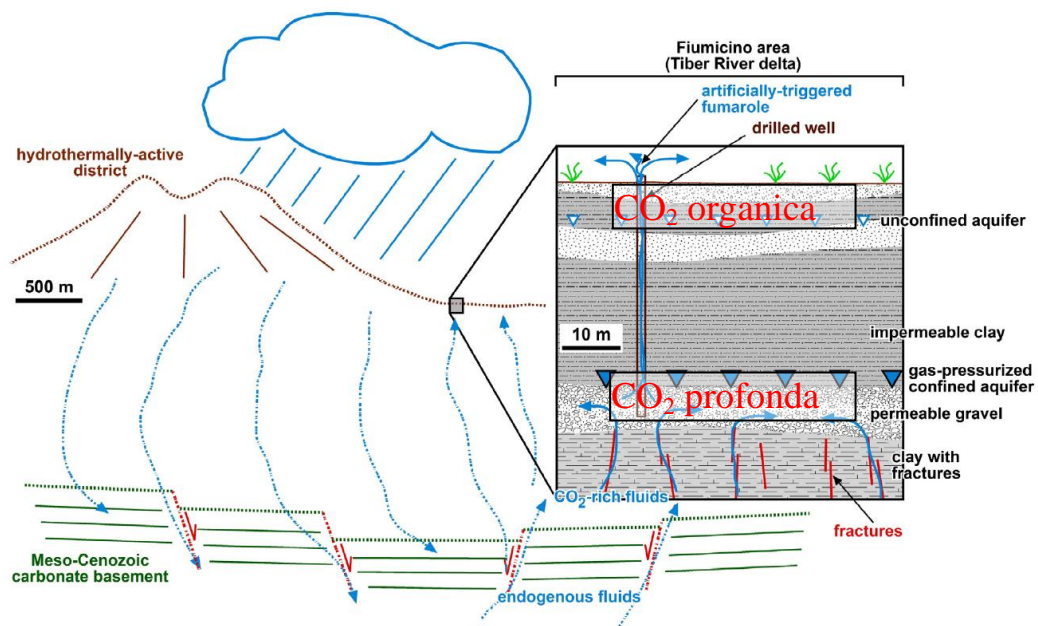


Figura 3.10. Modello concettuale di circolazione dei fluidi nell'area di Fiumicino (Sella et al., 2014). Per la definizione di CO₂ organica e profonda si veda il testo.

Un'altra ricerca inerente lo studio del NGH nel Lazio è stata quella di Pizzino & Quattrocchi, 1999 che hanno effettuato una vera e propria micro zonazione geochemica nei comuni di Ciampino e Marino tramite uno studio dettagliato del contenuto di anidride carbonica (pCO₂) e radon nelle acque di sottosuolo (265 campioni), ottenendo una “fotografia” molto chiara del degassamento in atto in questo settore dei Colli Albani. Sono state identificate, nei due territori comunali, aree caratterizzate da pericolosità massima (zona 1, rossa), media (zona 2, arancione) e minima (zona 3, verde) di esalazioni di CO₂ dal suolo e/o dagli acquiferi (**figura 3.11**), mentre per il radon la situazione si è dimostrata molto più complessa e non è stato possibile effettuare una zonazione attendibile.

Da notare che nell'area rossa (zona 1) si sono verificati 8 dei 10 fenomeni importanti di emissioni gassose dal suolo avvenuti negli ultimi decenni nel territorio di Ciampino (Pizzino et al., 2002); questo a dimostrazione ulteriore della bontà dell'approccio proposto e della metodologia utilizzata (studio dettagliato delle acque di sottosuolo), soprattutto in un'area caratterizzata da elevati flussi di origine endogena.

Questo studio è stato recepito dal Comune di Ciampino che ha emesso ordinanze per la salvaguardia della salute dei cittadini e ha profondamente rivisto il proprio piano urbanistico, dettando le modalità di costruzione dei nuovi edifici nelle aree caratterizzate da alta pericolosità. Nel caso di Ciampino e Marino il semplice studio nelle acque si è dimostrato quindi un metodo molto potente ed economico per studiare e valutare il fenomeno del NGH in un'area vulcanica densamente popolata.

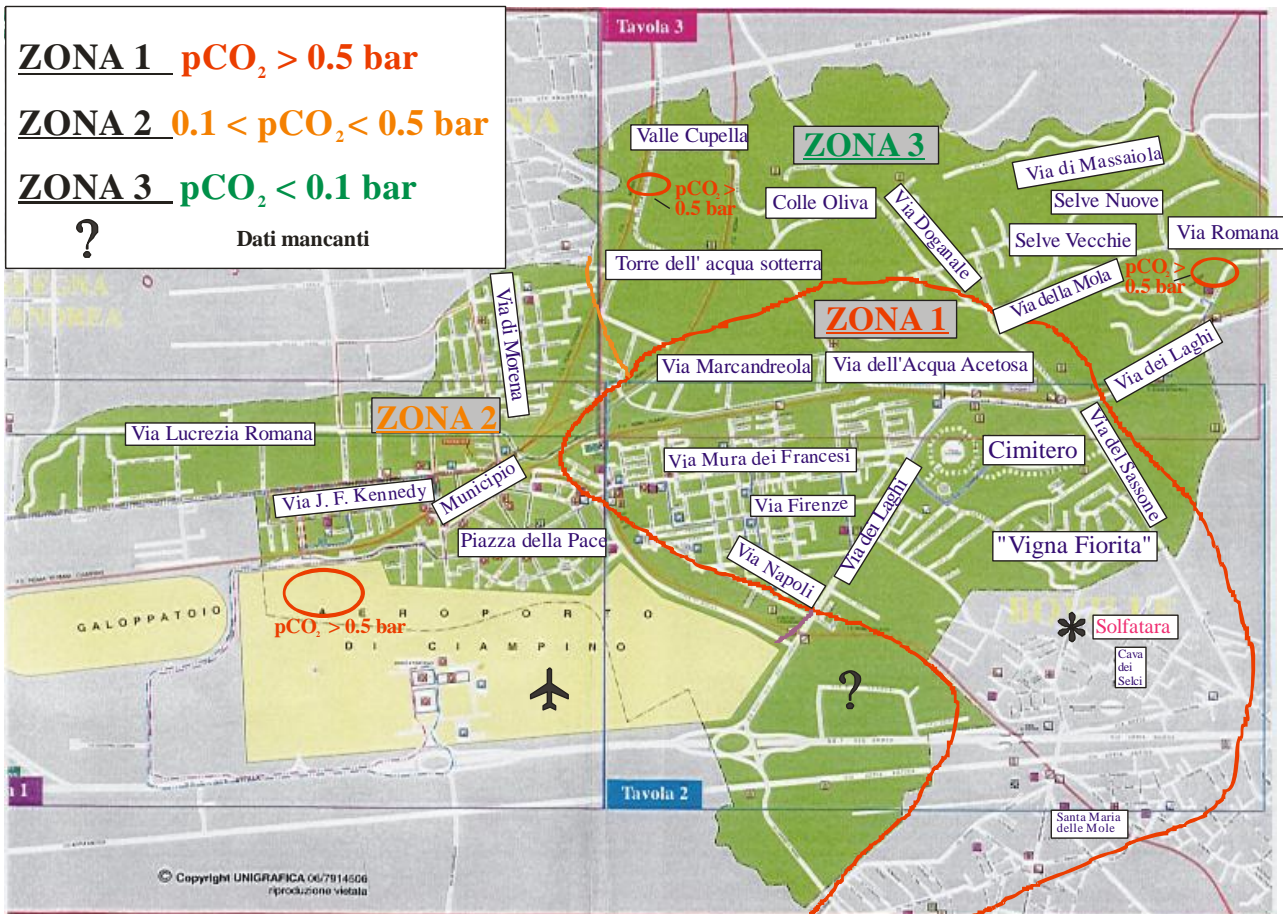


Figura 3.11. Distribuzione della pCO_2 nelle acque di sottosuolo del Comune di Ciampino (Pizzino & Quattrocchi, 1999).

4. Metodi

4.1 Metodologie di campionamento e analisi delle acque

Il campionamento rappresenta una fase di importanza fondamentale ai fini dell'esatta caratterizzazione ed interpretazione dei fenomeni che si vogliono studiare e può definirsi come quell'operazione di prelievo di porzioni rappresentative della matrice ambientale che si vuole sottoporre ad analisi. Il campionamento costituisce quindi la prima fase di ogni processo analitico e porta a risultati la cui qualità è strettamente correlata a quella del campione prelevato.

Per tale motivo, il campionamento è una fase estremamente complessa e delicata che condiziona i risultati di tutte le operazioni successive e che, di conseguenza, incide in maniera non trascurabile sull'incertezza totale del risultato dell'analisi.

La definizione degli obiettivi del campionamento è una fase cruciale di tutto il processo analitico, in quanto rappresenta un fattore condizionante l'intero approccio sperimentale che comprende:

- ✓ la scelta del numero e della localizzazione dei punti di campionamento;
- ✓ la determinazione della frequenza, della durata e delle procedure di prelievo;
- ✓ il successivo trattamento dei campioni;
- ✓ la scelta delle più adeguate metodiche analitiche da utilizzare.

Dal punto di vista analitico, la rappresentatività del risultato dipende dal numero di campioni prelevati. Tale numero può essere definito statisticamente in base a criteri dipendenti dagli obiettivi di qualità e dalla ripetibilità del metodo. Di solito, però, il numero di campioni ricavati statisticamente è poco realistico, perché porta spesso a un numero di prelievo non sostenibile rispetto alle risorse economiche, umane e laboratoristiche disponibili. Dal punto di vista pratico, un certo numero di repliche può rappresentare un compromesso tra le esigenze della rappresentatività analitica e le risorse disponibili.

Il campione, inoltre, dovrà essere:

- ✓ prelevato in maniera tale che mantenga inalterate le proprie caratteristiche chimiche, fisiche e biologiche fino al momento dell'analisi;
- ✓ conservato in modo tale da evitare modificazioni dei suoi componenti e delle caratteristiche da valutare.

La predisposizione di un piano di campionamento finalizzato alla raccolta di una serie di campioni rappresentativi risulta fondamentale per una corretta interpretazione del fenomeno investigato. Sono molteplici le tecniche per effettuare un campionamento con dirette

conseguenze sulla rappresentatività e sul significato dei dati analitici ottenuti dall'analisi dei campioni. La comunità scientifica internazionale ha cercato di definire delle metodiche riguardanti sia il prelievo dei campioni delle diverse matrici ambientali sia il loro trattamento in laboratorio.

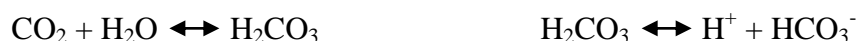
Nel caso specifico, il campionamento è stato accompagnato dalla misura *in situ* tramite strumentazione portatile (elettrodi e potenziometria), precedentemente calibrata con opportune soluzioni standard (pH 4, 7 e 10; conduttanza elettrica 1413 e 12880 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a 25°C; Eh + 220 mV), dei parametri chimico-fisici quali temperatura dell'acqua, pH, potenziale redox, (Eh) e conduttanza elettrica (salinità). L'alcalinità è stata misurata sul campo tramite la titolazione con HCL 0.05 N e il metil-arancio come indicatore. Il campione per la misura del radon (^{222}Rn) disciolto in acqua è stato raccolto tramite l'ausilio di Canestrini a Carboni Attivi (ACC) nel quale è stato trasferito, attraverso dispositivi di *stripping* (Mancini et al., 2000). Per ogni sito sono state prelevate tre aliquote di acqua (50 cc): la prima, filtrata (0.45 μm) e acidificata (con HCL 6M) e conservata in bottiglie di polietilene, per l'analisi dei cationi (Ca, Mg, Na and K); la seconda filtrata (0.45 μm) e conservata in bottiglie di polietilene, per l'analisi degli anioni (Cl^- , Br^- , SO_4^{2-} and NO_3^-) e la terza filtrata (0.45 μm) e acidificata (con HNO_3 ultrapuro 4M) e conservata in appositi campionatori in polietilene (falcon), per l'analisi degli elementi minori e in traccia. (Sr, B, Li, As, Si, ecc.). La filtrazione si è resa necessaria al fine di eliminare il particolato, che potrebbe rimuovere alcuni costituenti disciolti, quali NH_3 e SO_4 , oppure determinare l'occlusione di parti di strumenti durante l'analisi di laboratorio. L'acidificazione, abbassando il pH (~2), evita l'eventuale precipitazione di metalli, permettendo di preservare la concentrazione originaria dei cationi; le condizioni di soprassaturazione in specifici sali non sono determinate solamente da variazioni di temperatura, ma anche da perdita di CO_2 (che determina precipitazione di CaCO_3 , da cui la necessità di analizzare le specie carbonati che direttamente in campagna o entro poche ore dal prelievo) e aumenti di Eh per ingresso di ossigeno atmosferico (che può favorire la precipitazione di idrossidi di Fe e di altri metalli di transizione). Gli anioni e i cationi sono stati analizzati tramite cromatografia ionica (Dionex DX500 e Portlab S001.2) presso il laboratorio di Geochimica dei Fluidi dell'INGV di Roma e presso il laboratorio chimico per analisi acque dell'INGV di Palermo. Gli elementi in traccia sono stati analizzati presso il laboratorio chimico per le determinazioni degli elementi in tracce dell'INGV di Palermo tramite tecnica ICP (*Inducted Cumulative Plasma*), utilizzando l'ICP-MS della Agilent serie 7500ce con sistema ORS (Octapole Reaction System), mentre l'analisi della silice tramite ICP-OES (Horiba Jobin Yvon mod. Ultima 2) su un campione diluito (1:10). Il bilancio tra anioni e cationi (definito come parametro di elettroneutralità), cioè la differenza tra la sommatoria degli anioni e dei

cationi diviso per la sommatoria delle somme, è sempre <5%. L'errore analitico per le analisi delle tracce è <10%.

Le analisi dei gas disciolti negli acquiferi (He, H₂, N₂, CH₄, CO₂) sono state effettuate presso il laboratorio di Geochimica dei Fluidi dell'INGV di Roma in gas cromatografia, con il metodo del gas ospite (nel nostro caso è stato usato l'Argon) proposto da Capasso e Inguaggiato (1988). La composizione dei gas disciolti (espressa in cc/L a STP) è stata calcolata partendo dalla composizione della fase gassosa essolta che è funzione dei coefficienti di solubilità di ogni singola specie presente nella miscela. La determinazione del radon è stata eseguita presso il laboratorio di radionuclidi dell'INGV di Roma tramite spettrometria γ su canestrini a carboni attivi; la misura specifica dell'attività del radon è stata quindi effettuata attraverso la rilevazione delle radiazioni γ emesse dai suoi due figli a breve tempo di dimezzamento, ²¹⁴Pb e ²¹⁴Bi (Mancini et al., 2000). La spettrometria γ è stata accoppiata a canestrini a carboni attivi (ACC) i quali assorbono il gas contenuto all'interno dell'acqua campionata. L'analisi del rapporto isotopico ³He/⁴He (espressa in termini di rapporto R/R_a, dove R rappresenta il rapporto ³He/⁴He nel campione e R_a è il rapporto ³He/⁴He nell'aria, pari a 1.39×10⁻⁶) è stata eseguita presso il laboratorio isotopico gas nobili dell'INGV di Palermo tramite spettrometria di massa.

Il carbonio inorganico totale disciolto (TDIC) e la pCO₂ (pressione parziale di CO₂) dei diversi campioni di acqua sono stati calcolati utilizzando come dati di input il contenuto di bicarbonato e il pH. Si è fatto riferimento al codice di calcolo PHREEQC v. 2.18 (Parkhurst e Appelo, 1999) operando con il database del Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL).

La relazione di riferimento che permette di calcolare la pCO₂ è esposta di seguito:



$$K_0 = [\text{H}_2\text{CO}_3] / [\text{CO}_2] \qquad \text{Eq.1}$$

$$K_1 = [\text{H}^+][\text{HCO}_3^-] / [\text{H}_2\text{CO}_3] \qquad \text{Eq.2}$$

$$[\text{CO}_2] = [\text{H}_2\text{CO}_3] / K_0 \qquad \text{Eq.3}$$

$$[\text{H}_2\text{CO}_3] = [\text{H}^+][\text{HCO}_3^-] / K_1 \qquad \text{Eq.4}$$

$$[\text{CO}_2] = [\text{H}^+][\text{HCO}_3^-] / K_0 K_1 \qquad \text{Eq.5}$$

$$\log[\text{CO}_2] = \log[\text{H}^+] + \log[\text{HCO}_3^-] - \log K_0 - \log K_1 \qquad \text{Eq.6}$$

Sostituendo all'equazione: $\log[\text{H}^+] = -\text{pH}$ e $\chi\text{CO}_2 = \text{pCO}_2 * K_H$ si ottiene:

$$\log(\text{pCO}_2) = \log[\text{HCO}_3^-] - \text{pH} - \log K_0 - \log K_1 \qquad \text{Eq.7}$$

dove $[HCO_3^-]$ è espresso in moli/l, K_0 e K_1 sono costanti di equilibrio temperatura dipendenti, pCO_2 rappresenta $1/pCO_2$.

L'equazione che consente il calcolo della pCO_2 è la seguente:

$$\log(pCO_2) = \log[HCO_3^-] - pH - \log K_0 - \log K_1 \quad (4.1)$$

dove $[HCO_3^-]$ è espresso in moli/L, K_0 e K_1 sono costanti di equilibrio note dipendenti dalla temperatura, definite come:

$$K_0 = \frac{[H_2CO_3]}{[CO_2]} \quad K_1 = \frac{[HCO_3^-][H^+]}{[H_2CO_3]}$$

Le analisi isotopiche (O, H, C, Sr, T) sono state eseguite su campioni non filtrati. Per la determinazione del δD e $\delta^{18}O$ sono state prelevate due aliquote ciascuna da 100 mL, mentre per la determinazione del $\delta^{13}C$ sono stati prelevati 250 mL di campione; entrambi, sono stati conservati in bottigliette di PVC. Per la determinazione del rapporto isotopico $^{87}Sr/^{86}Sr$ e del trizio sono state prelevate due aliquote ciascuna da 1000 mL e rispettivamente conservate in bottigliette di PVC.

I rapporti isotopici di ossigeno e idrogeno dell'acqua (espressi con la tipica notazione $\delta^{18}O$ e δD in ‰ vs. VSMOW) sono stati determinati in parte tramite spettrometria di massa presso i laboratori INGV di Palermo con strumentazione Finnigan Delta Plus XP e in parte presso i laboratori dell'ISO4 di Torino utilizzando la tecnologia WS-CRDS (Wavelength-Scanned Cavity Ring Down Spectroscopy). L'errore analitico è di $\pm 0.1\%$ per $\delta^{18}O$ e $\pm 1\%$ per δD .

Il rapporto isotopico del carbonio ($^{13}C/^{12}C$) del TDIC è stato analizzato presso il laboratorio dell'ISO4 di Torino utilizzando uno spettrometro di massa (Finnigan Delta Plus) seguendo la procedura descritta da McCrea (1950). I rapporti isotopici di C, O e H sono espressi, rispettivamente, come $\delta^{13}C$ ‰ vs. PDB e come $\delta^{18}O$ e δD ‰ vs. V-SMOW2 (Craig 1961), seguendo la convenzione internazionale definita dalla International Atomic Energy Agency (IAEA).

Il rapporto isotopico $^{87}Sr/^{86}Sr$ è stato analizzato presso il laboratorio di spettrometria di massa TIMS dell'IGG di Pisa.

L'analisi del trizio (espresso come U.T. = Unità di Trizio) è stata eseguita presso il laboratorio isotopi radioattivi dell'IGG di Pisa utilizzando uno spettrometro Quantulus a scintillazione liquida per conteggio di campioni a basso livello di radiazioni.

5. Risultati e discussione dei dati

5.1 Lavoro svolto e presentazione dei dati

Nell'ambito della presente tesi sono stati analizzati 192 campioni di acque di sottosuolo (175 prelevati da pozzi, sia privati che comunali, e 17 da sorgenti naturali, **figura 5.1**) nell'area urbana di Roma (entro il GRA) e in zone immediatamente adiacenti, per un'estensione totale dell'area investigata di 621 km². A completamento del lavoro effettuato, sono stati considerati anche i dati chimico-fisici, chimici e isotopici (purtroppo solo per alcune acque la serie è quasi completa) presenti nei lavori svolti nell'ultima decade nell'area urbana di Roma (tesi e tesine di laurea, pubblicazioni, relazioni tecniche, per un totale di ulteriori 19 siti) (Vivona, 2001; Lanzarone, 2003; Corazza & Lombardi, 2005; De Simone, 2012).

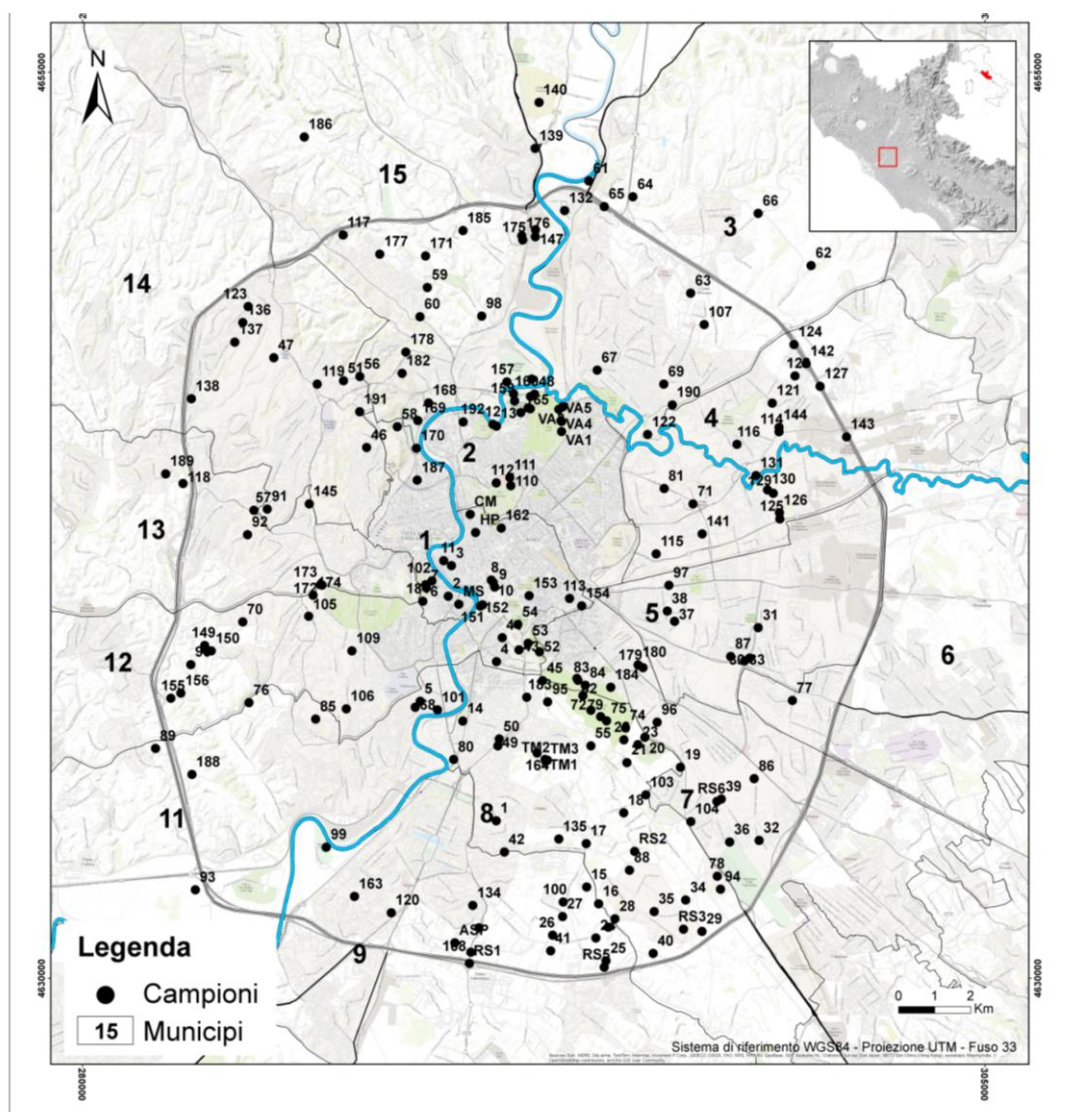


Figura 5.1. Mappa della ubicazione dei 192 punti di campionamento nell'area urbana di Roma (ID = numeri) e dei 19 presenti nei lavori in letteratura (ID = numeri e sigle).

I dati di campagna e di laboratorio sono riportati nell'appendice A (**tabelle A1-A6**).

5.2 La Factor Analysis

L'elevato numero di acque analizzate ha richiesto una trattazione statistica del dato geochimico tramite l'utilizzo della tecnica esplorativa multivariata denominata *factor analysis* (i.e. analisi fattoriale); tale tecnica è stata applicata utilizzando il software *Statistica 6*. Il fine di questa procedura è identificare eventuali associazioni di acque in fattori, cui assegnare un significato geochimico a seconda del numero e del tipo di associazione ottenuta utilizzando le differenti variabili. Tale approccio facilita sia l'individuazione di campioni anomali all'interno di gruppi di acque aventi, per esempio, lo stesso chimismo, sia il riconoscimento di *trend* particolari quali miscelamenti tra acque, processi di interazione acqua-roccia, ecc. L'analisi fattoriale si pone l'obiettivo di riassumere l'informazione contenuta in una matrice di correlazione o di varianza/covarianza, cercando di individuare statisticamente le dimensioni latenti e non direttamente osservabili. In sintesi si può affermare che se due variabili hanno una forte correlazione con uno stesso fattore, una parte non trascurabile della correlazione tra le due variabili si spiega col fatto che esse hanno quel fattore in comune. Fornendo, quindi, un principio di identificazione di questi fattori comuni, l'analisi fattoriale fornisce una descrizione in forma semplice, della complessa rete di interpolazioni esistente nell'ambito di un insieme di variabili associate. Questa descrizione consente di definire, all'interno della matrice di correlazione, un limitato numero di componenti indipendenti l'una dall'altra e identificate nei fattori: esse spiegano il massimo possibile di varianza delle variabili contenute nella matrice d'informazione originaria. Data, pertanto, una matrice $n \times p$ contenente p variabili rilevate su n unità, si tratta di verificare in che misura ciascuna variabile costituisce una ripetizione della descrizione effettuata dalle rimanenti $p-1$ e, quindi, se esiste la possibilità di raggiungere la stessa efficacia descrittiva con un numero minore di variabili non osservate (latenti) dette, appunto, fattori. A questi fattori si attribuirà un significato geochimico da valutare opportunamente in base al contesto idrologico, litologico e geologico pertinente all'area in studio. Per l'estrazione dei fattori è stata utilizzata la tecnica dell'analisi delle componenti principali (PCA), un metodo di trasformazione matematica di un insieme di variabili in un nuovo insieme di variabili composite (componenti principali) ortogonali (cioè indipendenti) tra di loro e che spiegano la maggior parte della variabilità dei dati. Uno degli scopi dell'analisi della PCA è la riduzione del numero delle variabili in un numero ridotto di fattori; è utile pertanto stimare la matrice dei coefficienti di punteggio fattoriale del modello. Tali punteggi possono essere utili per l'interpretazione dei fattori ottenuti.

La PCA consta di tre fasi: 1) Studio della correlazione tra le variabili considerate; 2) Estrazione dei fattori (per ridurre il numero di variabili) e 3) Rotazione degli assi per ottenere dei fattori che siano più facilmente interpretabili.

Poiché uno degli obiettivi della PCA è quello di ottenere fattori che spieghino le correlazioni tra variabili, tali variabili devono essere in qualche modo collegate tra loro. Se le relazioni tra le variabili sono deboli, è difficile che esistano fattori comuni.

Per lo studio della correlazione tra le variabili considerate si determinano i k_{j1} coefficienti del primo fattore che deve esprimere la miglior combinazione lineare tra le variabili rendendo massima la % di variabilità spiegata. Successivamente si cercano i coefficienti k_{j2} del secondo fattore che deve esprimere la seconda migliore combinazione lineare con la condizione che tale seconda componente sia ortogonale alla prima. Le altre componenti si determinano allo stesso modo fino a che non viene esaurita tutta la varianza (ciò avviene quando il numero delle componenti è uguale a quello delle variabili). Ciascuna CP (Componente Principale) estratta è caratterizzata da un autovalore, che esprime la proporzione della varianza riprodotta dalla componente stessa; le prime CP estratte sono quelle che hanno autovalori più elevati e sintetizzano cioè al meglio l'informazione contenuta nella matrice dei dati originaria. Vengono scelti gli autovalori maggiori di un certo limite prefissato, di solito l'unità, poiché valori minori conducono a fattori che spiegano meno di quanto una sola variabile possa spiegare. Una volta estratte le componenti si ottiene la comunalità. Essa è la somma dei quadrati dei coefficienti di correlazione tra una variabile z e le componenti estratte, e rappresenta la quantità di varianza riprodotta dall'insieme delle componenti estratte che esprimono la variabile z . Qualora si considerassero tutte le componenti estratte, il valore della comunalità sarà uguale a 1 per tutte le variabili (il 100% della varianza delle variabili è riprodotta dall'insieme delle componenti). Se invece si considerano solo le prime CP, il valore della comunalità di ciascuna variabile sarà inferiore a uno, cioè si riprodurrà solo una parte della varianza di tale variabile. Dagli autovalori è possibile ricavare la "matrice dei componenti" (o matrice dei pesi fattoriali) che è utile per scrivere le relazioni tra le variabili di partenza e i fattori trovati. La rotazione degli assi è un cambiamento di posizione delle dimensioni ottenute nella fase di estrazione dei fattori, mantenendo il più possibile fissa la varianza spiegata dalle dimensioni di partenza.

La rotazione si sostanzia nella riduzione dei pesi fattoriali che nella fase precedente erano già relativamente piccoli e nell'incremento dei pesi che dominavano nella prima fase. Esistono due classi di rotazione: rotazioni ortogonali (l'ortogonalità dei fattori viene mantenuta dopo la rotazione), come Varimax, Quartimax e Equimax e rotazioni oblique (conducono a fattori correlati tra di loro). Il criterio Varimax (usato nel presente lavoro) massimizza la varianza tra i

pesi fattoriali con iterazioni successive; ciò conduce a fattori che sono spiegati da poche variabili e il risultato finale è una nuova matrice dei fattori ruotati. Per la rotazione dei fattori è stata utilizzata la rotazione ortogonale *varimax* semplice. I casi analizzati sono 211 (campioni totali, **tabelle A1-A6**) ma, a causa dell'assenza dei dati chimici soprattutto in quelli di letteratura, i casi validi si riducono a 191; la matrice di correlazione è stata calcolata per le 16 variabili più significative considerando l'assetto litologico dell'area in studio (F, Cl, SO₄, HCO₃, Na, K, Mg, Ca, B, Rb, Sr, Ba, SiO₂, Rn, log PCO₂, δ¹³C). Sono stati estratti 4 fattori (**tabella 5.2**) imponendo un autovalore minimo pari a 1, in cui sono evidenziati i pesi fattoriali > 0.5 (**tabella 5.3**); i quattro fattori ottenuti spiegano una varianza totale del 78%, e sono di seguito elencati:

Estrazione: Componenti principali				
Fattore	Autovalore	% Totale	Cumulo Autovalori	Cumulo %
1	7.114492	44.46558	7.11449	44.46558
2	2.849899	17.81187	9.96439	62.27745
3	1.502042	9.38776	11.46643	71.66521
4	1.060115	6.62572	12.52655	78.29093

Tabella 5.2. Fattori estratti, loro percentuali della varianza totale, cumulata degli auto valori e della varianza.

- Il primo fattore (44% della varianza totale) che associa i seguenti parametri: cloro, bicarbonato, sodio, potassio, magnesio, boro, rubidio. Analizzando i punteggi fattoriali, che identificano “il peso” che ogni campione ha nel determinare la robustezza di un determinato fattore, si nota come essi mostrano valori molto elevati (fino a 6-7) per i campioni 157, 158, 159, 160, 165, che presentano una salinità molto elevata e peculiari caratteristiche chimiche (**tabelle A1-A6 e 5.4**). Altri punteggi elevati (> 1) appartengono ai campioni salini 64, 99, 117, 171 e 186 (**figura 5.1**);
- Il secondo fattore (18% della varianza totale) che associa: fluoro, stronzio, silice, radon, log PCO₂ e, in misura minore potassio e rubidio. Questo fattore rappresenta in maniera esclusiva le caratteristiche geochemiche delle acque ricche in anidride carbonica e in radon che interagiscono con le vulcaniti albane (dominio vulcanico). 37 campioni presentano punteggi fattoriali > 1 (evidenziati in rosso, **tabella 5.4 e figura 5.1**). Il potassio è l'elemento guida per queste acque, stante la peculiare composizione chimica delle rocce vulcaniche in questo settore dell'Italia centrale (ricca in leucite), insieme a fluoro, rubidio, stronzio e silice che dai minerali costituenti le rocce sono trasferiti alla fase acquosa con il processo di interazione acqua-roccia favorito dall'ambiente acido. Per l'elevato contenuto in uranio e radio delle rocce albane in questo fattore viene contemplata e associata la variabile radon, la

cui alta attività è caratteristica peculiare delle acque di sottosuolo che interagiscono con questa litologia.

- Il terzo fattore (9% della varianza totale) associa: bicarbonato, magnesio, calcio, bario, log PCO_2 , e in misura minore lo stronzio. Questo fattore potrebbe rappresentare un'evoluzione geochimica delle acque a contenuto salino più elevato appartenenti soprattutto al primo e in misura minore al secondo fattore, e può essere interpretata come dovuta a processi di interazione acqua-roccia più spinti con le litologie sedimentarie e vulcaniche, in presenza di un contenuto mediamente più elevato di CO_2 . La CO_2 in soluzione facilita ulteriori arricchimenti negli elementi minori e in traccia (bario soprattutto, e in misura minore lo stronzio), oltre a quelli già presenti nei precedenti due fattori. I punteggi fattoriali elevati (> 1) confermano quanto asserito, associando in questo fattore i campioni salini (evidenziati in fucsia, **tabella 5.4** e **figura 5.1**) 12, 13, 19, 34, 91, 98, 99, 101, 120, 148, 149, 150, 163, 168, 169, 170, 186 e 187;
- Il quarto fattore (7% della varianza totale) associa calcio e solfato. Questo fattore è molto simile al primo, e potrebbe rappresentare le acque che interagiscono con le litologie delle unità sedimentarie (evidenziati in blu, **tabella 5.4**). I punteggi fattoriali maggiori di 1 appartengono ai campioni 5, 7, 13, 53, 60, 61, 65, 85, 89, 93, 147, 151, 152, 155, 156, 157, 158, 169 (**figura 5.1**).

Come esempio, si riporta di seguito il grafico di **figura 5.2**, che confronta i fattori 1 e 2 che spiegano la maggior parte della varianza complessiva (62%). La figura illustra in maniera molto chiara la netta differenziazione riscontrata tra le acque del dominio sedimentario (fattore 4) e quelle del dominio vulcanico (fattore 2), con le relative associazioni fra variabili considerate. Tale risultato, in realtà, è stato ottenuto effettuando una nuova analisi fattoriale eliminando, dal fattore 1, i campioni con punteggio molto elevato (acque di Tor di Quinto), per evitare l'effetto mascheramento nei confronti degli altri campioni con simili associazioni. In questo caso i fattori estratti sono solo tre, in quanto i fattori 1 e 4 si fondono in uno solo, inglobando le acque del dominio sedimentario appartenenti ad entrambi; di fatto l'associazione delle variabili in fattori rimane inalterata, con la netta divisione tra acque del dominio vulcanico e quelle del dominio sedimentario.

Riassumendo, infatti, si può affermare che l'analisi fattoriale effettuata sui campioni di acque di sottosuolo dell'area romana ha messo in luce tre principali gruppi di acque: dominio sedimentario, dominio vulcanico e Tor di Quinto. Tali gruppi verranno riportati nei diagrammi quadrati, binari e ternari che seguiranno, al fine di evidenziare i principali processi di interazione

acqua-roccia e l'origine dei soluti disciolti tenendo conto della loro presenza e abbondanza nelle rocce costituenti il substrato geologico della capitale.

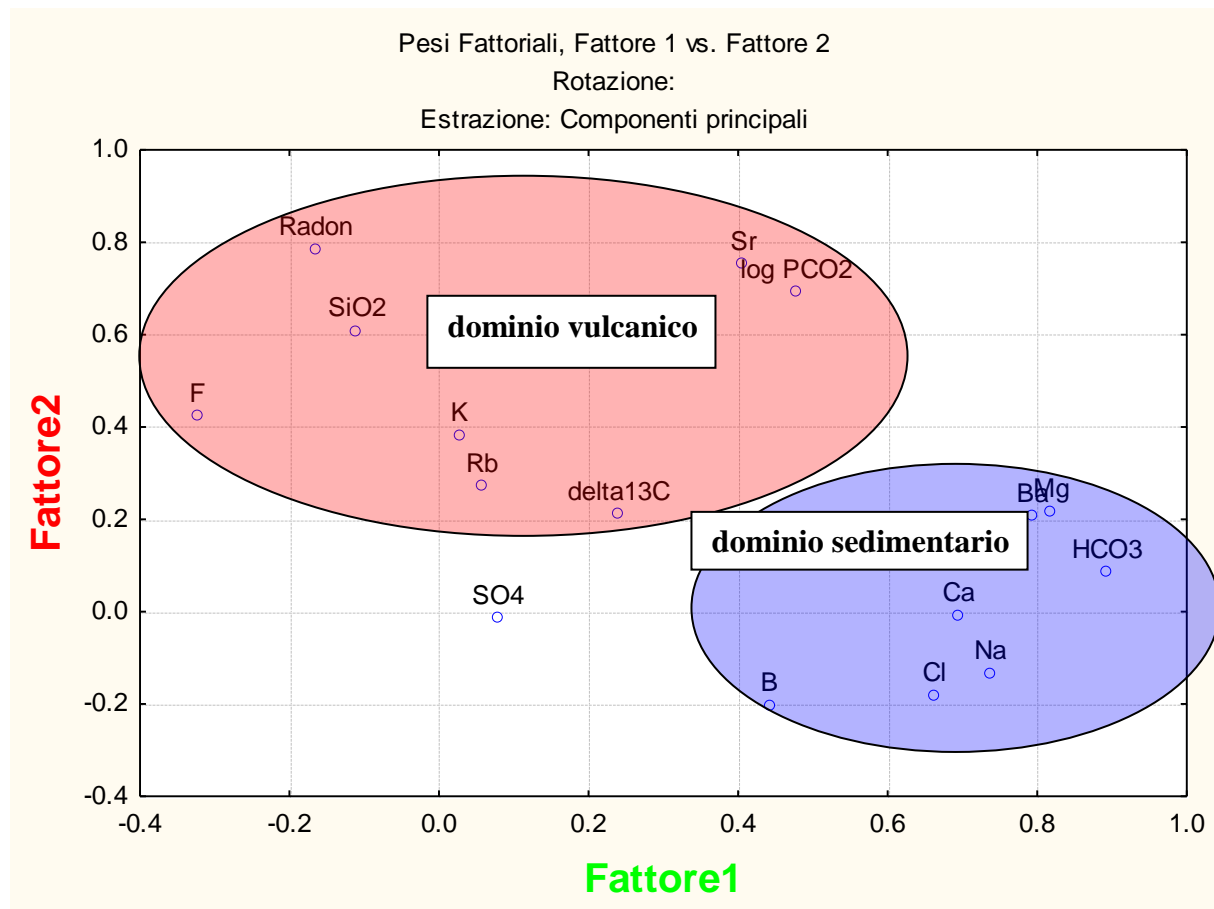


Figura 5.2. Confronto fra i fattori 1 e 2 dell'analisi fattoriale: è ben evidenziata la differenza tra le acque del dominio sedimentario (fattore 4 in cui sono associate Ca, Na, Cl, HCO₃, Mg, Ba, e in misura minore B) e quelle del dominio vulcanico (fattore 2 in cui sono associate Radon, SiO₂, Sr, log PCO₂, e in misura minore F, K, Rb e $\delta^{13}\text{C}$). Per la spiegazione di come è stata ottenuta tale associazione tra variabili, si veda il testo.

Pesi Fattoriali (Varimax smp) Estrazione: Compon. principali (Pesi marcati sono > 0.5)				
Variabile	Fattore 1	Fattore 2	Fattore 3	Fattore 4
F	0.092443	0.567373	-0.318274	-0.258054
Cl	0.825093	-0.147189	0.265084	0.233142
SO ₄	0.308192	-0.013924	-0.004670	0.862425
HCO ₃	0.739682	-0.013039	0.586819	0.207928
Na	0.835026	-0.128774	0.287825	0.199280
K	0.833204	0.432018	-0.046308	0.063741
Mg	0.534491	0.063438	0.641679	0.299150
Ca	0.447367	-0.086293	0.515166	0.568188
B	0.946839	-0.037093	0.130343	0.176337
Rb	0.843895	0.374126	-0.016367	-0.142787
Sr	0.461553	0.565964	0.449059	0.220983
Ba	0.026815	0.033256	0.892191	-0.151482
SiO ₂	0.042787	0.681641	0.018013	-0.402471
Radon	-0.167491	0.808217	0.007744	0.006746
log PCO ₂	0.451257	0.583169	0.514750	0.100625
δ ¹³ C	0.450591	0.300917	0.232795	-0.465756
Var. Sp.	5.467712	2.569886	2.612544	1.876406
Prp.Tot.	0.341732	0.160618	0.163284	0.117275

Tabella 5.3. Fattori estratti e pesi fattoriali delle variabili considerate.

Punteggio fattoriale				
Campione	FATTORE 1	FATTORE 2	FATTORE 3	FATTORE 4
1	-0.24544	1.38465	-0.35948	-0.32138
2	0.26564	-1.40165	-1.42252	-0.15423
3	0.11280	-1.27034	-0.74588	-0.73845
4	-0.40302	-0.09796	0.35352	0.62670
5	-0.05126	-0.48672	-0.59551	1.01937
6	-0.16509	-0.94894	-0.12299	0.28212
7	-0.23597	-1.02033	-0.87577	2.12734
8	-0.13918	-0.28128	-1.13945	0.75947
9	0.01969	-2.03379	-1.59213	-1.06196
10	-0.03835	-1.42738	-1.19462	-0.40255
11	-0.08603	-1.19414	-0.74511	0.69182
12	-1.01186	0.09139	1.03040	0.91936
13	0.36159	-1.04369	1.09150	1.29499
14	-0.12620	-0.42059	-0.92139	0.53186

15	-0.08500	1.74560	-0.16780	-0.40723
16	-0.33186	1.50333	0.34793	-0.19369
17	-0.09670	1.95835	0.24283	-0.35621
18	0.25640	1.47261	-0.11670	-0.73491
19	-0.76988	1.35096	1.47820	0.49206
20	-0.40838	2.46750	0.85216	0.01508
21	0.17797	1.51607	0.08548	-0.53265
22	0.24897	1.37554	0.05388	-0.68933
23	-0.17329	2.20823	0.24674	-0.13887
24	0.71182	1.99693	-1.41594	-0.24325
25	0.30113	0.91590	-1.12159	-1.03862
26	-0.07097	1.49054	-1.38414	-0.82772
27	-0.18495	0.57015	-0.14408	-0.55818
28	0.31598	1.31422	-0.19944	-0.85343
29	0.17212	1.04072	-2.02354	-1.25252
30	0.03214	0.55778	-0.49389	-0.49773
31	0.11829	0.33776	-0.48058	-0.59865
32	-0.05026	1.70636	0.28194	0.35183
33	-0.26475	0.59819	0.38752	-0.11083
34	-0.11310	1.92274	1.10068	-0.25952
35	-0.44789	3.24743	0.05994	0.14815
36	0.28991	1.09963	0.67824	-0.39350
37	-0.44273	1.07762	-0.23082	0.57134
38	-0.12466	0.53985	-0.15076	-0.04125
39	-0.06236	1.46556	0.06340	0.10060
40	-0.09089	1.68696	0.79350	-0.91873
41	0.37703	0.53130	-1.28158	-1.10410
42	0.00857	0.38595	-0.83243	-0.83206
43	-0.40151	-0.45058	0.36079	0.49244
44	-0.37768	-0.46612	0.35027	0.67031
45	-0.30027	0.65012	0.27197	0.86411
46	-0.49463	-0.78906	0.29152	0.92327
47	-0.38203	-0.84670	-0.35540	0.00482
48	-0.03575	-0.50159	-0.29701	0.57340
49	-0.23669	0.08505	0.36739	0.98938
50	-0.22340	0.10236	0.38772	0.96751
51	-0.46591	-1.12892	0.25155	0.10316
52	-0.59973	0.13624	0.21397	0.67199

53	-0.07757	-0.03502	-0.14482	1.39413
54	-0.50385	-0.30660	-0.10052	0.31574
55	-0.52225	1.31595	0.69701	-0.15478
56	0.05404	-0.62577	-0.48984	-0.39288
57	-0.33942	-1.02930	-0.55850	0.17042
58	-0.34460	-1.88031	-0.69014	-0.29734
59	-0.37202	-0.99153	-0.12611	0.18791
60	-0.48423	-0.79167	-0.02707	1.33602
61	-0.48664	-0.30607	0.30524	2.60303
62	-0.33142	-1.01090	-0.71318	-0.92313
63	-0.65373	-0.31937	0.37359	-0.33768
64	4.64257	-0.26462	-1.22736	-0.17726
65	-0.75019	-0.68753	0.69388	1.23397
66	-0.34449	-0.71211	-0.30797	-0.67731
67	-0.37907	-1.01422	-0.30085	-0.02219
68	0.01335	-0.76707	-0.24827	-0.23759
69	-0.36019	-0.81511	-0.12333	-0.07615
70	0.09088	-0.40747	-0.85791	-0.12324
71	0.05712	0.06039	-0.88494	-0.50925
72	0.10458	0.94327	0.25322	-0.84236
73	-0.10066	1.56432	-0.01739	-0.76897
74	-0.43171	2.48034	0.14408	0.36218
75	0.01764	1.25885	0.01939	-0.90894
76	0.07533	-0.98449	-0.80863	-0.48958
77	-0.16626	1.32692	-0.80540	0.07375
78	0.02131	1.91524	0.57388	-0.19146
79	0.44820	0.91025	0.51826	0.23288
80	-0.22780	-1.21210	-0.09649	-0.23912
81	-0.35158	0.80239	0.00358	0.78439
82	-0.13917	0.26200	-0.06785	0.32896
83	-0.23239	0.90568	0.42636	0.47344
84	-0.01906	0.41802	-0.52450	-0.17972
85	-0.44476	-0.71782	0.50411	1.10377
86	-0.10362	1.45417	-0.12782	-0.14153
87	-0.02908	1.16379	-0.59670	-0.30982
88	0.22442	1.63994	0.19134	-0.96179
89	-0.45421	-0.30197	0.27984	3.17160
90	-0.57473	-0.70119	0.91882	0.59994

91	-0.69541	-0.57811	1.53558	-1.03252
92	-0.36793	-1.03274	-0.27300	0.06785
93	-0.42242	0.13667	0.67874	4.27323
94	0.28777	1.26511	0.04024	-0.77515
95	0.04248	0.81750	-0.17560	-0.35738
96	-0.22223	1.82062	0.37274	0.41105
97	-0.12186	0.09140	-0.47266	-0.77421
98	-0.34979	-0.30830	1.96584	-0.43731
99	2.31077	-1.17049	4.01404	-0.84470
100	-0.07766	1.10294	-1.14319	-0.63463
101	-0.61037	-0.59608	7.12514	-1.25117
102	-0.01932	-0.74762	-0.62896	0.06393
103	-0.12800	0.57860	-0.27116	-0.31018
104	-0.20658	1.55359	0.53404	-0.30959
105	-0.33911	-1.87892	-0.34595	-0.51116
106	-0.60326	-0.93535	0.28166	0.89702
107	-0.37776	-1.09420	-0.02190	-0.29606
108	-0.28592	0.20506	0.33210	0.51697
109	-0.24074	-0.21193	0.11035	0.42846
110	-0.74246	-0.17713	0.13722	0.41334
111	-0.81495	-0.01668	0.08646	0.63250
112	-0.57221	-0.62622	0.41810	-0.21109
113	-0.32570	-0.53684	-0.32412	-0.12552
114	0.02415	-0.81736	-0.22220	-0.79439
115	-0.00816	0.33630	-0.73379	-0.66670
116	-0.18176	-0.35262	-0.33528	-0.06230
117	1.53751	-0.47403	-0.42384	-1.07687
118	-0.46016	-0.90662	-0.44218	0.23787
119	-0.40281	-0.77149	0.04836	-0.50292
120	-0.67648	-0.36544	1.13247	-0.14131
121	-0.25699	-0.69958	-0.33603	-0.09950
122	0.19666	-0.08839	0.24042	0.10170
123	-0.42408	-0.79099	0.02098	-0.46777
124	-0.45778	-0.64446	-0.09683	0.17888
125	-0.13413	0.39067	-1.20699	-0.32957
126	-0.34333	0.76129	-0.49912	-0.12744
127	-0.32532	-0.64337	-0.64229	-0.42975
128	-0.32880	-0.87639	-0.58527	-0.53866

129	0.06549	0.04923	-1.30033	-0.29779
130	0.00305	0.41175	-0.64721	0.36928
131	-0.39233	-1.68962	-0.34679	-0.36689
132	0.16479	-0.23905	0.93601	0.05228
133	-0.61179	0.84258	-0.63879	0.05340
134	-0.16962	-0.10320	-0.70566	-0.78825
135	-0.17915	1.48602	-0.14469	-0.57451
136	-0.54847	-0.41639	0.26780	-0.31252
137	-0.12498	-1.53844	-0.48336	-0.68425
138	-0.42948	-0.88618	-0.03974	-0.73185
139	0.15562	0.94336	-0.56390	-0.07497
140	0.16009	0.46194	-0.64401	-0.41430
141	0.04380	-0.05435	-0.67448	-0.83011
142	-0.45560	-0.42970	-0.60302	-0.53198
143	-0.26239	-0.55563	-0.11292	0.28375
144	0.06742	-0.70317	-0.38063	-0.52790
145	-0.30058	-0.46275	0.06171	0.16740
146	0.88968	0.37406	-0.16432	0.60031
147	0.83101	0.87481	-0.55671	1.69796
148	-0.47442	-1.21260	1.29480	-0.04206
149	-0.61379	-0.90176	1.24751	0.60189
150	-0.42654	-1.24359	1.44769	-0.15769
151	-0.01333	-0.22549	-0.98569	1.95617
152	-0.06272	-0.20889	-0.85944	1.85588
153	-0.13271	-0.75001	-0.63283	0.05781
154	-0.24281	-0.55013	-0.70341	0.13692
155	-0.52492	-0.45075	0.10177	1.62425
156	-0.59160	-0.56303	0.11038	1.56980
157	1.50045	0.32189	0.96838	1.99142
158	5.57016	1.73790	-0.12884	5.37392
159	6.02891	-0.90525	0.49035	0.85419
160	6.85960	-1.63292	0.95035	0.54797
161	-0.26209	-0.49765	-0.49436	0.24637
162	-0.20253	-0.95328	-0.50322	0.63734
163	-0.88512	0.09388	3.11255	-0.90135
164	0.06406	1.01042	0.09747	-0.86222
165	1.22688	-0.47560	0.28645	-0.31643
166	-0.02520	-0.23316	-0.56961	-0.09763

167	0.58948	-0.36396	-0.37386	-0.19347
168	-0.24785	-0.17904	2.50155	-0.26458
169	-0.61064	0.04090	1.35026	1.93154
170	-0.19051	-1.15059	1.10916	-0.53555
171	1.31207	-0.21164	-1.32864	-1.51091
172	-0.09879	-1.06593	-0.28032	-0.80696
173	-0.30552	-0.26013	-0.00255	-0.15363
174	-0.14144	-0.86496	-0.35097	-0.44756
175	0.14583	-0.77366	-1.36241	-0.83146
176	0.18150	-0.34410	-1.33123	-0.94427
177	-0.33777	-0.64042	-0.38605	-0.81696
178	-0.58652	-0.52399	0.55268	0.48685
179	-0.14015	0.49703	0.13401	-0.23249
180	0.01350	0.43110	-0.17385	-0.19151
181	-0.23868	-1.08356	-0.26507	-0.73361
182	-0.58628	-0.98845	0.11382	0.34902
183	-0.30542	0.01367	0.49086	0.29147
184	-0.09707	0.56953	-0.31921	-0.16344
185	-0.03623	-0.88563	-1.49264	-1.14207
186	4.13514	-0.26692	1.87211	-5.52943
187	-0.02956	-0.80685	4.13030	-1.20869
188	-0.57255	0.60868	0.32030	0.91220
189	-0.22561	-0.54210	-0.42080	-0.98133
190	-0.26134	-0.57543	-0.38342	-0.92186
191	-0.49738	-0.34030	0.22312	0.01727

Tabella 5.4. Punteggi fattoriali dei casi (campioni) validi in ogni fattore estratto.

Le figure 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 rappresentano l'ubicazione dei campioni aventi punteggi fattoriali > 1 appartenenti, rispettivamente, ai fattori 1, 2, 3 e 4 (tabella 5.4). Le acque sono raggruppate seguendo una caratterizzazione geografica, e il loro chimismo è influenzato dalle differenti litologie che ospitano gli acquiferi.

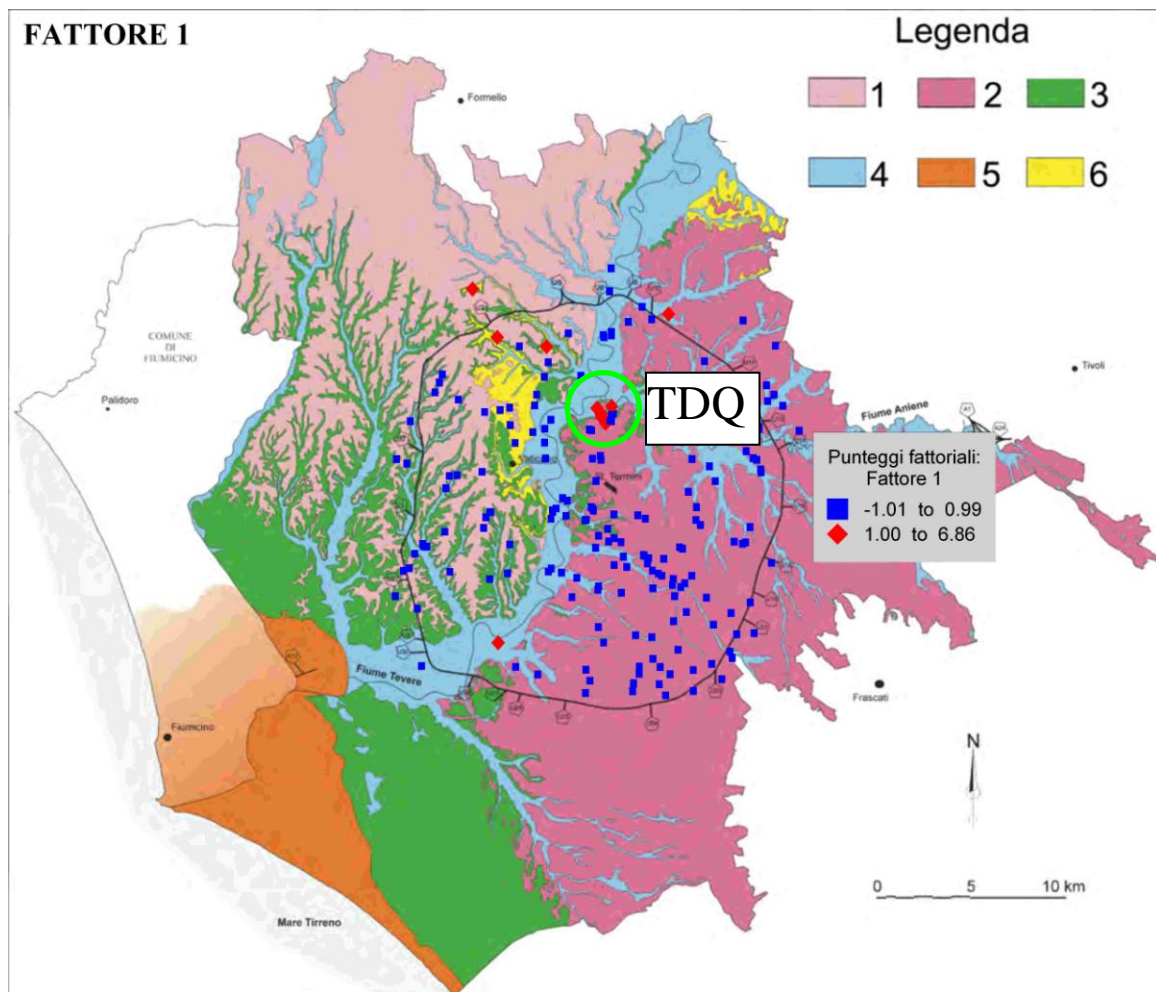


Figura 5.3. Ubicazione dei campioni con elevato punteggio fattoriale (> 1) nel fattore 1. Legenda come in figura 2.1; TDQ = Tor di Quinto.

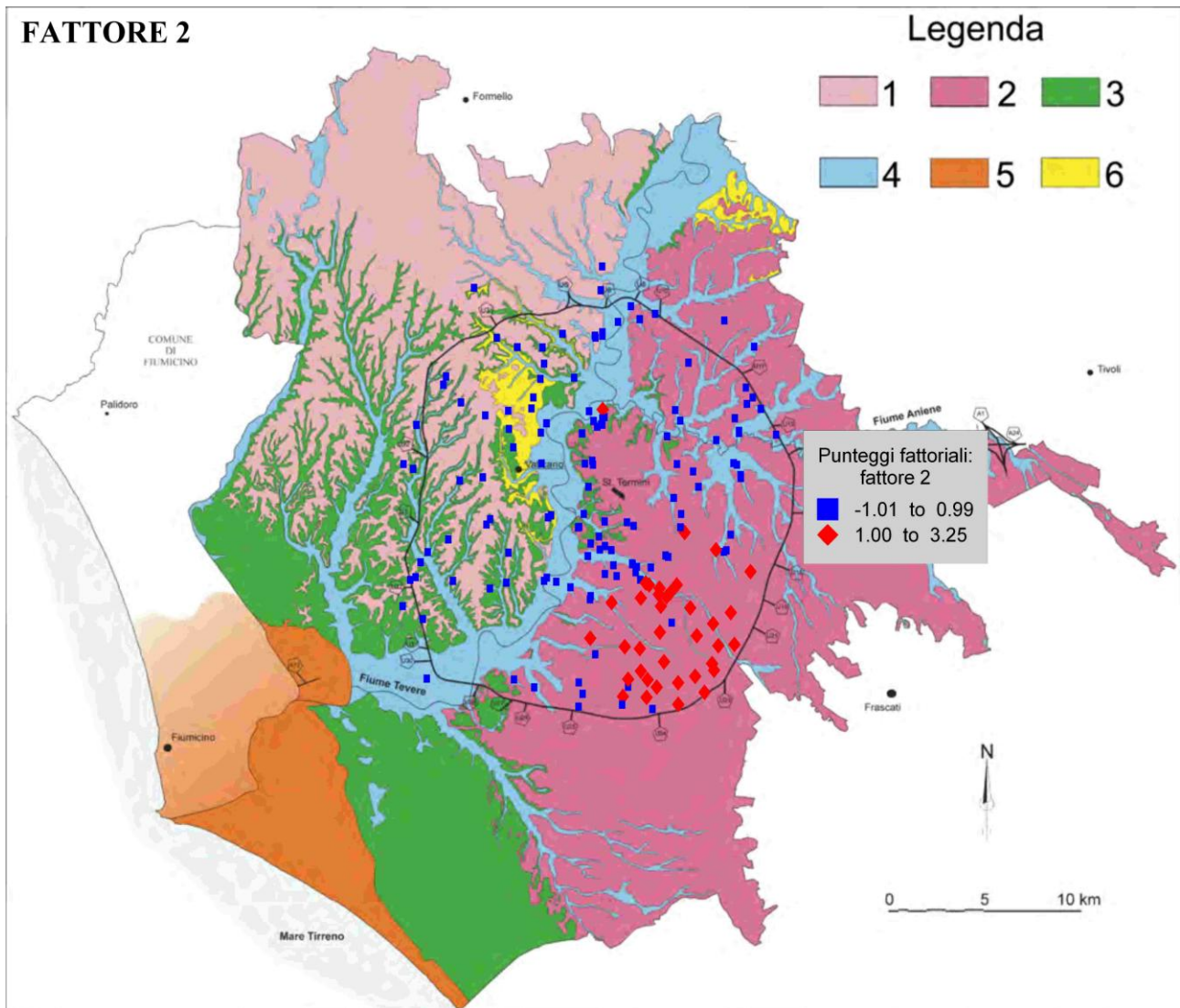


Figura 5.4. Ubicazione dei campioni con elevato punteggio fattoriale (> 1) nel fattore 2. Legenda come in figura 2.1.

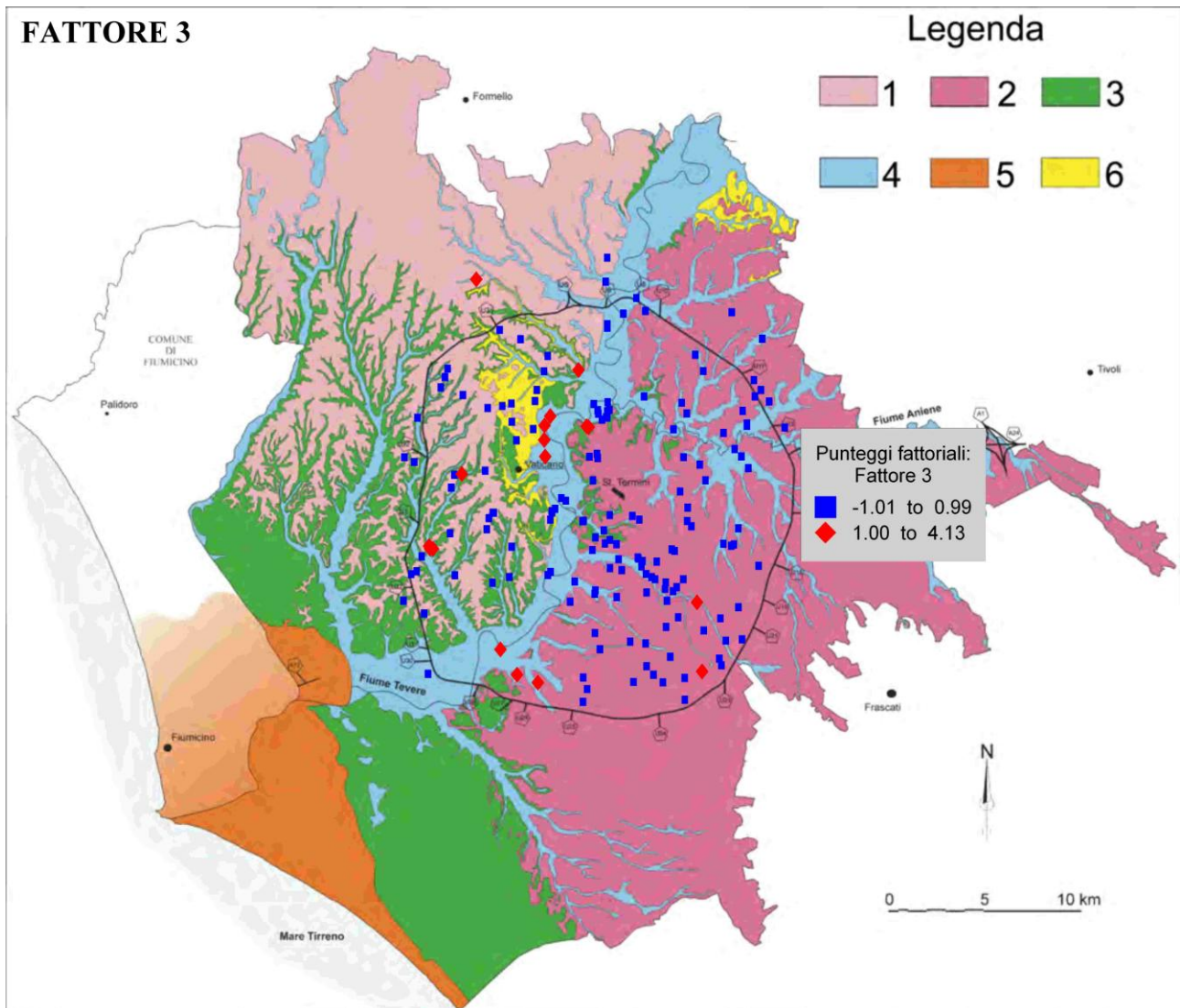


Figura 5.5. Ubicazione dei campioni con elevato punteggio fattoriale (> 1) nel fattore 3. Legenda come in figura 2.1.

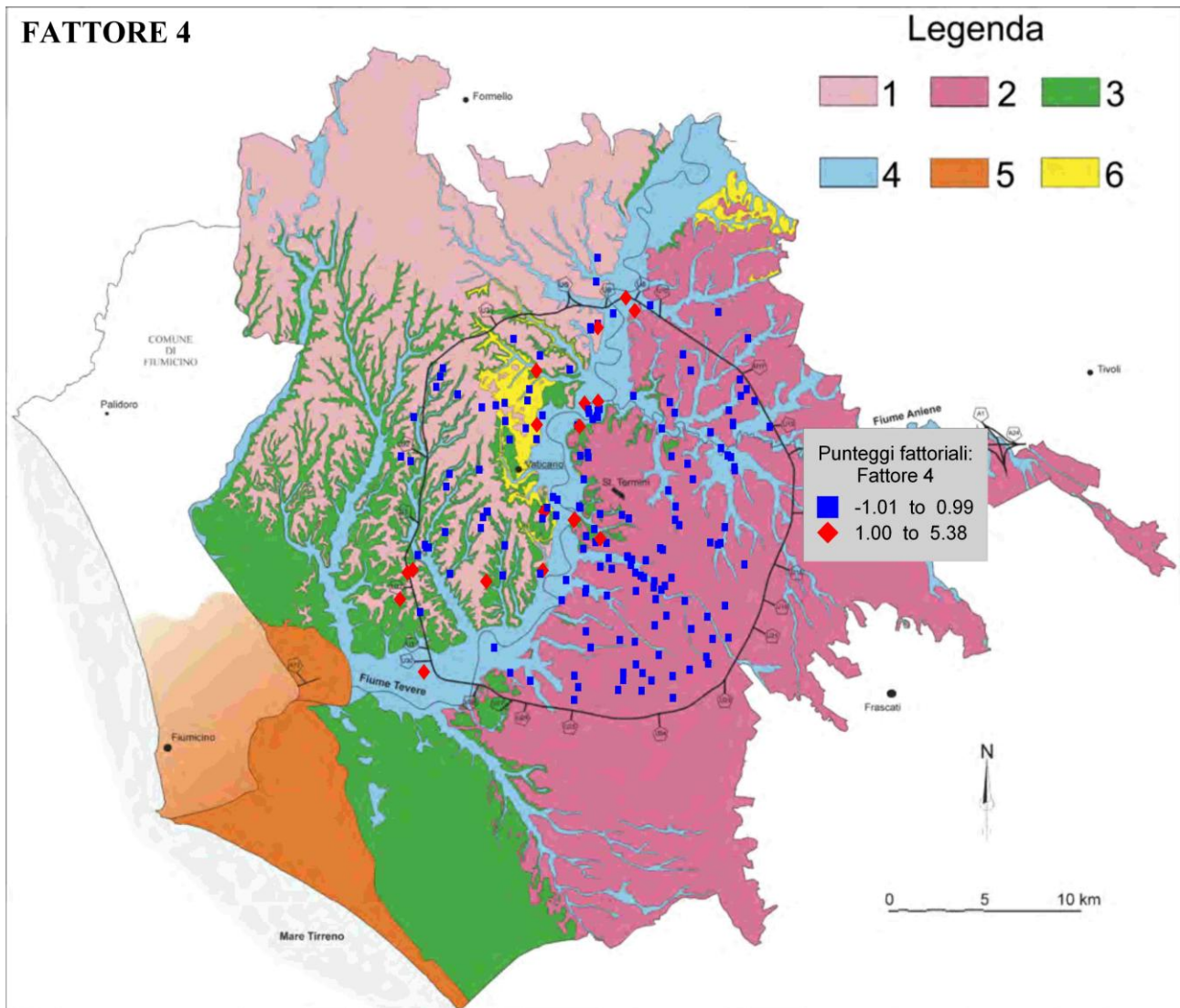


Figura 5.6. Ubicazione dei campioni con elevato punteggio fattoriale (> 1) nel fattore 4. Legenda come in figura 2.1.

5.3 Classificazione delle acque in facies idrochimiche e processi di interazione acqua-roccia: elementi maggiori

La caratterizzazione geochimica delle acque sotterranee campionate nell'area urbana di Roma è stata effettuata mediante l'ausilio del classico diagramma quadrato di classificazione *Langelier Ludwig* (Langelier Ludwig, 1942, **figura 5.7**) e dei diagrammi binari e ternari di seguito riportati (ottenuti tramite il programma *Grapher 6*, **figure 5.8a e 5.8b**). Le acque sono state associate ai tre principali gruppi identificati tramite l'analisi fattoriale; i campioni che non presentavano punteggi fattoriali > 1 o non inseriti nella trattazione statistica perché contenevano pochi dati (campioni della letteratura) sono stati ripartiti tra i gruppi principali in base alle informazioni riguardanti le litologie ospitanti l'acquifero di pertinenza (*cap. 2* e Ventriglia,

2002). Il diagramma riportato in **figura 5.7** è costruito sulla base delle concentrazioni degli elementi maggiori misurati nei campioni d'acqua analizzati ed in base alla loro distribuzione nel diagramma è possibile riconoscere a quale *facies* idrochimica essi appartengano. E' opportuno precisare che le elaborazioni che seguiranno riguarderanno l'evoluzione della composizione chimica delle acque in senso lato, nella loro interezza, al fine di identificare i processi geochemici che giustifichino le abbondanze dei vari elementi chimici nel contesto della situazione geologico-strutturale e idrogeologica dell'area investigata. Eventuali caratteristiche peculiari di determinate acque, se non di interesse generale, non verranno prese in considerazione.

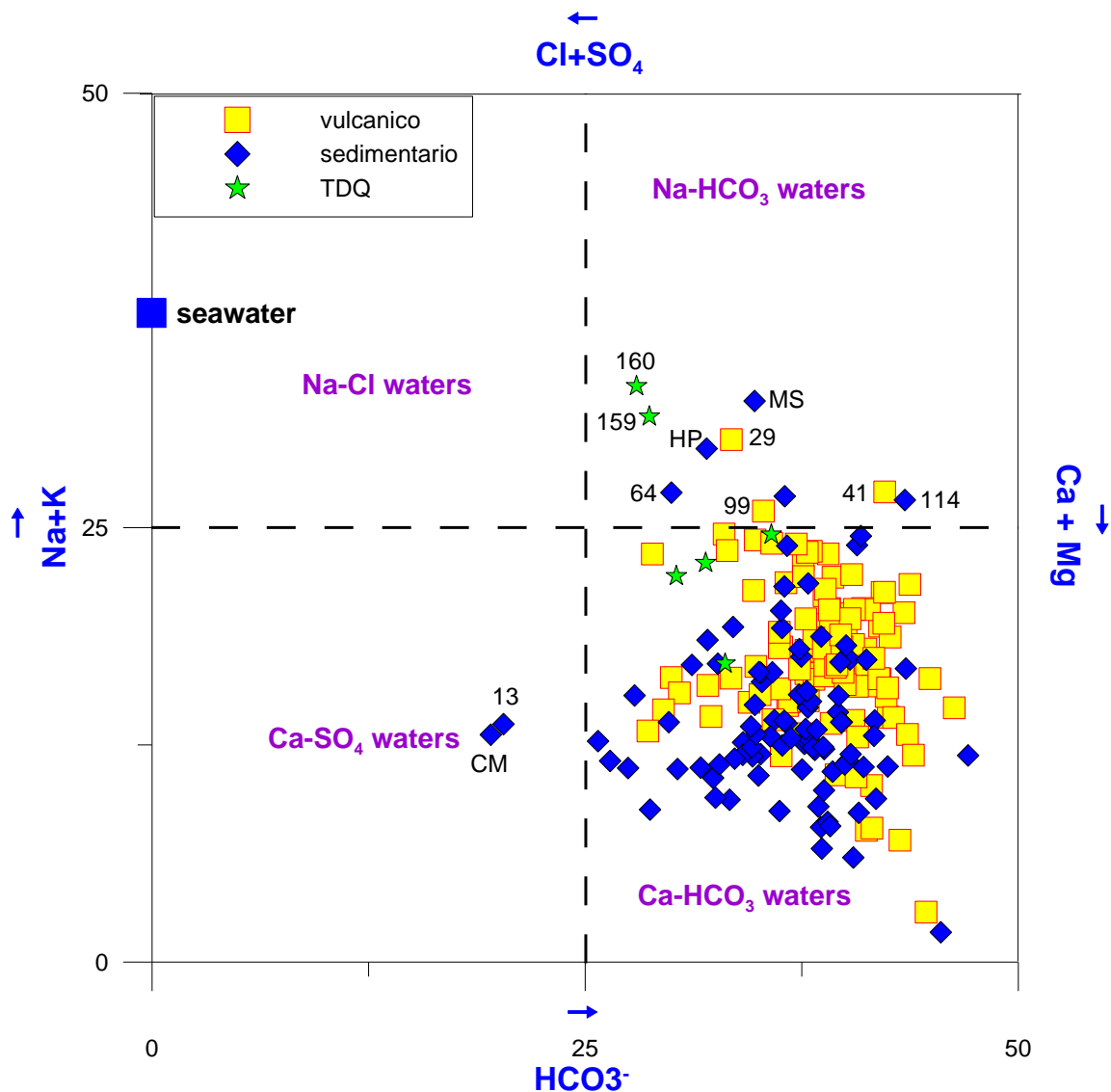


Figura 5.7. Diagramma di *Ludwig-Langelier* delle acque campionate nell'area urbana di Roma. Per confronto, si riporta la composizione chimica dell'acqua di mare locale (Civitavecchia, Cinti et al., 2011). Per la spiegazione dei diversi simboli si faccia riferimento al testo. MS = Monopoli di Stato; HP = Hotel Plaza; CM = Cinema Metropolitan.

Il diagramma quadrato di *Langelier Ludwig* utilizza le concentrazioni delle specie ioniche principali Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , usando i valori di reazione ricalcolati a partire dalle concentrazioni dei principali costituenti cationici e anionici rispettivamente, espresse in eq/l o in meq/l.

Ad esempio:

$$R(\text{Na}) = 50 * \text{CNa} / (\text{CNa} + \text{CK} + \text{CCa} + \text{CMg})$$

$$R(\text{Cl}) = 50 * \text{CCl} / (\text{CCl} + \text{CSO}_4 + \text{CHCO}_3)$$

Avendo a disposizione 7 variabili (4 cationi e 3 anioni) è teoricamente possibile costruire molti diagrammi quadrangolari. Nel diagramma classico $R(\text{Na})$ viene sommato a $R(\text{K})$ e riportato sull'asse Y, mentre $R(\text{HCO}_3)$ viene riportato sull'asse X.

Pertanto, a causa dell'elettroneutralità, in questo diagramma (LLHCO_3) si ha:

$$R(\text{Ca}) + R(\text{Mg}) = 50 - (R(\text{Na}) + R(\text{K})) \text{ e } R(\text{Cl} + \text{RSO}_4) = 50 - R(\text{HCO}_3)$$

A seconda della loro posizione all'interno del diagramma, le acque sono classificate nelle seguenti facies idrochimiche (**figura 5.7**): solfato-clorurato-alcantino terrose (quadrante 1), solfato-clorurato-alcantine (quadrante 2), bicarbonato-alcantine (quadrante 3) e bicarbonato-alcantino terrose (quadrante 4).

Da una rapida ispezione del diagramma risulta chiaro come i campioni siano ben raggruppati in *facies* idrochimiche (di cui una nettamente dominante sulle altre), caratterizzate da processi di interazione acqua-roccia strettamente legati a distinti circuiti idrologici aventi differenti caratteristiche (profondità raggiunte, tempi di residenza, rapporto acqua/roccia, tipo di roccia lisciviata, contenuto gassoso, ecc.).

Più in dettaglio, sono state riconosciute le seguenti *facies* idrochimiche:

1. *Acque Ca-HCO₃* (bicarbonato-alcantino-terrose). Rappresenta la quasi totalità delle acque campionate, pur con una evidente differenziazione al suo interno tra acque circolanti nel dominio sedimentario da quelle appartenenti al dominio vulcanico. Infatti, a parità di *facies* idrochimica di appartenenza, le acque del sedimentario presentano, rispetto a quelle del vulcanico, un rapporto $(\text{Ca} + \text{Mg})/(\text{Na} + \text{K})$ generalmente più elevato, e un contenuto in HCO_3 (i.e. alcalinità) decisamente più basso, a fronte di contenuti maggiori di Cl e SO_4 . In linea generale, si può affermare che queste differenze sono da attribuirsi ai differenti processi di

interazione gas-acqua-roccia che avvengono nell'area romana. I principali, per il dominio vulcanico, sono: *i*) dissoluzione dei metalli alcalini, K in particolare (Gambardella et al., 2005), costituenti i minerali delle rocce vulcaniche, stante la loro particolare composizione chimica in questo settore dell'Italia centrale (Boeri et al., 2009; Freda et al., 2010), e *ii*) dissoluzione di grandi quantità di CO₂ negli acquiferi vulcanici (soprattutto ubicati a Roma sud), mentre per le acque del dominio sedimentario diventa prevalente la dissoluzione di minerali altamente solubili (solfati e cloruri) contenuti in sabbie, conglomerati, argille e marne. Stante la presenza dei nitrati (media 19 mg/l, con valori massimi ben oltre 50 mg/l), una parziale origine antropica (i.e. attività agricola con uso di concimi e fertilizzanti industriali, anticrittogamici e insetticidi a base di prodotti chimici) di cloro e solfato nelle acque analizzate, non può essere scartata. Tre campioni dell'area di Tor di Quinto (158, 165, 192) si collocano vicino al quadrante 3, e sono caratterizzati da bassi valori del rapporto $(Ca + Mg)/(Na + K)$; il loro chimismo tende verso quello bicarbonato-sodico. I processi di interazione gas-acqua-roccia ora citati possono avere, all'interno dei due principali gruppi considerati, diverse estensioni, durate e gradi di intensità, giustificando il differente contenuto dei vari elementi chimici nelle acque a composizione bicarbonato-alcalino-terrosa e la conseguente differente posizione delle acque all'interno del quadrante 4. Tali fattori giustificano anche la diversa posizione dei campioni nei diagrammi ternari delle **figure 5.8a** (cationi) e **5.8b** (anioni), in cui si riesce ad apprezzare in maniera più esplicita, rispetto al *Langelier Ludwig*, l'importanza e il peso che i vari cationi e anioni hanno nel determinare la composizione chimica osservata.

In particolare, nel ternario dei cationi, in cui sono riportate, per confronto, le composizioni chimiche medie delle vulcaniti albane e sabatine, si nota chiaramente come: *i*) le acque del sedimentario presentano un arricchimento preferenziale in Ca rispetto al Mg, confermando bassi rapporti $(Ca + Mg)/(Na + K)$, tranne in alcuni campioni in cui tale rapporto è a favore degli elementi alcalini; *ii*) le acque del vulcanico presentano un'ampia variabilità composizionale in riferimento sia agli elementi alcalini sia ai terrosi (con una preferenza per i primi), con alcuni campioni che mostrano una tendenza ad arricchirsi in magnesio (campioni ubicati a Roma sud come le sorgenti di Tor Marancia e il campione 96 ubicato sulla via Appia) e *iii*) le acque di Tor di Quinto (i campioni più salini) che tendono verso il vertice Na + K. Al fine di discriminare quale elemento tra Na e K prevalga nelle acque analizzate, si è utilizzato il diagramma ternario Na-K-Ca (**figura 5.9**). Si osserva chiaramente come i campioni del dominio vulcanico e del dominio sedimentario si dispongono seguendo due andamenti completamente differenti: il primo presenta un rapporto Na/K piuttosto basso (media pari a 2), mentre il secondo presenta un rapporto Na/K elevato, con la media pari a 20. Le composizioni chimiche medie per le vulcaniti albane e sabatine, cui tendono le acque del vulcanico, sono state effettuate, rispettivamente, sulle analisi riportate da Boeri et al. (2009) e Conticelli et al. (1997). L'andamento osservato è molto importante in quanto conferma: *i*) in maniera inequivocabile la bontà della trattazione statistica effettuata che ha permesso la discriminazione delle acque analizzate in due grandi gruppi in base alle litologie con le quali esse interagiscono e *ii*) la peculiarità delle acque dell'area romana, in cui il K assume una importanza rilevante in qualità di rappresentante dei processi di interazione acqua-roccia, almeno per il dominio vulcanico. Tale caratteristica è dovuta al fatto che le acque circolanti nelle vulcaniti dell'area romana, anche quelle con una PCO_2 più elevata, non raggiungono la saturazione (i.e. l'equilibrio termodinamico) con il minerale primario, la leucite ($KAlSi_2O_6$), che rilascia il potassio. Di conseguenza, tale elemento non può essere rimosso dalla soluzione, raggiungendo i valori correntemente osservati (Gambardella et al., 2005). La netta caratterizzazione del rapporto Na/K nelle acque del sedimentario e in quelle del vulcanico era già stato osservato da Chiodini & Frondini (2001) analizzando le acque dei Colli Albani e dell'area costiera tra l'apparato vulcanico e il mar Tirreno.

Il diagramma ternario HCO_3 -Cl- SO_4 mostra come l'anione dominante in tutte le acque sia il bicarbonato (derivato dalla dissoluzione della CO_2), con alcuni campioni del sedimentario tendenti chiaramente verso il *corner* del solfato (CM su tutti), e con le acque di Tor di Quinto e alcune del sedimentario (campione 13, HP, MS, 64) verso quello del cloro. La discussione sui

processi di interazione gas-acqua-roccia verrà esposta in maniera estesa nel prosieguo del capitolo tramite specifici diagrammi binari e ternari.

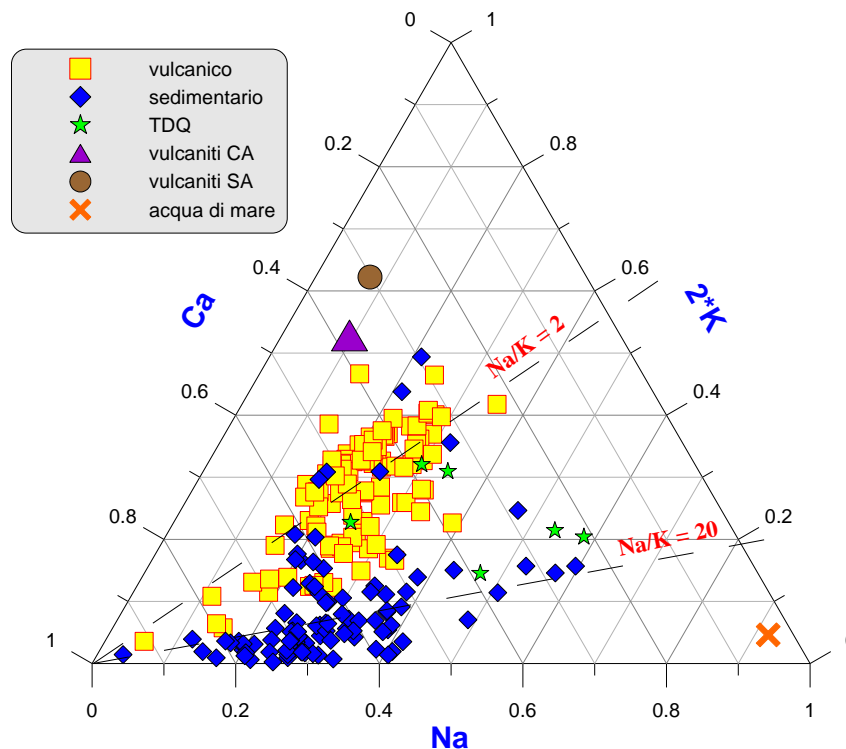


Figura 5.9. Diagramma ternario Na-K-Ca delle acque campionate nell'area urbana di Roma. Per confronto, è riportata la composizione dell'acqua di mare locale (Civitavecchia, Cinti et al., 2011).

2. *Acque Na (Ca-Mg)-HCO₃(Cl)*, bicarbonato-alcaline, rappresentate da due campioni delle acque di Tor di Quinto (159 e 160), che presentano alta salinità, pH acido e un alto contenuto in CO₂. Queste acque hanno un'origine e una composizione chimica completamente differenti da quelle analizzate negli altri settori dell'area romana. Le loro caratteristiche peculiari verranno discusse in seguito nell'ambito della circolazione idrologica generale e dell'assetto geologico profondo e tettonico regionale.

Le acque del dominio vulcanico che presentano questo chimismo, anche se non accompagnato da un evidente arricchimento in Mg e Cl come osservato per le acque di Tor di Quinto, sono la naturale evoluzione di quelle ubicate nel quadrante 4. Infatti, l'alto grado di interazione acqua-roccia, in presenza di un elevato flusso di CO₂, promuove reazioni di tipo incongruente (cioè con la formazione di minerali di alterazione) a carico dei silicati (nell'esempio la leucite), del tipo: $2K(Na)AlSi_2O_6 + 2H_2CO_3 + H_2O \rightarrow 2K(Na)^+ + 2HCO_3^- + 2SiO_2 + Al_2Si_2O_5(OH)_4$ che comportano l'entrata in soluzione dei metalli alcalini, la trasformazione dell'acido carbonico nella sua base coniugata, il bicarbonato, e la formazione di

allumo silicati (generalmente caolinite). L'ambiente acido rende l'acqua più aggressiva nei confronti dei minerali costituenti le rocce presenti e, di conseguenza, i processi di interazione acqua-roccia risultano essere più spinti. Le acque del sedimentario a chimismo bicarbonato-sodico, sia ricche in CO₂ che non, hanno subito probabilmente processi di scambio ionico con le argille (arricchimento in Na e rimozione di Ca e Mg) con le quali interagiscono nel loro percorso sotterraneo. La presenza dominante della smectite (notoriamente caratterizzate da un'elevata capacità di scambio cationico) tra i fillosilicati costituenti le argille plioceniche e pleistoceniche dell'area romana (Bozzano et al., 2006), supporta fortemente questa interpretazione;

3. *Acque Ca-Cl*, clorurato-calciche, rappresentate dal campione 13 e acque Ca-SO₄, rappresentate dal campione del Cinema Metropolitan. Il chimismo Ca-Cl è molto raro da trovare in natura, e la sua genesi non è del tutto chiara. In questo caso si potrebbe ipotizzare la presenza di processi di scambio cationico tra Na e Ca promosso dall'interazione tra acque e argille, in fluidi salini arricchiti in Cl (il campione 13 è ubicato nell'area di Tor di Quinto). Per il cinema Metropolitan, invece, Corazza & Lombardi (2005) hanno ipotizzato apporti di fluidi mineralizzati ricchi in CO₂, collegati a disturbi tettonici profondi.

Nell'ambito di una classificazione idrochimica delle acque del sottosuolo romano può risultare di grande aiuto lo studio dei rapporti stechiometrici tra i diversi soluti al fine di caratterizzare i principali processi di interazione acqua-roccia, di determinare il grado evolutivo all'interno della circolazione sotterranea, e di discriminare i contributi provenienti dalle varie unità geologiche presenti nell'area di studio. Per l'area investigata, stante le generali caratteristiche geochemiche delle acque campionate (*facies* idrochimica dominante bicarbonato alcalino-terrosa), assume particolare importanza il diagramma relativo alla coppia catione/anione Ca-HCO₃, la cui concentrazione è espressa in meq/l (**figura 5.10**), e il cui rapporto stechiometrico è principalmente legato ai processi di dissoluzione/precipitazione della calcite.

Il diagramma in **figura 5.10** mostra come la maggior parte delle acque circolanti in ambienti sedimentari (sabbie, argille, conglomerati) in cui prevale la matrice carbonatica e in alcune circolanti in ambiente vulcanico, dove la calcite è presente in quantità variabili nella matrice di fondo (per esempio nelle pozzolane rosse, Freda et al., 2010), siano ubicate sulla retta determinata dal rapporto $\text{Ca}/\text{HCO}_3 = 1$, tipica delle acque caratterizzate da valori di $\log \text{PCO}_2$ compresi tra -3.5 e -1.5 bar. In questo ambiente, infatti, dato l'elevato tasso di dissoluzione della calcite, avvengono reazioni del tipo: $\text{CaCO}_3 (\text{s}) + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$ che tamponano l'acidità dovuta all'anidride carbonica atmosferica e/o prodotta principalmente nel suolo per reazioni di ossidazione della sostanza organica ivi contenuta. In questo caso, infatti, l'effetto dell'interazione acqua-roccia inteso come neutralizzazione degli ioni H⁺ da parte della base

coniugata HCO_3^- sarà massimo, determinando un pH nella maggior parte dei casi neutro o alcalino (compreso tra 7 e 8). Lo stato termodinamico di queste acque rispetto alla calcite conferma quanto ipotizzato: l'IS (indice di saturazione, pari al rapporto tra \log *Ionic Activity Product* e \log *KT*, dove *K* è la costante di solubilità e *T* la temperatura in °Kelvin) calcolata tramite il programma geochimico *Phreeqc* (Parkhurst & Appelo, 1999) mostra come queste acque siano in equilibrio con la calcite, avendo valori compresi tra -0.4 e + 0.3. Quando l'acqua di sottosuolo riceve un forte flusso gassoso di CO_2 le acque deviano dall'equilibrio con la calcite, arricchendosi in bicarbonato, come nei campioni HP, 64, 99, 101, 187.

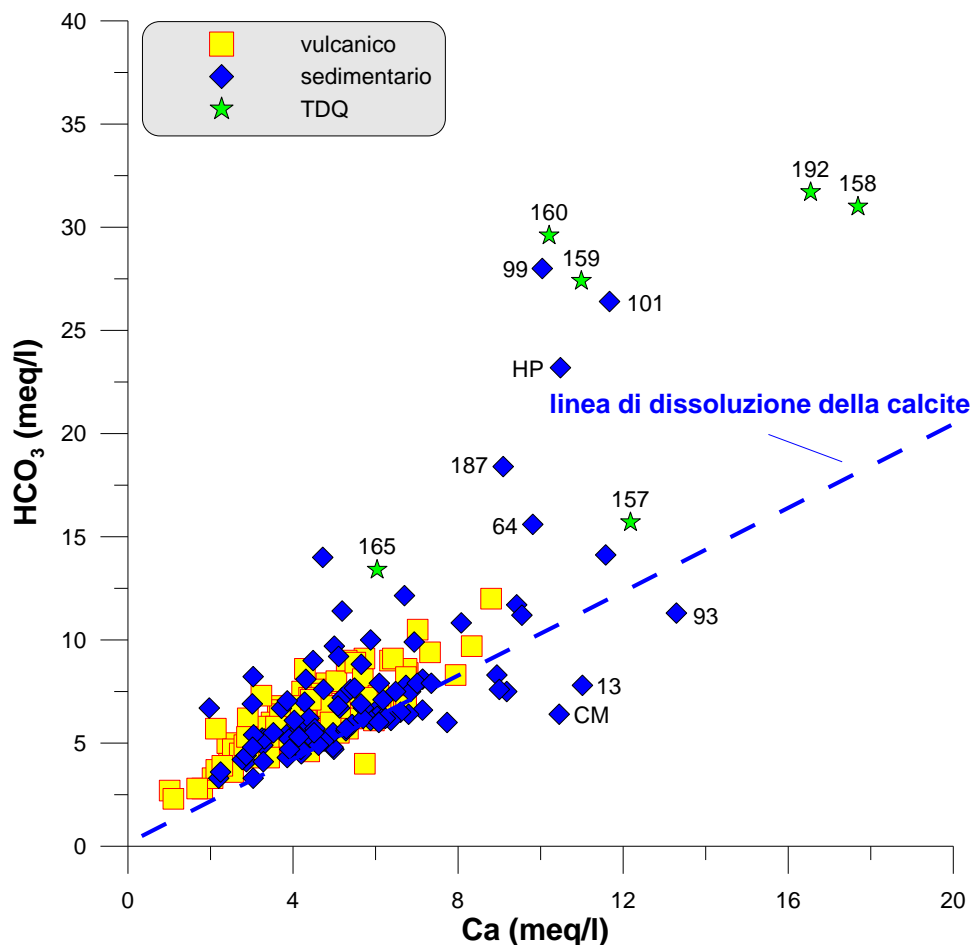


Figura 5.10. Diagramma Ca vs. HCO_3^- delle acque dell'area urbana di Roma. CM = Cinema Metropolitan; HP = Hotel Plaza.

La maggior parte delle acque del dominio vulcanico e principalmente tutte le acque di Tor di Quinto, deviano da questo equilibrio, posizionandosi al di sopra della retta di dissoluzione della calcite, evidenziando un arricchimento in bicarbonato rispetto al calcio (\log PCO_2 calcolata ≥ -1.5 bar) per reazioni del tipo: $\text{CaCO}_3 (\text{s}) + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$. In questo caso le acque presentano IS's della calcite che indicano un disequilibrio termodinamico con questo

minerale (i.e. sottosature). Alcune di queste acque presentano valori di pH generalmente acidi, anche prossimi a 6, che spostano l'equilibrio delle fasi carbonatiche in soluzione con una prevalenza della CO₂ disciolta (i.e. H₂CO₃) a discapito del bicarbonato (punto di equivalenza a pH = 6.35). In questo caso, probabilmente, siamo in presenza di un elevato rapporto acqua (con gas)/roccia che limita l'effetto tamponante di quest'ultima, permettendo alla CO₂ disciolta di liberare protoni e far precipitare il pH ai livelli acidi misurati. Inoltre, la cinetica lenta dei minerali silicatici limita notevolmente il loro tasso di dissoluzione, ostacolando ulteriormente le reazioni di neutralizzazione tipiche dell'interazione acqua-roccia. Le poche acque (essenzialmente del dominio sedimentario, CM, 13 e 93) che ricadono al di sotto della retta di dissoluzione della calcite deviano dall'equilibrio mostrando, invece, un eccesso di calcio, probabilmente dovuto a interazione acqua-roccia o a miscelamenti con acque arricchite in solfato circolanti nelle litologie sedimentarie nel settore occidentale di Roma.

5.4 Processi di interazione acqua-roccia: parametri chimico-fisici, elementi maggiori e in traccia

Le ipotesi riguardanti l'evoluzione delle acque di sottosuolo dell'area urbana di Roma avanzate tramite lo studio del chimismo degli elementi maggiori possono essere approfondite e validate tramite l'uso incrociato delle relazioni tra i vari parametri chimico-fisici misurati direttamente nei siti di campionamento e alcuni parametri particolarmente "sensibili" nell'area romana (per esempio la PCO₂). Ad esempio, considerando i parametri temperatura e conduttanza elettrica (**figura 5.11**) si nota come le acque del dominio vulcanico presentino indizi di termalismo (temperature fino a 26°C) e salinità contenute, inferiori a 1500 µS/cm (valore medio 700-900 µS/cm). Queste acque sono rappresentative della circolazione presente alla base delle vulcaniti nei settori sud-orientale ed orientale di Roma; non si nota alcuna evidente corrispondenza positiva tra i due parametri, in quanto il contenuto salino è limitato dalla scarsa solubilità della maggior parte dei minerali costituenti le rocce vulcaniche, anche in condizioni di termalismo più spinto (campioni di Roma sud con temperature > 20°C). In presenza di un elevato contenuto di CO₂ e di apporti di fluidi salini profondi, i valori della conduttanza elettrica si incrementano fino a 2000-3000 µS/cm, come nel caso dei campioni ASP e 186. Le acque del dominio sedimentario, al contrario, presentano temperature tra i 16 e i 22°C, con salinità che possono raggiungere i 2000-3000 µS/cm (media sui 1000 µS/cm), come nel caso degli acquiferi ricchi in CO₂ ospitati nelle alluvioni e nelle ghiaie del Tevere (campioni HP, Corazza & Lombardi 2005, 64, 99 e 187) o in quelli ospitati nelle sabbie, alternate a limi, del settore occidentale e nord-orientale di Roma. Le

acque di Tor di Quinto si differenziano dai due gruppi precedenti per la salinità molto elevata, che raggiunge quasi i 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e per le temperature all'emergenza, in media più elevate rispetto alle altre acque analizzate.

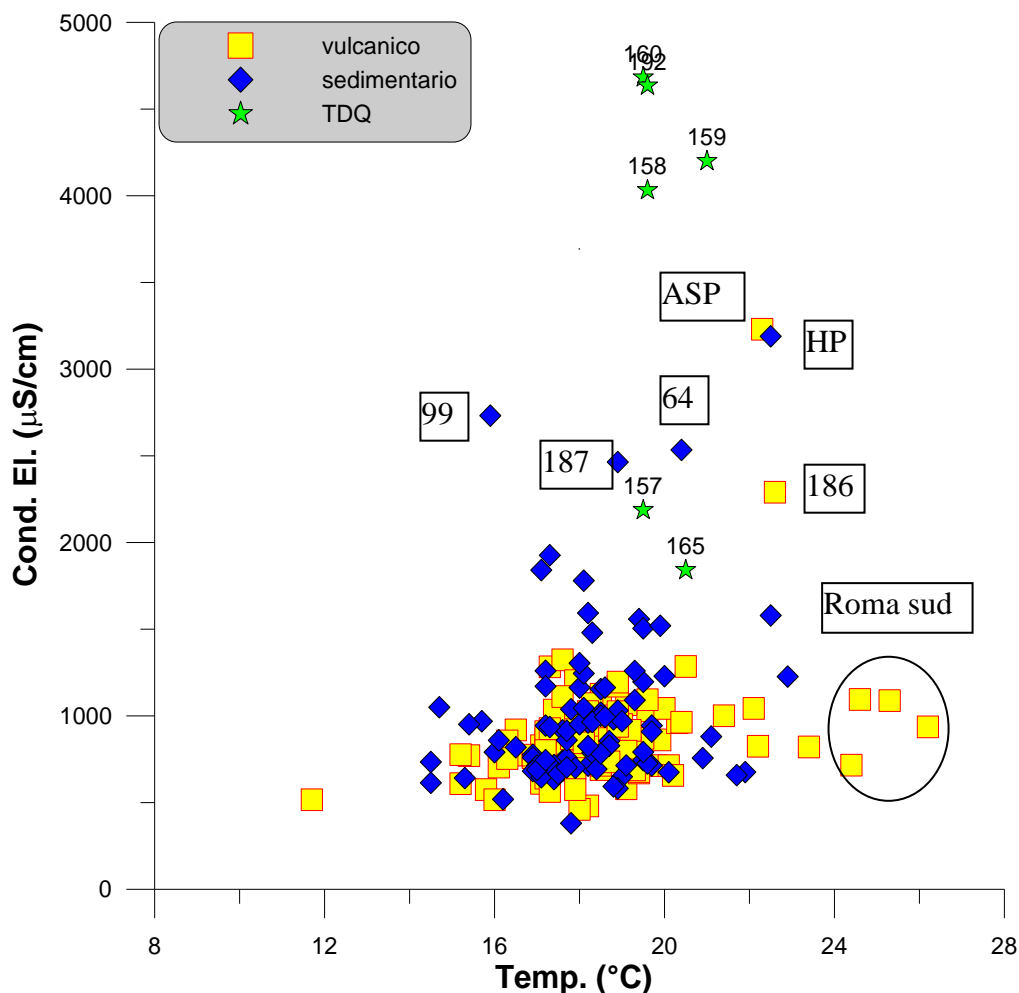


Figura 5.11. Diagramma Temperatura vs. Conduttanza Elettrica delle acque dell'area urbana di Roma. HP = Hotel Plaza; ASP = Acqua San Paolo.

Per comprendere in maniera più chiara il grado di interazione acqua-roccia nell'area investigata e i fattori che la caratterizzano in maniera diretta, è necessario prendere in considerazione il contenuto in CO_2 delle acque di sottosuolo. Come verrà illustrato più in dettaglio nel capitolo seguente, alcuni acquiferi di Roma disciolgono elevati flussi di anidride carbonica di origine profonda, che gioca un ruolo chiave nel determinare l'entità dell'interazione acqua-roccia e modulare il chimismo finale delle acque. Come risulta evidente nel diagramma $\log\text{PCO}_2$ -Conduttanza Elettrica (**figura 5.12**), le acque del dominio vulcanico, sedimentario e di Tor di Quinto, mostrano una correlazione positiva tra contenuto in CO_2 (espressa come log della

sua pressione parziale) e salinità. Quanto osservato riveste particolare importanza nelle acque del dominio vulcanico, in quanto l'ambiente acido ($\log PCO_2 > -1.5$ bar) promuove l'attacco chimico dei silicati, generalmente poco solubili, anche in assenza di alte temperature dei fluidi circolanti, come dimostrato dai dati di campagna. In particolare, Sitchler and Thyne (2007) hanno dimostrato una relazione diretta tra TDS, tasso di dissoluzione dei silicati e $\log PCO_2$ di alcune acque della Sierra Nevada, USA (**figure 5.13 e 5.14**); gli Autori trovarono che il *dissolution rate* dei silicati era proporzionale a $P_{CO_2}^{0.45}$.

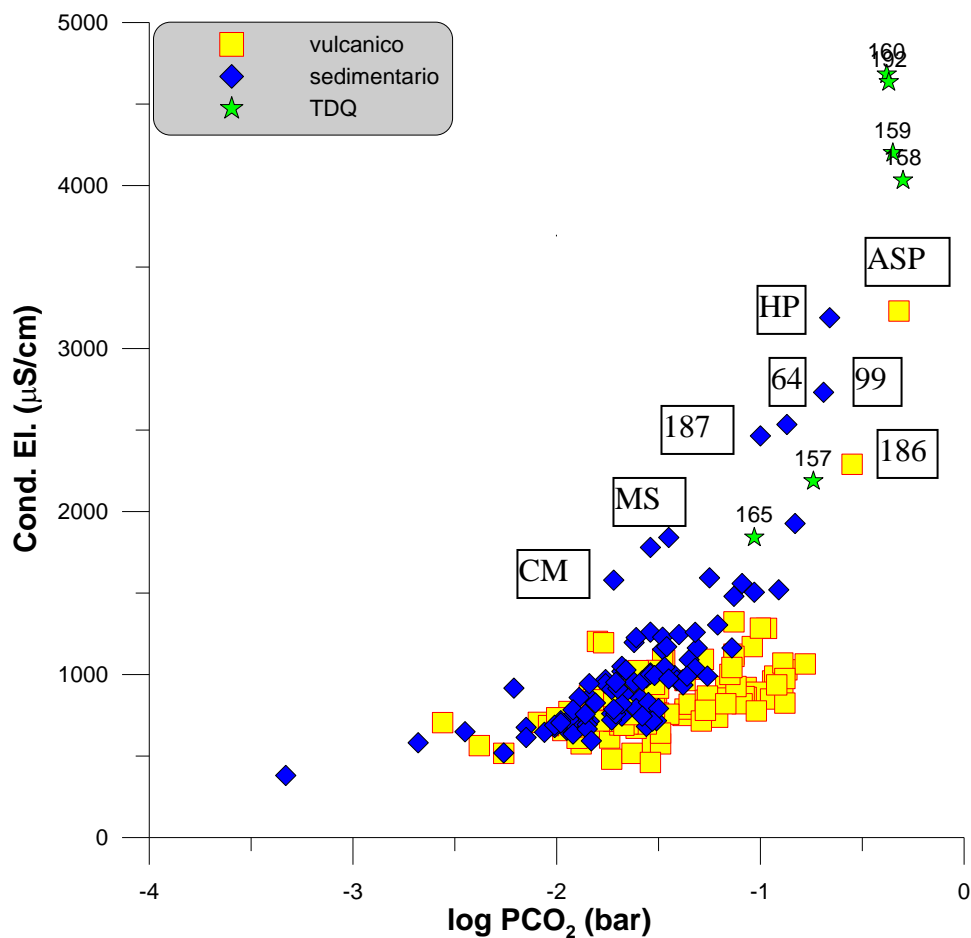


Figura 5.12. Diagramma $\log PCO_2$ vs. Conduttanza Elettrica delle acque dell'area urbana di Roma. HP = Hotel Plaza; ASP = Acqua San Paolo; MS = Monopoli di Stato; CM = Cinema Metropolitan.

Anche per gli acquiferi nelle ghiaie e nelle alluvioni, che mostrano un elevato contenuto in anidride carbonica, è molto evidente l'importanza di questo gas nel definire il loro livello salino. Anche le acque di Tor di Quinto, con $\log PCO_2$ prossimo allo zero (valore pari alla pressione atmosferica), hanno una salinità maggiore rispetto ai termini più diluiti che presentano una pressione parziale di CO_2 inferiore.

A supporto di quanto ipotizzato, e ribadendo quanto affermato in precedenza, verrà utilizzato il K come elemento guida per lo studio dell'interazione acqua-roccia delle acque del dominio vulcanico.

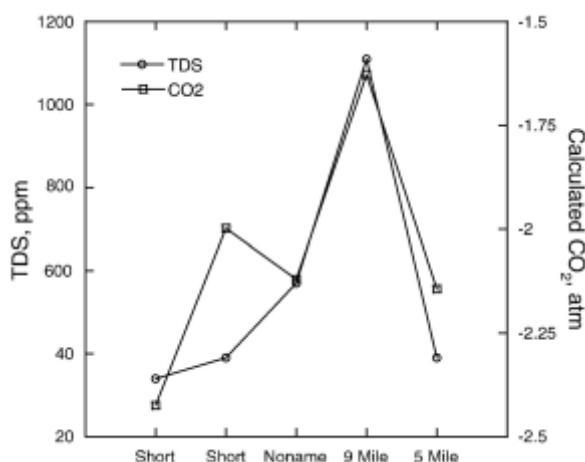


Figura 5.13. Correlazione tra PCO₂ e TDS delle acque della Sierra Nevada. Sitchler and Thyne (2007).

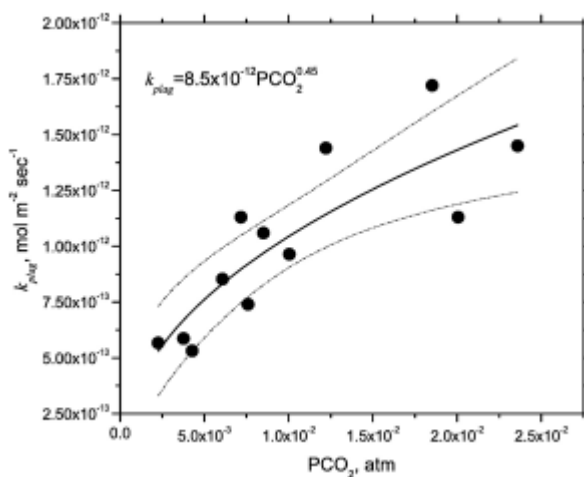


Figura 5.14. Correlazione tra tasso di dissoluzione del plagioclasio e PCO₂ nelle acque della Sierra Nevada. Sitchler and Thyne (2007).

Nel diagramma log PCO₂ vs. K (**figura 5.15**) viene ricalcato l'andamento osservato nella **figura 5.12**. Risulta evidente la correlazione positiva tra le due variabili, a conferma di quanto esposto in precedenza in sede di classificazione geochemica delle acque. Al contrario, tale correlazione risulta minima per le acque del dominio sedimentario, anche per quelle più ricche in CO₂, in quanto il potassio non risulta un elemento discriminante nei processi che guidano il loro chimismo finale. Si possono notare le concentrazioni anomale (oltre 2.5 meq/l, corrispondenti a più di 100 mg/l) di K sia in alcune acque del vulcanico (campioni ASP e 186) sia in quelle di Tor di Quinto. In questo caso si possono ipotizzare sia processi di interazione acqua-roccia particolarmente spinti e prolungati (dominio vulcanico) con termini molto ricchi in potassio sia

miscelamenti con acque saline più profonde (acque di Tor di Quinto). Ricordiamo che, a una decina di chilometri a nord di Tor di Quinto, pozzi profondi trivellati dall'ENEL negli anni '70 per la ricerca geotermica hanno incontrato a profondità tra i 2000 e i 3000 metri (nel basamento carbonatico) brine altamente saline ricche in gas (CO₂ al 99%), aventi una temperatura tra 145 e 300°C (Corsi & Di Falco).

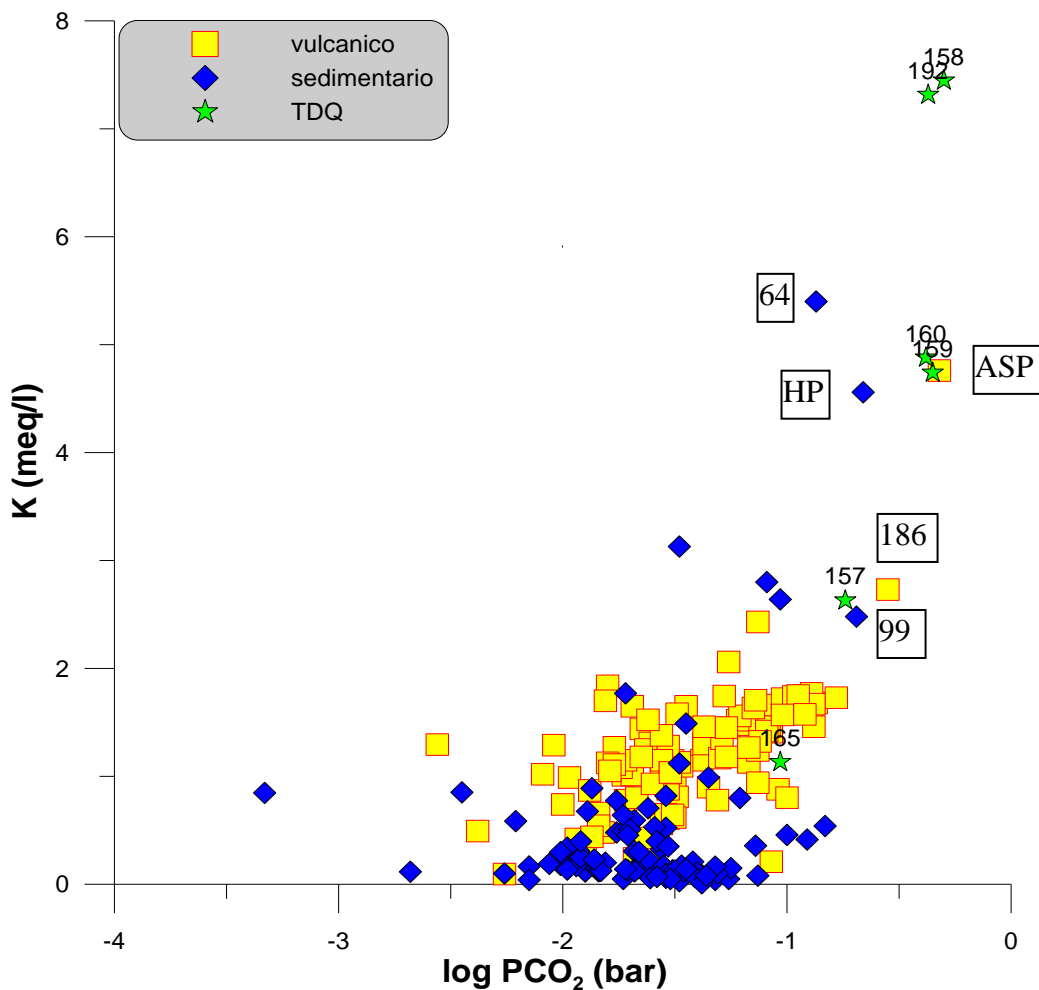


Figura 5.15. Diagramma log PCO₂ vs. K delle acque dell'area urbana di Roma. HP = Hotel Plaza; ASP = Acqua San Paolo.

Come si osserva dalla composizione chimica di queste brine (**figura 5.16**), esse sono estremamente ricche in potassio, e potrebbero costituire l'*end-member* di riferimento per le acque di Tor di Quinto, che ne costituirebbero il termine miscelato con acque superficiali. Il particolare assetto geologico di Tor di Quinto (alto strutturale del basamento carbonatico) potrebbe favorire, in profondità, l'esistenza di un sistema geotermico con acque molto saline, come ipotizzato in altri settori dell'Italia centrale (Chiodini & Frondini, 2001), supportando fortemente quanto ipotizzato nel presente studio. A conferma di ciò, inoltre, vi sono alcune acque del sedimentario molto ricche in K (campioni 64 e HP, **figura 5.15**), che circolano poco a nord e

a sud di Tor di Quinto, situati sullo stesso alto strutturale, e che potrebbero risentire, quindi, dei processi di miscelamento con il termine salino e profondo. Miscelamenti con acque geotermiche profonde saline non si possono escludere nemmeno per i campioni del dominio vulcanico contenenti più di 2.5 meq/l di K (più di 100 mg/l), ubicati in alti strutturali (simili a Tor di Quinto) nel settore sud-occidentale (ASP) e in quello nord-occidentale (186) di Roma. Un'ulteriore indizio sul probabile miscelamento delle acque di Tor di Quinto e di alcune appartenenti al dominio vulcanico circolanti negli alti strutturali deriva dal loro arricchimento in boro (fino a 7 ppm a Tor di Quinto e 4-5 ppm nei campioni 64 e ASP). In particolare, come risulta dal diagramma ternario B-Cl-Na (**figura 5.17**), queste acque hanno un alto rapporto B/Cl, e tendono verso la composizione dei più importanti sistemi geotermici dell'Italia centrale ospitati nel basamento carbonatico (Torre Alfina, Latera e Monte Amiata, Chiodini & Frondini, 2001).

CHEMICAL COMPOSITION OF BRINE IN mg/l			
Ca ⁺⁺	~ 200	CS ⁺	~ 30
Mg ⁺⁺	~ 20	AS ⁺⁺⁺	~ 15
Na ⁺	~ 60000	Cl ⁻	~ 27500
K ⁺	~ 80000	SO ₄ ⁻⁻	~ 186000
Li ⁺	~ 220	HCO ₃ ⁻	~ 2500
Fe ^{+2/+3}	~ 1.5	H ₃ BO ₃	~ 7500
NH ₄ ⁺	~ 30	SiO ₂	~ 120
Rb ⁺	~ 400	TDS	~ 364000

Figura 5.16. Composizione chimica delle brine di Cesano (da Corsi & Di Falco).

Andamento opposto a quello osservato nel diagramma log PCO₂-K viene evidenziato se si confrontano le variabili log PCO₂ e il contenuto in Na (**figura 5.18**). In questo caso, infatti, le acque del dominio vulcanico non mostrano alcuna correlazione diretta tra i due parametri (a parte le solite acque molto saline per le quali non si può escludere un apporto profondo) in quanto la sorgente principale del sodio è la nefelina (NaAlSiO₄, Freda et al., 2010), che, come tutti i silicati ha cinetiche di dissoluzione estremamente lente, anche in ambiente acido. In aggiunta, la nefelina dei Colli Albani è arricchita nella componente potassica (K₂O fino al 9.5%

in peso, Boari et al., 2009) e impoverita in quella sodica. Al contrario, una certa correlazione si nota per le acque del dominio sedimentario, che incrementano il loro contenuto in sodio con l'incremento della PCO_2 , tipico di interazioni acqua-roccia più spinte con argille, limi e marne, come evidenziato precedentemente. Anche in questo caso, le acque di Tor di Quinto risultano notevolmente arricchite in sodio (oltre 20 meq/l), soprattutto nei campioni più salini. Stesso andamento e stesse considerazioni risultano dall'analisi dei diagrammi $\log PCO_2$ -Cl e $\log PCO_2$ - SO_4 (figure 5.19 e 5.20).

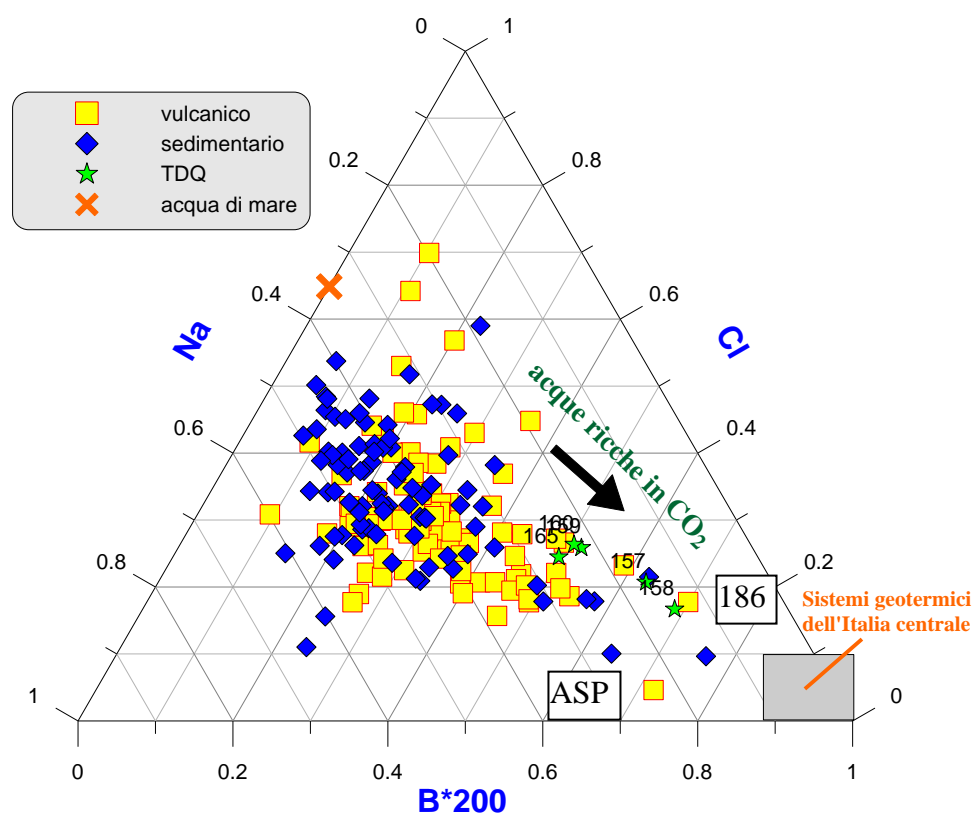


Figura 5.17. Diagramma ternario B-Cl-Na delle acque campionate nell'area urbana di Roma. Per confronto, è riportata la composizione dell'acqua di mare locale (Civitavecchia, Cinti et al., 2011). ASP = Acqua San Paolo.

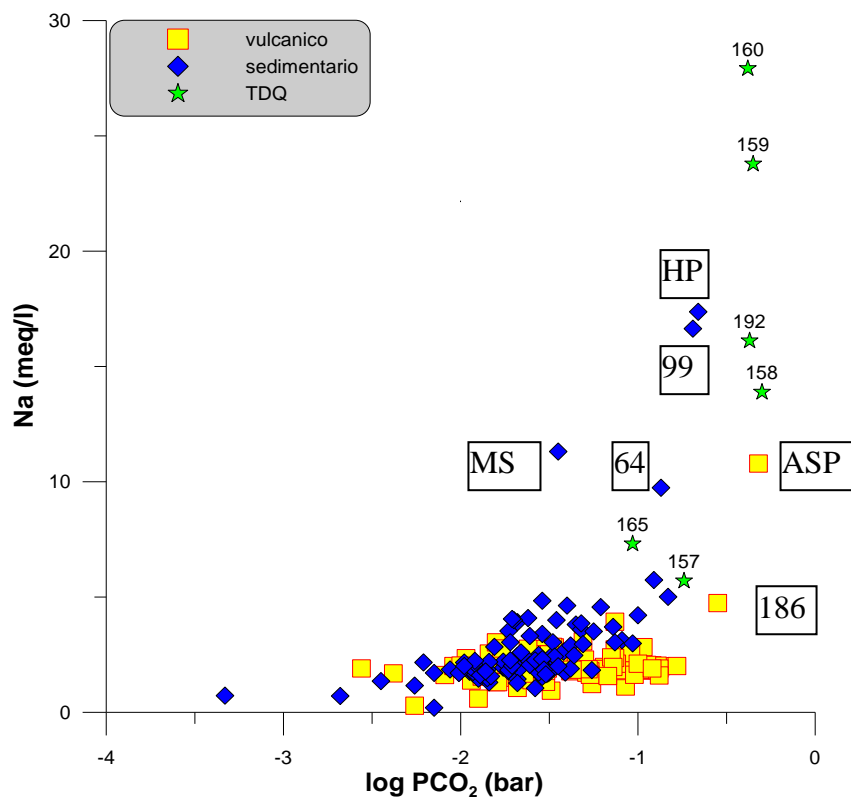


Figura 5.18. Diagramma log PCO₂ vs. Na delle acque dell'area urbana di Roma. MS = Monopoli di Stato; HP = Hotel Plaza; ASP = Acqua San Paolo.

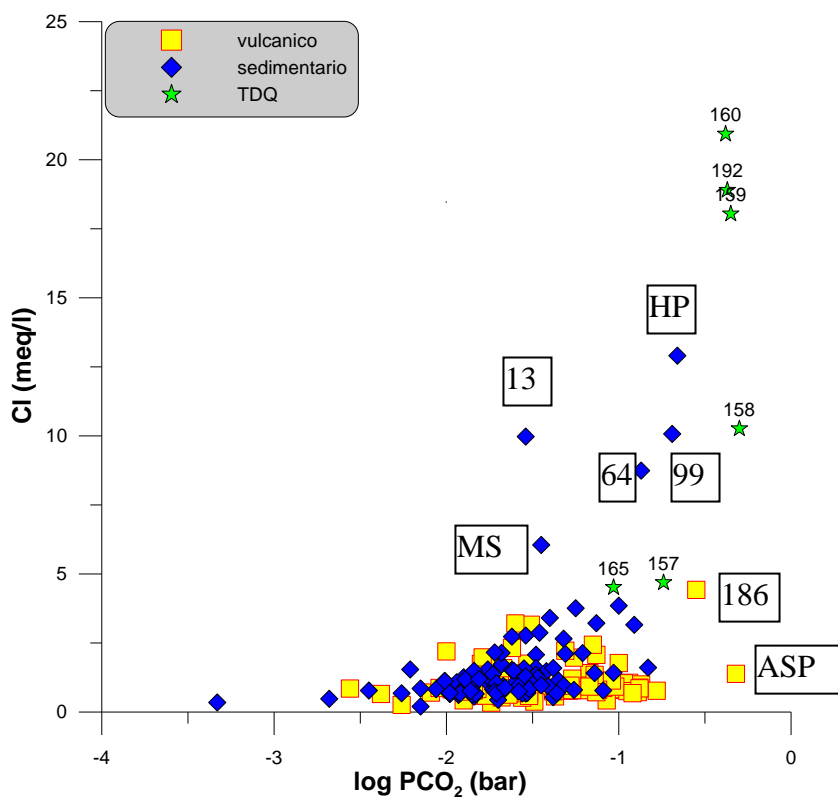


Figura 5.19. Diagramma log PCO₂ vs. Cl delle acque dell'area urbana di Roma. MS = Monopoli di Stato; HP = Hotel Plaza; ASP = Acqua San Paolo.

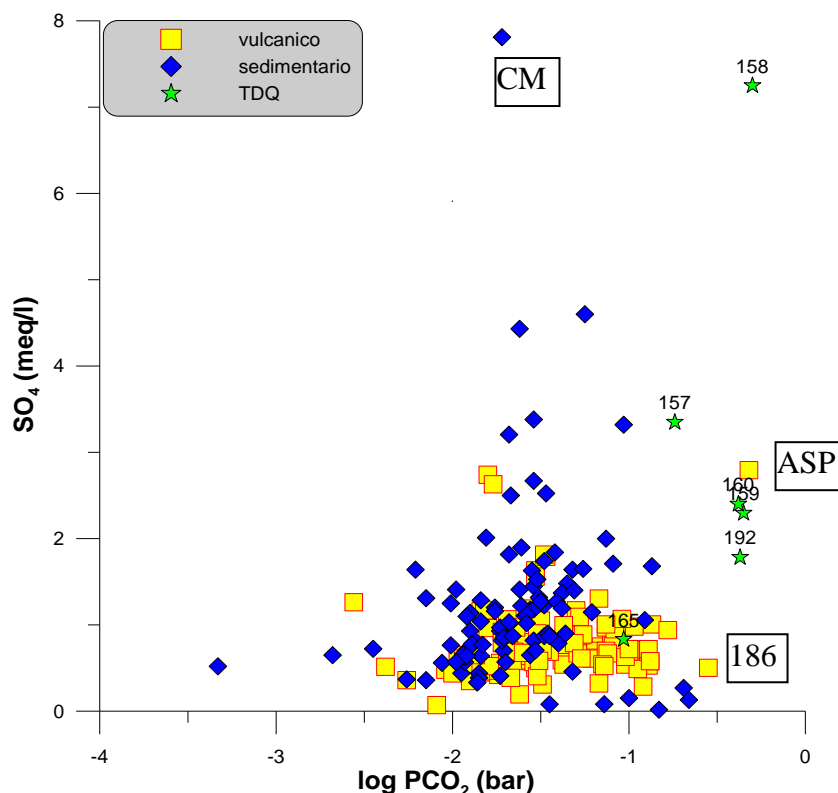


Figura 5.20. Diagramma log PCO₂ vs. SO₄ delle acque dell'area urbana di Roma. CM = Cinema Metropolitan; ASP = Acqua San Paolo.

Un valido supporto per l'interpretazione dei processi acqua-roccia, soprattutto nel dominio vulcanico, può essere fornito dagli elementi in traccia. Infatti, tali elementi sono stati studiati estesamente nelle vulcaniti sia albane (Barbieri, 1999; Boari et al., 2009) che sabatine (Conticelli et al., 1997), e la loro presenza nelle acque circolanti può fornire preziose indicazioni circa i processi che promuovono e guidano il loro trasferimento dalla fase solida a quella liquida (i.e. interazione acqua-roccia). Verranno presi in considerazione tre elementi in traccia: il bario, il rubidio e lo stronzio; essi sono molto arricchiti nelle vulcaniti albane e sabatine con una media, rispettivamente di 1600, 600, e 1800 ppm (Conticelli et al., 1997; Barbieri, 1999; Boari et al., 2009).

Il diagramma log PCO₂-Ba (**figura 5.21**) mostra come le acque del dominio vulcanico presentano una buona correlazione tra questi due parametri confermando, ancora una volta, quanto era stato osservato considerando gli elementi maggiori. La sorgente del Ba è da ricercarsi soprattutto nella flogopite (mica) contenuta nella pasta di fondo delle vulcaniti albane e sabatine, che ha una composizione chimica arricchita in Ba (BaO compreso tra 5.8 e 8.4 % in peso, Conticelli et al., 1997; Boari et al., 2009). Evidente è la correlazione positiva per le acque del sedimentario, che presentano le maggiori concentrazioni di Ba, fino a 1 mg/l, mentre contenuti tra 100 e 200 µg/l caratterizzano le acque di Tor di Quinto (**tabella A3**). Mediamente, si

osservano valori medi di Ba più elevati per le acque del sedimentario rispetto a quelle del vulcanico; quanto osservato conferma che nell'area romana la sorgente principale di questo elemento non si trova solo nelle vulcaniti ma anche nei termini sedimentari quali conglomerati, sabbie, marne e argille. Come già ipotizzato per cloro e solfato, una ulteriore origine (antropica) potrebbe essere invocata per il contenuto in bario che caratterizza queste acque (media 158 µg/l); infatti, i sali di bario sono mediamente poco solubili in acqua, con l'eccezione del cloruro di bario che è impiegato, ad. esempio, in aree a vocazione agricola, quale quella in riva destra del Tevere, come anticrittogamico e insetticida.

Ancora più evidente, andando ad analizzare i contenuti in rubidio (Rb) confrontati sempre con la CO₂ (**figura 5.22**), è la dicotomia esistente tra le acque del dominio vulcanico e quelle del dominio sedimentario. Le prime, infatti, hanno un contenuto medio di Rb notevolmente superiore alle seconde, con valori che raggiungono i 400 µg/l. Inoltre, è chiaro l'aumento della concentrazione in rubidio all'aumentare della PCO₂, in funzione dell'interazione acqua-roccia. Quanto osservato era atteso stante il comportamento geochimico del rubidio, molto simile a quello del potassio; per le acque dell'area romana, quindi, il rubidio può essere preso, tra gli elementi in traccia, come rappresentativo dei processi di interazione acqua-roccia, almeno per il dominio vulcanico. Le acque di Tor di Quinto mostrano valori intorno a 300-400 µg/l di rubidio, nettamente superiori sia al dominio sedimentario che alla quasi totalità delle acque del vulcanico. Ricordiamo che le brine di Cesano sono ricche anche in rubidio, con una concentrazione di circa 400 mg/l (**figura 5.16**).

Il diagramma log PCO₂-Sr (**figura 5.23**) è molto simile al diagramma di **figura 5.15**, in quanto lo stronzio può sostituire il potassio nei minerali delle rocce vulcaniche. Di conseguenza, elevate concentrazioni (fino a 2500 µg/l) si osservano nelle acque del dominio vulcanico (soprattutto nelle acque ricche in CO₂), mentre valori decisamente inferiori sono misurati nel dominio sedimentario. Le acque di Tor di Quinto mostrano valori tra i 1500 e i 4000 µg/l.

Barbieri (1999) riporta le concentrazioni dello stronzio nei vari tipi di vulcaniti albane (**figura 5.24**), differenziando tra rocce piroclastiche, contenenti Sr che risulta chimicamente scambiabile e le lave, contenenti Sr che difficilmente viene trasferito dalla struttura dei minerali alla fase acquosa. In questo lavoro, l'Autore mette a confronto la composizione chimica e il contenuto in Sr di 10 sorgenti dei Colli Albani con il contenuto nelle rocce vulcaniche, ricostruendo l'origine delle acque e l'interazione acqua-roccia. Inoltre, l'Autore contempla il rapporto isotopico dello stronzio (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) sia delle acque che delle rocce per rafforzare le ipotesi avanzate.

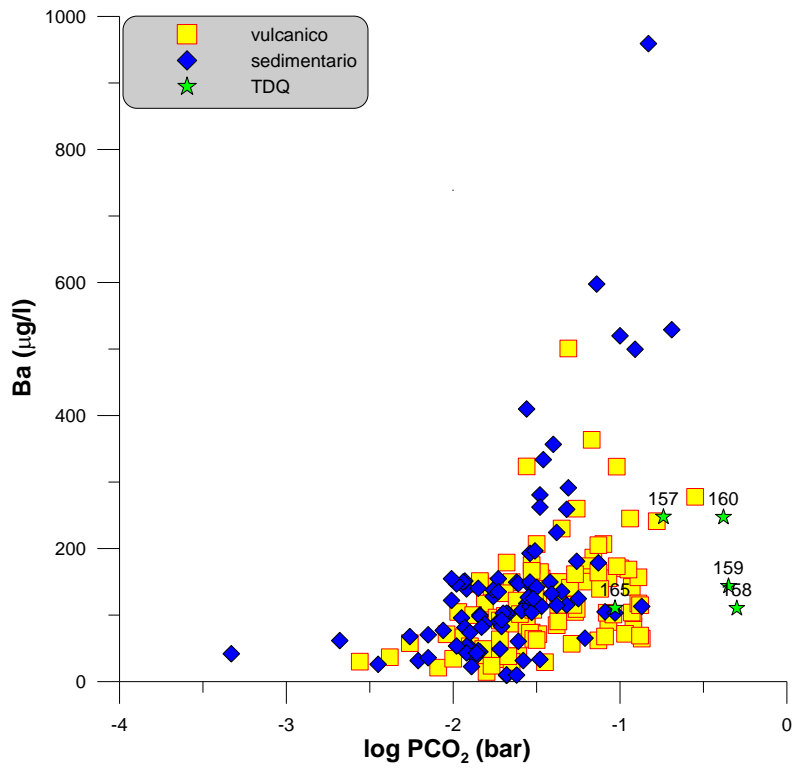


Figura 5.21. Diagramma log PCO₂ vs. Ba delle acque dell'area urbana di Roma.

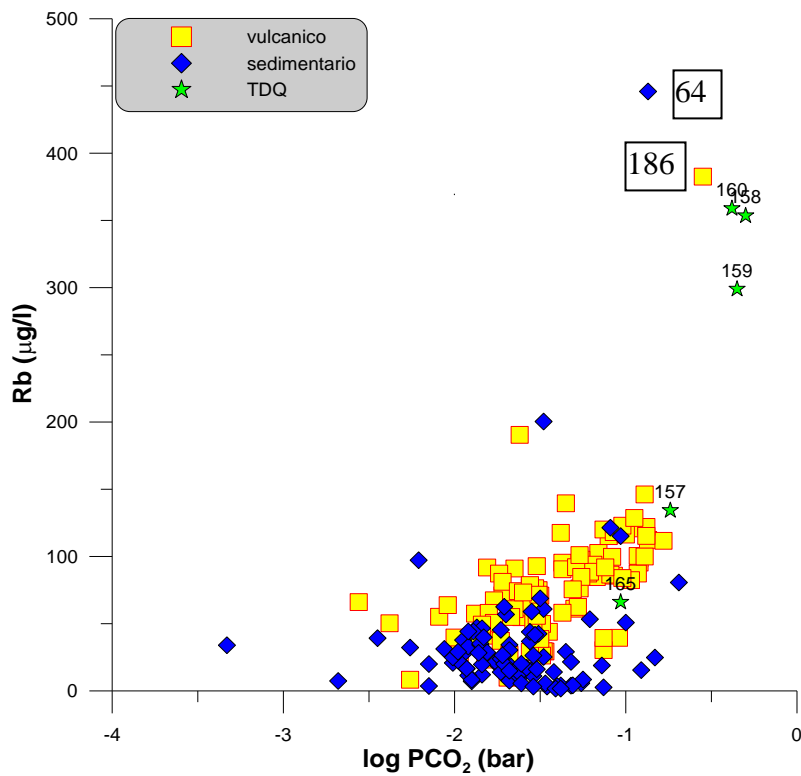


Figura 5.22. Diagramma log PCO₂ vs. Rb delle acque dell'area urbana di Roma.

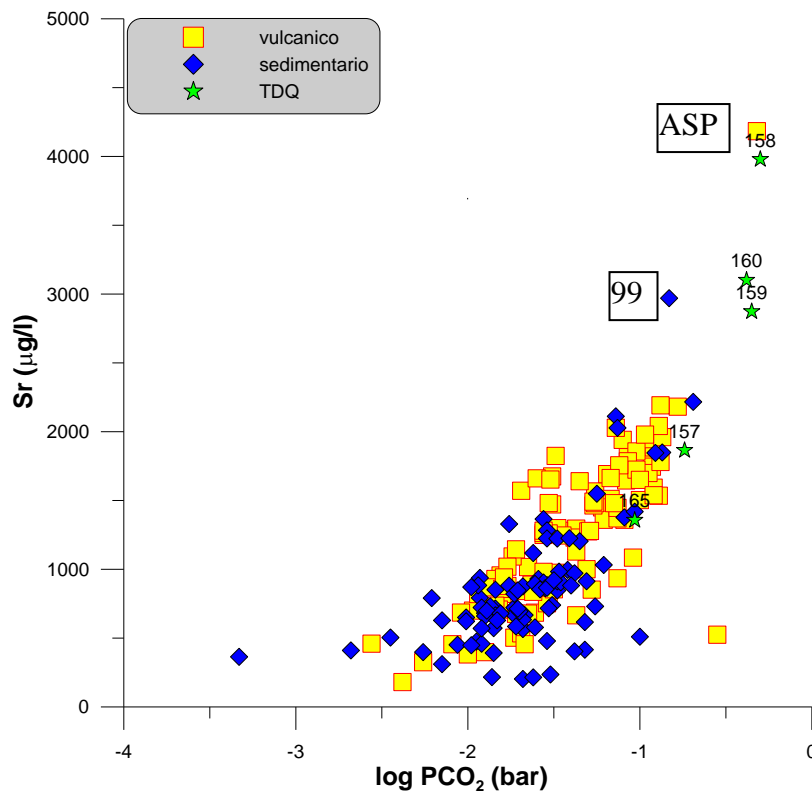


Figura 5.23. Diagramma log PCO₂ vs. Sr delle acque dell'area urbana di Roma. ASP = Acqua San Paolo.

TIPO DI ROCCIA	ppm Sr
Peperino	1900
Lapis Gabinus (Castiglione)	1970
Tufo di Villa Senni	1500
Pozzolane grigie (13 campioni)	1560
Tufo litoide "lionato" (54 campioni)	6000
Pozzolane medie (12 campioni)	1720
Conglomerato giallo (P.te della Mandriola)	1390
Pozzolane inferiori (Tre fontane)	1620
Tufo pisolitico (Castel di Decima)	1850
Lave varie (23 campioni)	1970

Figura 5.24. Contenuti in Sr dei principali litotipi vulcanici dei Colli Albani (da Barbieri, 1999).

5.5 Processi di interazione acqua-roccia: isotopi di Sr e H

Il rapporto $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ delle acque sotterranee è utilizzato come tracciante per ricavare informazioni sull'origine delle acque sotterranee, per fornire indicazioni sui processi di miscelamento tra diversi corpi idrici e per valutare il percorso delle acque sotterranee (Vengosh et al., 1999). Generalmente le acque sotterranee mostrano rapporti $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ che riflettono la concentrazione dello Sr e del suo rapporto isotopico nelle rocce ospitanti come risultato

dell'interazione chimica tra acqua e rocce (Faure, 1986). Alla luce di ciò, sono state effettuate 9 analisi del rapporto isotopico dello stronzio in campioni dell'area di Roma rappresentativi del dominio vulcanico e in quelle acque per cui tutte le analisi geochemiche convergevano verso un probabile miscelamento con fluidi salini profondi. Tale approccio non può prescindere dalla conoscenza dei valori isotopici dello stronzio nei litotipi vulcanici (albani e sabatini) e delle principali litologie dell'ambiente sedimentario.

Nel diagramma $1/Sr$ vs. $^{87}Sr/^{86}Sr$ (figura 5.25), per una sua corretta interpretazione, e per confronto con i dati delle acque di sottosuolo, sono riportati i campi di esistenza delle vulcaniti albane, sabatine (Barbieri, 1999; Boari et al., 2009; Conticelli et al., 1997) e del carbonatico mesozoico (Barbieri, 1999). Le vulcaniti sabatine mostrano un ampio intervallo compositivo con i prodotti pre-caldera aventi un rapporto isotopico dello stronzio più elevato, mentre quelli sin e post-caldera mostrano un rapporto isotopico dello stronzio più basso (Conticelli et al., 1997). Lo stesso andamento si osserva per i prodotti albani, ma in un intervallo isotopico più ristretto (Boari et al., 2009).

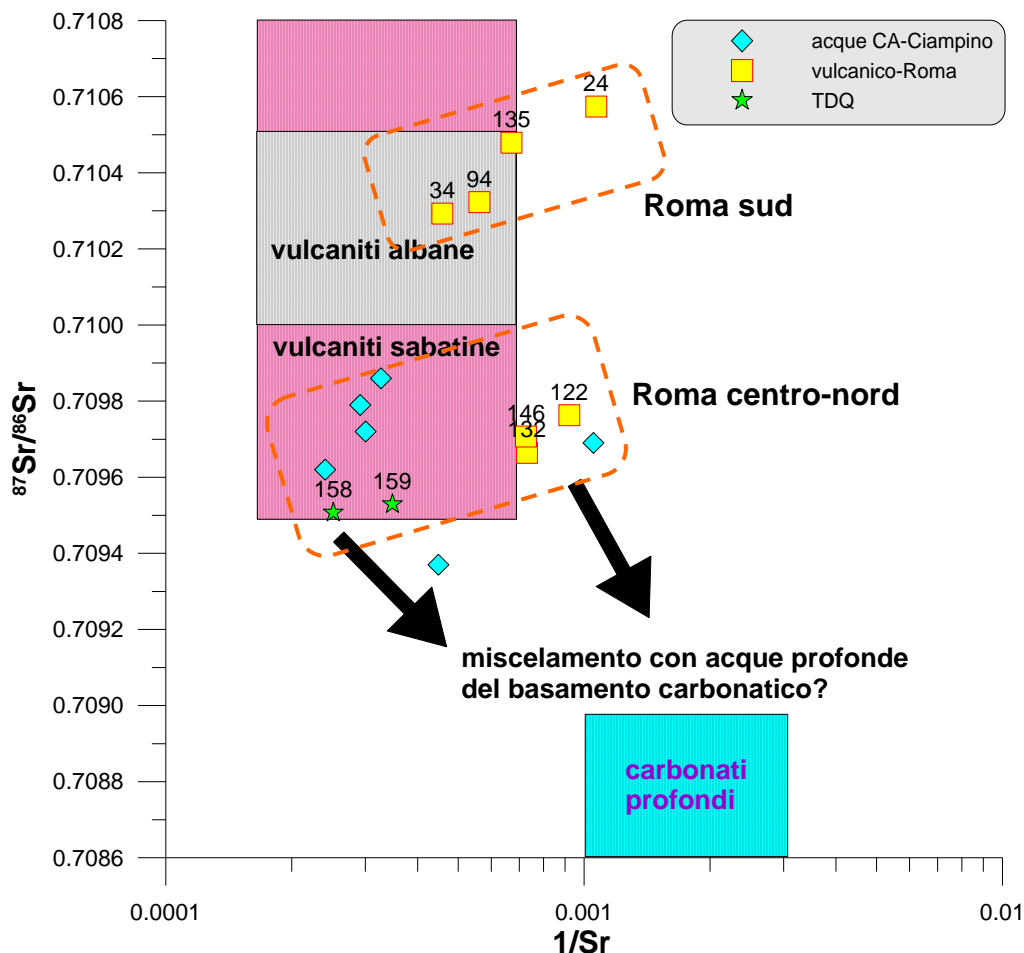


Figura 5.25. Diagramma $1/Sr$ vs. $^{87}Sr/^{86}Sr$ di 9 acque di sottosuolo dell'area romana. Per confronto, sono riportati i campi di esistenza delle vulcaniti albane e sabatine e dei carbonati profondi. Inoltre, sono riportate 6 acque di sottosuolo dell'area di Ciampino.

L'analisi del diagramma mostra l'esistenza di due gruppi di acque, indicati dai riquadri tratteggiati di color arancione:

- Il primo, formato da quattro campioni (24, 34, 94, 135), ubicati nel settore meridionale della capitale (Ardeatino, Appio, Capannelle), mostra valori isotopici di stronzio nel *range* delle vulcaniti albane ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710293\text{-}0.710574$). Tale dato conferma quanto ipotizzato analizzando le caratteristiche chimiche di queste acque, e cioè che esse appartengono alla circolazione di base delle vulcaniti albane, con cui scambiano diversi elementi chimici, tra cui lo stronzio, riflettendone la loro composizione isotopica;

- Il secondo, formato dalle acque di Tor di Quinto (158 e 159) e da tre campioni (122, 132, 146) ubicati nell'area centro-settentrionale di Roma (Montesacro, Salaria e Saxa Rubra), mostra un rapporto isotopico dello stronzio nettamente inferiore rispetto al precedente ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.709507\text{-}0.709707$). Per queste acque si possono ipotizzare due scenari: il primo è che esse riflettano la composizione isotopica delle vulcaniti sabatine, che hanno un limite inferiore di $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7095$ (prodotti post-caldera), mentre il secondo che esse risentano del miscelamento con acque provenienti dal basamento carbonatico profondo ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7085\text{-}0.7090$, Barbieri, 1999), abbassando il loro rapporto isotopico ai livelli misurati. Tenendo in considerazione le elaborazioni e le interpretazioni finora proposte, il secondo scenario presentato sembra il più plausibile per le acque di Tor di Quinto e per i campioni ricchi in CO_2 di Montesacro e Saxa Rubra, mentre per il campione della Salaria, che non mostra chiari indizi di risalite e/o miscelamenti di/con fluidi profondi il primo scenario sembra quello più probabile.

A supporto di quanto ipotizzato per le acque di Roma con basso rapporto isotopico dello stronzio, sono riportate nel diagramma di **figura 5.25** sei acque di sottosuolo ricche in CO_2 dei Colli Albani (dati non pubblicati INGV), circolanti in una situazione geologica simile (alto strutturale di Ciampino), che mostrano un simile rapporto isotopico ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70937\text{-}0.70986$). Barbieri (1999) riporta il dato isotopico dell'acqua minerale laurentina ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.71000$), ubicata non lontano da Ciampino, attribuendone il valore inferiore rispetto a quello tipico delle vulcaniti albane a miscelamenti con acque del substrato carbonatico. Per le acque di Ciampino, sulla base di considerazioni isotopiche (C, He) e chimiche (eccesso di Ca, SO_4 e HCO_3) è stata ipotizzata una provenienza profonda, dal basamento carbonatico situato, in quest'area, a una profondità di circa 700-800 metri dal p.c. (e.g. Toro, 1978). I valori isotopici dello stronzio di queste acque sembrerebbero, quindi, fornire un valido supporto per confermare questa ipotesi e, indirettamente, potrebbero essere prese come riferimento per l'interpretazione delle acque di Roma.

Uno dei fattori che concorre a determinare il grado di interazione acqua-roccia (oltre al tipo di roccia lisciviata, il suo stato reologico e la presenza di fratture, lo stato termico del fluido e/o della roccia, il pH della soluzione, il grado di solubilità dei minerali e i loro tassi di dissoluzione, ecc.) è il tempo in cui questo processo avviene. Infatti, per tempi di residenza lunghi (decine, centinaia o migliaia di anni, caratteristici dei circuiti profondi), definito come il periodo intercorso tra la ricarica meteorica e la venuta a giorno sottoforma di sorgenti naturali o il prelievo del campione di acqua da perforazioni (pozzi), generalmente corrispondono processi di interazione acqua-roccia più spinti, mentre per tempi di residenza brevi (mesi o pochi anni) i processi sono molto più blandi. Questo discorso generale è valido se si considerano uguali, per entrambe le circolazioni, gli altri fattori sopra riportati. Un aiuto alla comprensione della circolazione delle acque di sottosuolo viene dal loro contenuto in trizio, isotopo radioattivo dell'idrogeno, con una vita media (λ) di 12.26 anni e una costante di decadimento di 0.056 a^{-1} . Partendo da un valore di trizio di circa 10 U.T. presente in atmosfera prima dei test nucleari iniziati nel 1963 ($^3\text{H}_0$), e considerando il decadimento radioattivo naturale secondo la formula: $^3\text{H} = ^3\text{H}_0 e^{-\lambda t}$, con $t = 50$ anni (2013-1963), si possono considerare acque vecchie o sub-moderne (penetrate prima del 1963) quelle dove i valori del trizio sono minori di 0.6 UT (1 U.T. = 0.119 Bq/l) ed acque recenti o moderne (penetrate dopo il 1963) quelle con valori più elevati (Kass, 1998; Clark & Fritz, 1999).

Sono state selezionate 9 acque (le stesse in cui sono state effettuate le analisi isotopiche di Sr), per caratterizzare qualitativamente la loro età. Inoltre, al fine di caratterizzare l'*end-member* meteorico, nel dicembre 2012 è stato misurato il trizio (3 U.T.) su un campione di acqua piovana prelevato presso la sede romana dell'INGV.

Nella **figura 5.26** si sono messi a confronto uno dei fattori prima citati che influenzano il processo di interazione acqua-roccia e uno dei parametri che da esso risulta influenzato: tempo di residenza e salinità. Si evidenziano chiaramente due gruppi di acque: uno caratterizzato da una conduttanza elettrica compresa tra 900 e 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e contenuto in trizio tra 1.3 e 2.7 U.T., e un altro caratterizzato da conduttanza variabile tra 1500 e 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e contenuto in trizio compreso tra 0 e 0.3 U.T. Il primo gruppo di acque è rappresentato da quelle del dominio vulcanico di Roma sud (circolazione idrica alla base delle vulcaniti, campioni 24, 34, 94, 135) e da due acque di Roma centro-nord (Montesacro e Salaria, campioni 122 e 132). Possiamo qualitativamente affermare che la ricarica meteorica di queste acque sia avvenuta dopo il 1963, trattandosi di acque recenti o moderne; in particolare, si nota come la maggior parte di esse sia molto vicina al valore misurato nella pioggia attuale. L'altro gruppo di acque è formato da un campione del dominio vulcanico di Roma nord (Saxa Rubra, campione 146) e dalle acque di Tor

di Quinto (campioni 158 e 159). In base al loro nullo contenuto in trizio, queste acque si possono definire vecchie o sub-moderne, ricaricate prima del 1963. Alla luce dei risultati ora esposti, si conferma l'ipotesi di possibili miscelamenti con acque "vecchie" del substrato carbonatico per le acque di Tor di Quinto (158 e 159) e per quella di Saxa Rubra (146), mentre una circolazione più "giovane" interessa la base delle vulcaniti di Roma sud (24, 34, 94 e 135). Da notare il campione 24, il pozzo più profondo (130 m) tra quelli campionati a Roma sud, che presenta il valore di trizio più basso, indice di una circolazione più lenta rispetto alle altre acque dello stesso dominio litologico. Per gli altri campioni ubicati nel settore centro-settentrionale di Roma, il contenuto in trizio lascia aperte le due possibilità che erano state indicate tramite lo studio degli isotopi dello stronzio: circolazione veloce nelle vulcaniti sabatine o miscelamenti, in proporzioni diverse rispetto alle acque sub-moderne (i.e. percentuale minore di acque dal basamento carbonatico). Si ribadisce la propensione, in base a tutti i dati a disposizione per la seconda ipotesi per il campione 122 (Montesacro) e per la prima per il campione 132 (Salaria). Alla luce dei risultati ottenuti, l'analisi del contenuto in trizio, quindi, si è dimostrato un valido supporto per definire qualitativamente l'età di alcune acque presenti nell'area investigata, confermando quanto era stato ipotizzato solo con l'analisi del chimismo (elementi maggiori, minori e in traccia), degli isotopi stabili dello stronzio e dei parametri chimico-fisici.

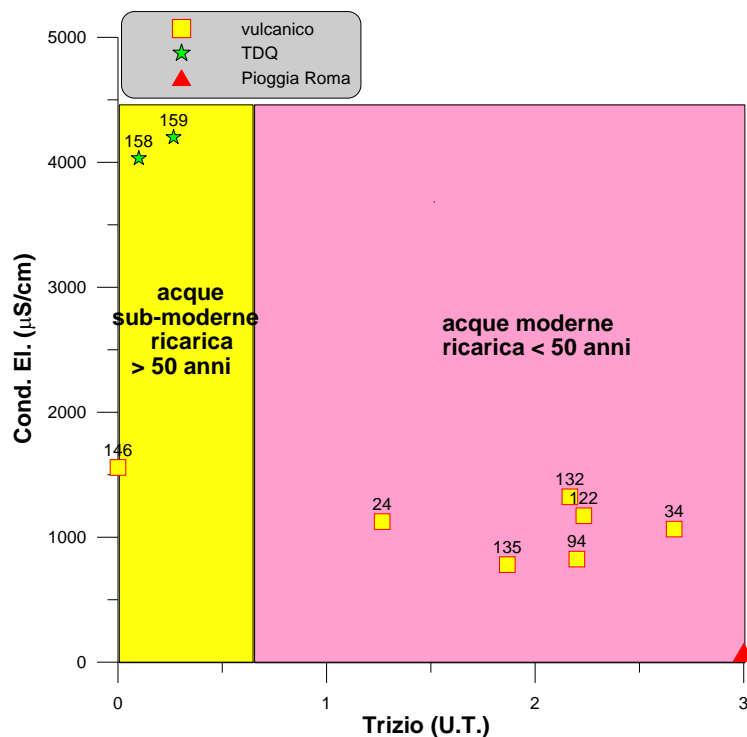


Figura 5.26. Diagramma Trizio vs. Conduttanza Elettrica di 9 acque di sottosuolo dell'area romana.

5.6 Distribuzione e origine della CO₂ nelle acque di sottosuolo

Come già ricordato nell'introduzione al presente lavoro sono numerose, nel versante tirrenico dell'Italia centrale, le aree interessate da risalite di CO₂ che in parte si discioglie negli acquiferi e in parte permea i pori dei suoli; la CO₂ è il gas di gran lunga dominante nelle manifestazioni naturali. Anche nel territorio del Lazio, come nei dintorni di Roma, sono ubicate alcune di queste manifestazioni gassose naturali (Cava dei Selci, Santa Maria delle Mole, Tivoli, Zolforata di Pomezia, Lago di Albano, Ardea), e numerose sono le acque ricche in CO₂ che caratterizzano il territorio (Chiodini & Frondini, 2001; Pizzino et al., 2002; Minissale, 2004; Mariucci et al., 2008; Cinti et al., 2011; Cinti et al., 2013).

Nei paragrafi precedenti è emerso chiaramente come la CO₂ disciolta nelle acque di sottosuolo di Roma ricopra un ruolo importante nel determinare il grado di interazione acqua-roccia modulando, in maniera proporzionale al suo contenuto, il trasferimento dei vari elementi chimici dai minerali costituenti la roccia alle acque con cui entrano in contatto, definendo, al contempo, le *facies* idrochimiche osservate. Inoltre, la CO₂ è, insieme all'H₂S e al radon, la componente dominante del *Natural Gas Hazard*, la cui valutazione, in un'area urbanizzata come la città di Roma, è quanto mai una sentita esigenza da parte sia della comunità scientifica sia degli operatori nel settore ambientale e uso del territorio.

Alla luce di ciò, è necessario, quindi, effettuare un'analisi approfondita sia della distribuzione geografica del contenuto dell'anidride carbonica nelle acque di sottosuolo sia definire la sua origine tramite tecniche isotopiche.

Le acque di Roma sono state analizzate tramite la loro distribuzione di frequenza, rappresentata in forma grafica dall'istogramma di figura 5.27 (*Statistica 6*). La variabile scelta è il log PCO₂, espresso in bar, calcolato mediante l'uso del programma *Phreeqc* (versione 3.11 del dicembre 2013), utilizzando come dati di input temperatura, pH, elementi maggiori e alcalinità. I dati utilizzati sono quelli ottenuti nel presente lavoro (192 acque) con l'aggiunta di altri 16 campioni selezionati da lavori pregressi (Vivona, 2001; Lanzarone, 2003; Corazza & Lombardi, 2008; De Simone, 2012).

La **figura 5.27** mostra un'ampia distribuzione dei valori del log PCO₂ nelle acque di sottosuolo, da valori molto bassi, prossimi all'atmosfera (freccia fucsia, log PCO₂ = -3.5 bar) fino a valori elevati, prossimi alla pressione atmosferica (log PCO₂ = 0.0 bar), con una frequenza più elevata nella classe compresa tra -2.0 e -1.5 bar. Nell'istogramma è anche riportato il valore tipico del log PCO₂ nei suoli (freccia fucsia, -2.0 bar), controllato principalmente dall'attività biologica nel suolo (processi di decadimento della sostanza organica e di respirazione delle radici); tale valore non è lontano da quello medio delle acque di falda (-2.09, Appelo & Postma,

1996). I dati statistici della popolazione considerata indicano una media e una mediana pari, rispettivamente a -1.49 e -1.53 bar, causando l'evidente asimmetria (definita *skewness* positiva) nella distribuzione di frequenza di **figura 5.27**; da notare che il valore medio calcolato per le acque romane è molto simile alla media del log PCO₂ ottenuta da Gambardella et al., 2005 su 970 acque circolanti nella Provincia Comagmatica Romana, pari a -1.69 bar). L'asimmetria positiva osservata potrebbe essere dovuta alla presenza di due sottopopolazioni con media e deviazioni standard differenti (Ciotoli & Finoia, 2005), nel nostro caso corrispondenti alle acque del sedimentario e quelle del vulcanico. Infatti, le prime (89 campioni) mostrano un log PCO₂ generalmente più basso (media = -1.62 bar, **figure 5.18-5.24**) rispetto alle seconde (104 campioni), che mostrano valori generalmente maggiori di log PCO₂ (media = -1.45 bar). Le acque di Tor di Quinto (solo 6 campioni) hanno un piccolo peso statistico, ma possono essere sommate al contributo del dominio vulcanico in quanto presentano valori elevati di log PCO₂ (media = -0.53 bar). In ogni caso, l'aspetto più importante che può essere evidenziato nell'istogramma di frequenza è che nell'area romana, come atteso considerando il *background* regionale, vi sono numerose acque ricche in CO₂, con valori calcolati fino a -0.30 bar (**tabella A4**). Molto grossolanamente, sulla base di studi precedenti in zone limitrofe (Chiodini & Frondini, 2001; Pizzino et al., 2002, Gambardella et al., 2005; Cinti et al., 2011, 2014), e considerando gli *end-member* atmosfera e suolo, dall'analisi della **figura 5.27** si può affermare come le acque di sottosuolo di Roma più ricche in CO₂ presentano un'origine prevalentemente inorganica (i.e. profonda) dell'anidride carbonica, mentre le acque con basso log PCO₂ disciolgono un gas di origine prevalentemente organica (i.e. superficiale).

La distribuzione geografica del log PCO₂ è riportata in **figura 5.28** (*Surfer 8*, della *Golden Software*). Nella scala cromatica, il colore giallo indica la media, pari a -1.49 bar; valori più positivi sono rappresentativi delle aree in cui circolano acque maggiormente ricche in CO₂. Esse sono (indicate con i colori arancione e rosso): *i*) Cassia a NW; *ii*) una lunga fascia che va dal Flaminio alla Salaria, passando per Tor di Quinto e Saxa Rubra, a N; *iii*) lungo il corso del fiume Aniene (Montesacro); *iv*) centro storico (via del Corso); *v*) Torrino-Laurentino a SW e *vi*) Appio-Capannelle-Tuscolano a SE. Si può tranquillamente affermare che, data la loro estensione, le aree *ii* e *vi* possono essere considerate come vere e proprie DDS (*Diffuse Degassing Structure*) all'interno dell'area urbana della capitale; la **figura 5.28** fornisce già una prima chiara indicazione sulla distribuzione del degassamento in atto nell'area urbana di Roma.

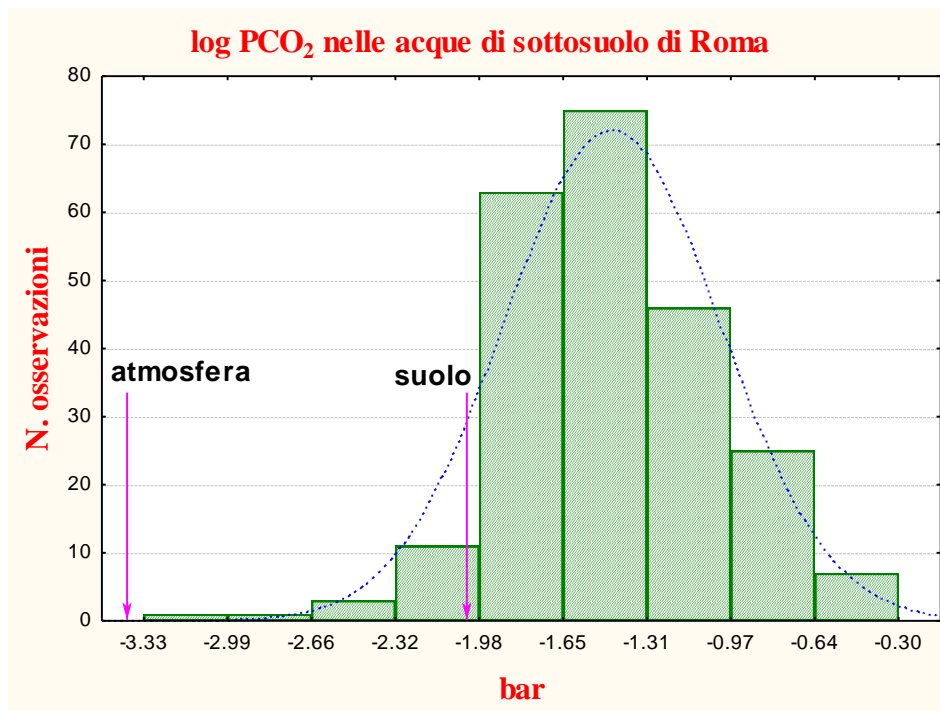


Figura 5.27. Istogramma del log PCO₂ nelle acque di sottosuolo dell'area romana (208 campioni). Le frecce fucsia indicano il valore della pCO₂ nei sistemi atmosfera e suolo.

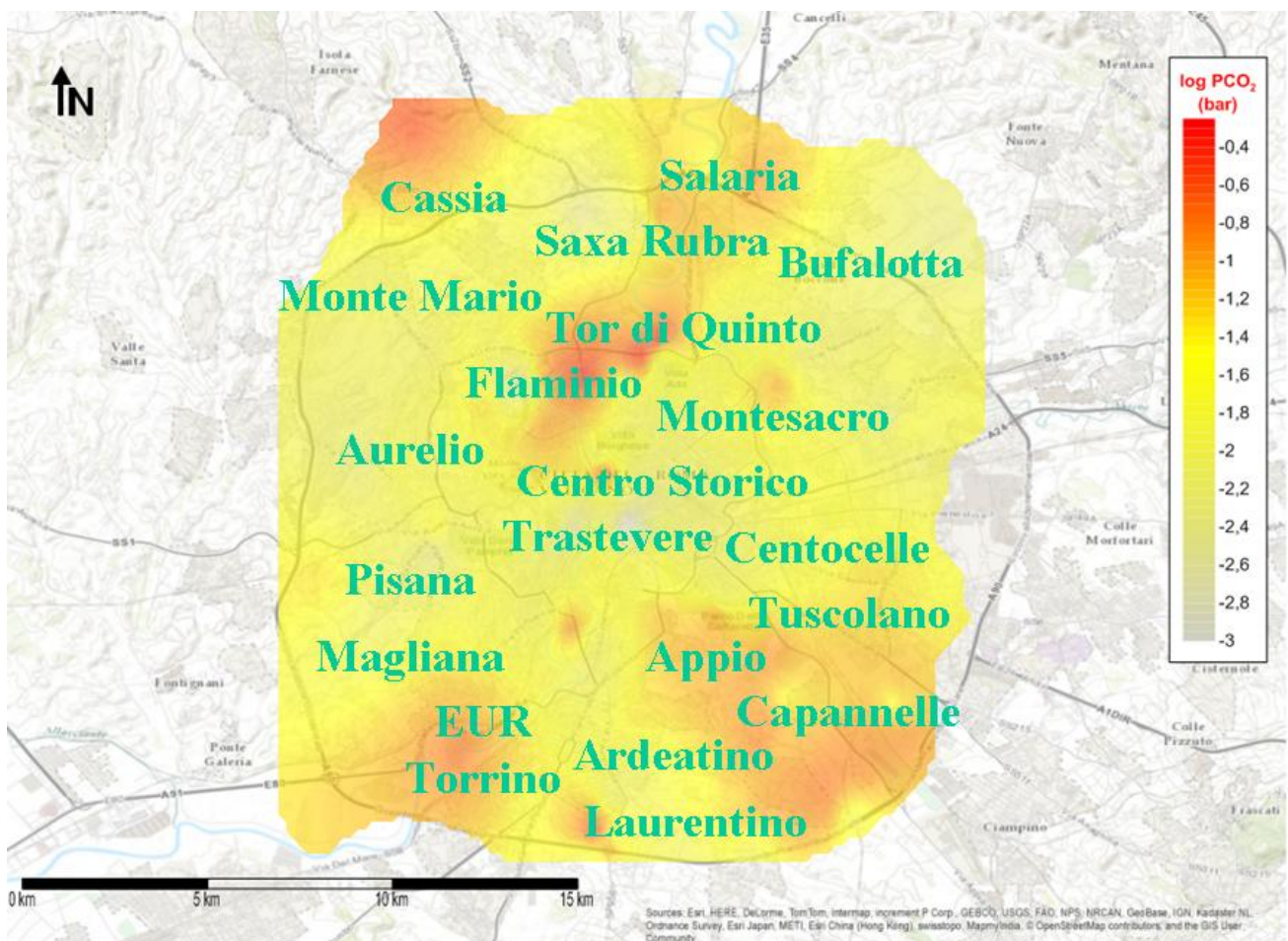


Figura 5.28. Distribuzione del log PCO₂ nelle acque di sottosuolo dell'area romana (208 campioni). Le aree in arancione e in rosso sono caratterizzate da elevati valori del log PCO₂.

Per discriminare le differenti sorgenti del carbonio disciolto, è stata effettuata l'analisi isotopica del carbonio totale (*Total Dissolved Inorganic Carbon*); esso, infatti, è uno strumento molto valido per discriminare l'origine di questo elemento nelle acque naturali. Il TDIC rappresenta la somma delle concentrazioni delle specie carbonatiche in soluzione (i.e. $\text{CO}_{2(\text{aq})}$, HCO_3^- e CO_3^{2-}); le loro concentrazioni sono dipendenti dal valore del pH e i fattori di arricchimento controllano la composizione isotopica ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) di ogni specie carbonatica in funzione della temperatura (Favara et al., 2002). La composizione isotopica del TDIC ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) rappresenta la media delle composizioni isotopiche delle varie specie carbonatiche pesate in base alle loro concentrazioni, ed è così espressa:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{TDIC}) = [\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)_{(\text{aq})} * (\text{CO}_{2(\text{aq})}) + \delta^{13}\text{C}(\text{HCO}_3) * (\text{HCO}_3) + \delta^{13}\text{C}(\text{CO}_3) * (\text{CO}_3)] / [\text{CO}_{2(\text{aq})} + \text{HCO}_3 + \text{CO}_3] \quad (1)$$

Poiché le acque investigate (tranne il campione 9) hanno un pH < 8.3, il contenuto in CO_3 può essere considerato trascurabile, e la (1) può essere semplificata come segue:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{TDIC}) = [\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)_{(\text{aq})} * (\text{CO}_{2(\text{aq})}) + \delta^{13}\text{C}(\text{HCO}_3) * (\text{HCO}_3)] / [\text{CO}_{2(\text{aq})} + \text{HCO}_3] \quad (2)$$

Considerando i fattori di arricchimento ε_a , e ε_b , così definiti:

$$\varepsilon_a = \delta^{13}\text{C}(\text{HCO}_3) - \delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)_{(\text{gas})} = (9552/T - 24.1) \quad (\text{Mook et al., 1974})$$

$$\varepsilon_b = \delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)_{(\text{aq})} - \delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)_{(\text{gas})} = (-0.91 + 0.0063 * 10^6/T^2) \quad (\text{Deines, 1970})$$

dove T è espresso in Kelvin, l'equazione (2) può essere scritta come segue:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{TDIC}) = \delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)_{(\text{gas})} + [(\varepsilon_b * (\text{CO}_2)_{(\text{aq})}) / \text{CO}_2_{(\text{aq})} + \text{HCO}_3) + (\varepsilon_a * (\text{HCO}_3) / \text{CO}_2_{(\text{aq})} + \text{HCO}_3)] \quad (3)$$

Alti rapporti di $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (i.e. prevalenza di carbonio “pesante”, cioè il carbonio 13) sono da imputare a origini inorganiche del carbonio ad alta temperatura (mantello, processi di decarbonatazione, ecc.) e/o a interazioni prolungate con litologie carbonatiche ($\delta^{13}\text{C}$ dei carbonati appenninici pari a $2.2 \pm 0.66\%$, Chiodini et al., 2004), mentre bassi rapporti di $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (i.e. prevalenza di carbonio “leggero”, cioè il carbonio 12) sono da imputare a origini organiche (i.e. biogeniche) del carbonio ($\delta^{13}\text{C} \approx -20-22\%$, Solomon & Cerling, 1987).

L'analisi della **figura 5.29** mostra una grande variabilità nel valore isotopico del TDIC ($\delta^{13}\text{C}$ inteso come rapporto $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ del campione vs. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dello standard di riferimento per il carbonio V-PDB, espresso in ‰) delle acque campionate. In particolare, i valori sono compresi tra -23.30‰ a + 10.25‰. La distribuzione osservata fa supporre, in prima approssimazione, diverse sorgenti di provenienza della CO_2 e differenti processi di frazionamento isotopico a carico del carbonio. Per una trattazione statistica dei dati isotopici del carbonio sono stati rimossi i due valori più elevati in assoluto: + 7.05‰ della sorgente minerale “S. Paolo”, a Roma sud e + 10.25‰ di un pozzo sito nella zona di Ponte Marconi, in quanto si tratta, probabilmente, di acque che hanno subito particolari processi di frazionamento cinetico che hanno arricchito il campione nella componente pesante del carbonio (i.e. ^{13}C).

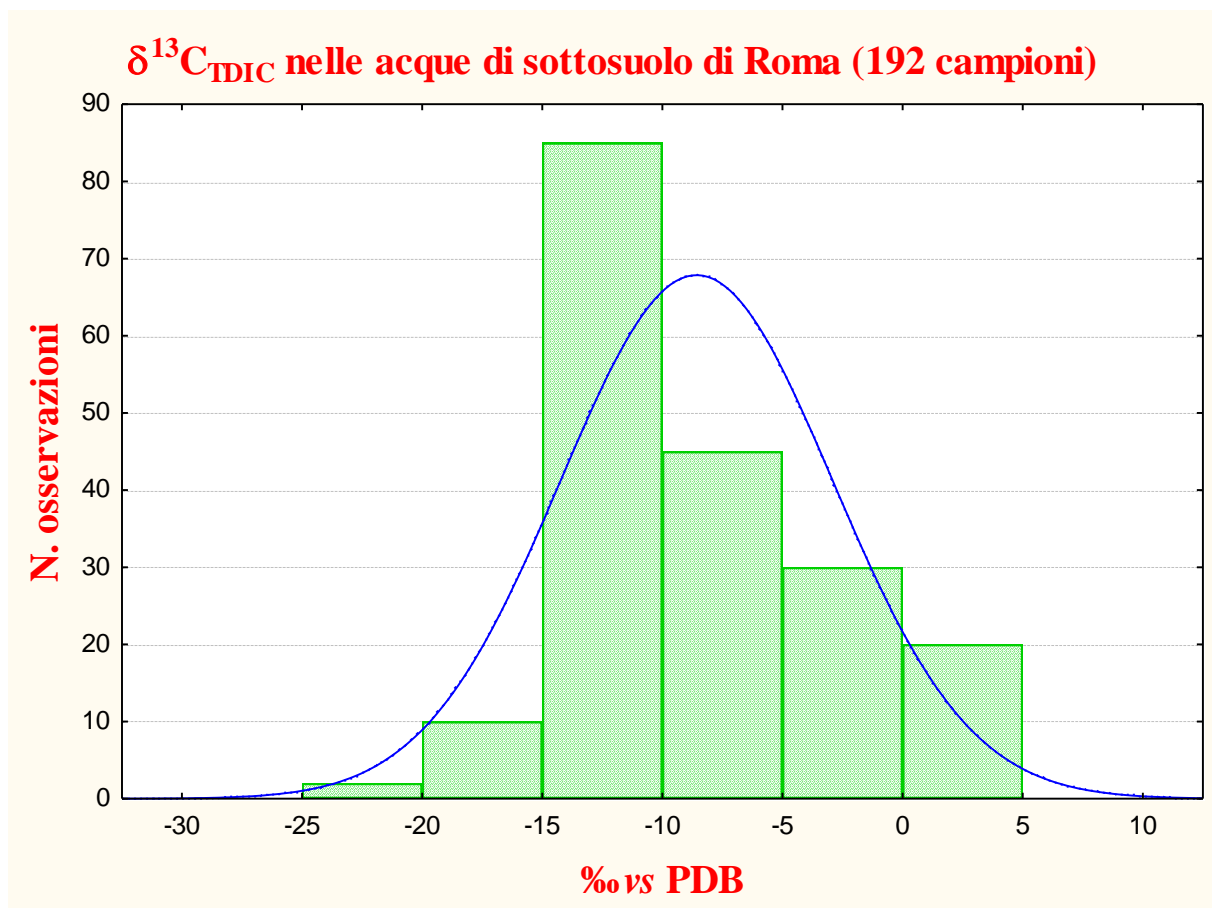


Figura 5.29. Istogramma del $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ nelle acque di sottosuolo dell'area romana (192 campioni).

La mappa della distribuzione del $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ nelle acque di sottosuolo di Roma (**figura 5.30**) identifica le aree caratterizzate da carbonio “pesante” di origine profonda, marcate dai colori arancione e rosso. Confrontando le **figure 5.28 e 5.30** si può notare una buona

sovrapposizione, a conferma che le acque di sottosuolo caratterizzate da elevati valori di log PCO₂ disciolgono carbonio originato ad alta temperatura (processi di decarbonatazione, mantello), mentre quelle con bassi valori di log PCO₂ disciolgono prevalentemente carbonio organico di origine superficiale (i.e. suolo).

Purtroppo, non disponiamo del valore isotopico del TDIC riferito al campione denominato “Hotel Plaza”, situato nel centro di Roma (Corazza & Lombardi, 1995); di conseguenza, questo dato non è stato inserito nella mappa di **figura 5.30**. Il suo notevole arricchimento in bicarbonato e le sue caratteristiche chimiche e chimico-fisiche, comunque, lasciano ipotizzare una provenienza profonda della CO₂ disciolta, dato rilevante per il settore centrale della capitale. A supporto di questa ipotesi vi sono due importanti evidenze geochimiche: *i*) il dato isotopico del carbonio delle concrezioni calcaree esaminate da Mattia (2014) nella grotta che costituisce la parte finale dell’Acquedotto Vergine antico di Roma, nei pressi del Pincio (Piazza del Popolo), che ha evidenziato un apporto di CO₂ profonda e *ii*) la presenza di travertini nell’area di piazza del Popolo e di via del Babuino (molto vicini all’Hotel Plaza), che costituiscono il limite meridionale della lunga fascia che termina, a nord, nell’area di Valle Giulia (Parioli). Manfra et al. (1976), analizzando il loro $\delta^{13}\text{C}$, hanno determinato che questi travertini furono precipitati da soluzioni ricche in CO₂ isotopicamente “pesante” (i.e. di origine profonda), derivata, ad esempio, dalla dissociazione termica dei carbonati; essi furono definiti da Minissale (2004) come “termogenici”.

Nella **figura 5.31**, in cui si confronta il contenuto del carbonio totale (TDIC, calcolato con il programma *Phreeqc*) e la sua caratterizzazione isotopica, sono riportati i due campioni anomali, uno del dominio vulcanico (Acqua San Paolo) e uno del dominio sedimentario (pozzo presso Ponte Marconi, campione 101 in **tabella A4**). Essi mostrano valori estremamente positivi del $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$, completamente differenti dagli altri, meritando una trattazione particolare. Per il campione del vulcanico, stante la sua alta mineralizzazione e il suo alto contenuto in CO₂ si possono ipotizzare fenomeni di degassamento superficiale (notevole effervescenza) con il conseguente frazionamento isotopico del carbonio, che determina l’arricchimento dell’isotopo più pesante nella fase liquida e di quello più leggero nella fase gassosa, giustificando l’anomalo arricchimento in ¹³C. Questo campione rappresenta l’*end-member* di questo tipo di processo di frazionamento isotopico, già rilevato in altre acque ricche in CO₂ circolanti nel dominio vulcanico sia degli albanici (Mariucci et al., 2008) che dei sabatini (Cinti et al., 2011), che presentano valori positivi del $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ (**tabella A4**). Per la sua importanza in quanto rappresentativo degli acquiferi ricchi in CO₂ del settore meridionale di Roma, l’acqua “San Paolo” è stata considerata nella mappa di **figura 5.30** nella quale, per una migliore delimitazione

delle aree anomale, il suo valore è stato abbassato a + 4‰, mantenendo il suo carattere peculiare di acqua che discioglie una componente gassosa profonda.

Il pozzo presso Ponte Marconi preleva acqua dalle alluvioni del Tevere, in cui sono presenti anche limi e argille con abbondante sostanza organica. Si tratta di un'acqua mediamente salina, con valori debolmente positivi di Eh ed elevate concentrazioni di Fe, Mn e metano (quest'ultimo fino a 10^5 volte un Air Saturated Water). Probabilmente, la CO_2 presente deriva proprio da processi di fermentazione metanogenica (Gorgoni et al., 1982; Venturini et al., 1990) tramite reazioni del tipo ($2\text{CH}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{CH}_4$), che producono una CO_2 isotopicamente pesante ($\delta^{13}\text{C}$ fino a +15‰), in accordo con quanto osservato. La presenza di un ambiente debolmente anossico che impedirebbe, di fatto, l'ossidazione della sostanza organica ($\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) e quindi valori isotopici della CO_2 negativi supporta fortemente quanto ipotizzato. Per la sua particolare genesi, il campione pozzo Ponte Marconi non è stato considerato né nell'istogramma di **figura 5.29** né nella mappa di **figura 5.30**.

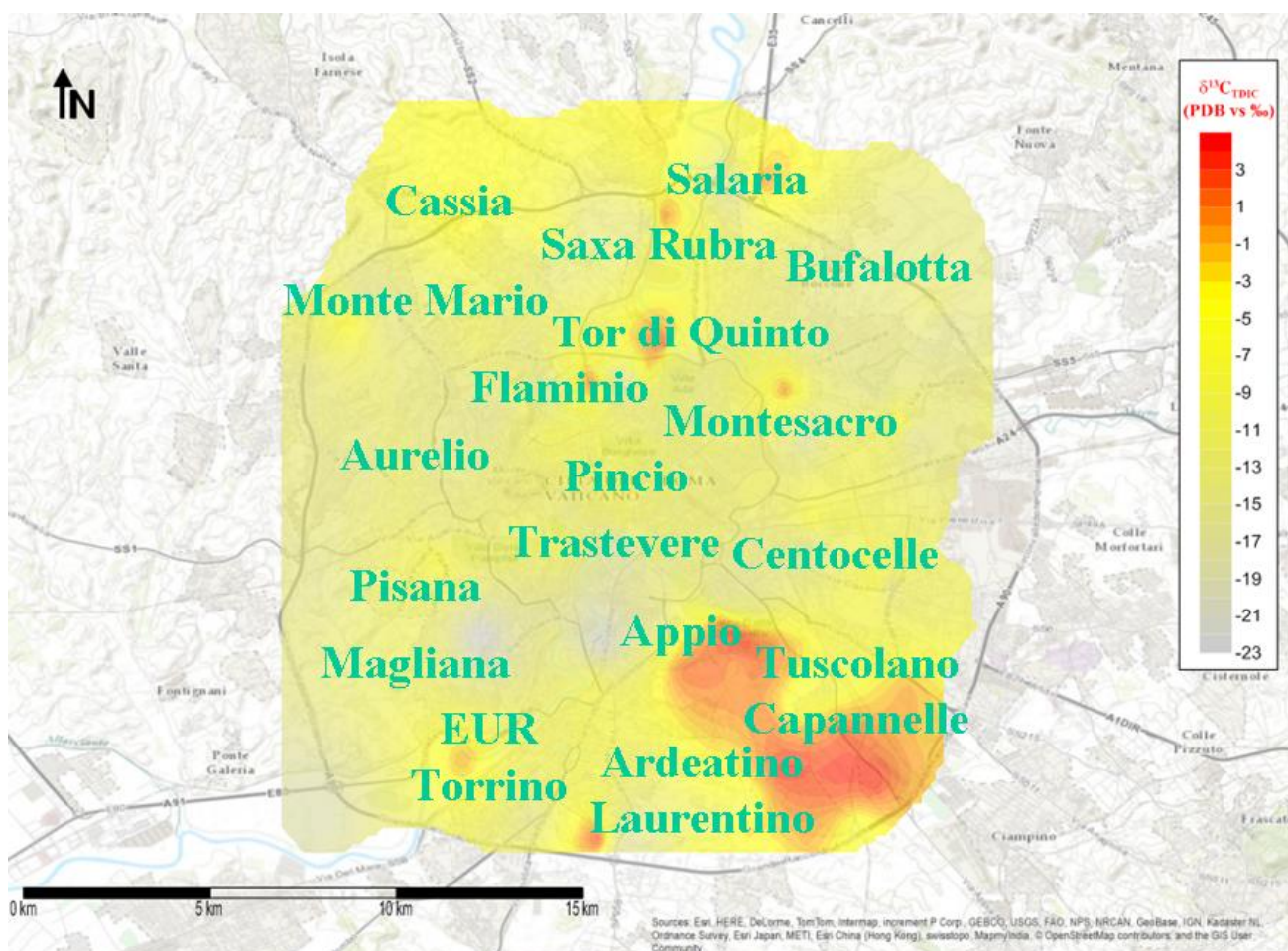


Figura 5.30. Distribuzione del $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ nelle acque di sottosuolo dell'area romana. Le aree in arancione e in rosso sono quelle caratterizzate da degassamento di origine profonda.

Come si evince dalla **figura 5.31**, i campioni del dominio sedimentario, tranne rari casi, hanno un valore di TDIC tra 5 e 10 mmoli/kg e un $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ medio tra -15 e -10‰, giustificabile con un miscelamento tra CO_2 di origine organica (biogenica-microbica) prodotta nel suolo ($\delta^{13}\text{C} = -20/-22\%$, Solomon & Cerling, 1987) e quella dovuta all'attacco dei carbonati ($\delta^{13}\text{C} = \sim 0$, Faure 1986) dispersi in falda (come granuli più o meno fini nella sabbia, nel limo e nelle alluvioni), di origine quindi minerale. I pochi valori positivi, si riferiscono ad acque che circolano in zone ad elevato flusso di CO_2 profonda (campioni 55, 99, 167 e 187), **tabella A4**. Le acque del dominio vulcanico presentano un valore di TDIC tra 5 e 10 mmoli/kg e un $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ mediamente più elevato di quelle del dominio sedimentario, dovuto a dissoluzione di anidride carbonica di origine profonda. Completamente differenti sono le acque di Tor di Quinto, che presentano valori elevati del TDIC (tra 15 e 35 mmoli/kg), la cui caratterizzazione isotopica lascia ipotizzare senza alcun dubbio apporti di CO_2 profonda.

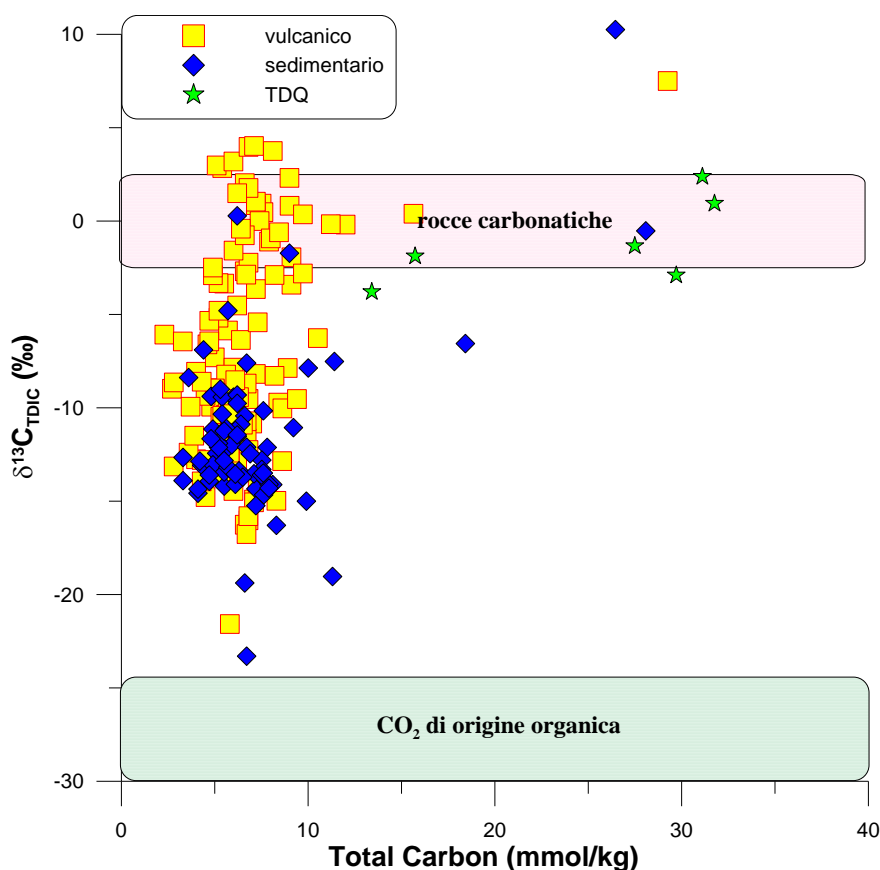


Figura 5.31. Diagramma Total Carbon vs. $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ delle acque di sottosuolo dell'area urbana di Roma.

Da notare che le acque (sia del dominio vulcanico sia di quello sedimentario) che presentano valori più positivi del $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ ricadono nell'intervallo isotopico della CO_2 emessa

dalle principali manifestazioni naturali sia dei Colli Albani che dei Sabatini (tra -2.61 e 1.33‰ vs PDB, Mariucci et al., 2008; Cinti et al., 2011), lasciando ipotizzare una simile origine (di alta temperatura, mantellica e/o crostale) dell'anidride carbonica disciolta.

A conferma di ciò, si riporta il diagramma $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ vs $\log \text{CO}_2/{}^3\text{He}$ di **figura 5.32**, in cui emerge che le acque in cui è stato possibile correggere il rapporto isotopico dell'elio (e quindi calcolare sia la concentrazione di ${}^3\text{He}$ e ${}^4\text{He}$, si veda dopo) sono nel *range* dei valori riferiti ai gas *vent* degli apparati vulcanici Albani e Sabatini. Sia la CO_2 profonda disciolta nelle acque di Roma che quella profonda emessa esternamente all'area investigata sono il risultato di un *mixing* a vario grado tra una componente mantellica e una componente crostale in cui il basamento carbonatico mesozoico assume una particolare importanza nella loro genesi (Minissale et al., 1997; Minissale, 2004; Carapezza & Tarchini, 2007; Mariucci et al., 2008; Ciotoli et al., 2013; Sella et al., 2014). Dalla figura, infatti, si evince chiaramente come i campioni presentino un rapporto $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$ più alto rispetto a un MORB e un $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ più positivo (solo per i gas liberi) rispetto a una CO_2 originata dal mantello (e.g. Ozima and Podosek, 2002; $\delta^{13}\text{C}$ dei carbonati appenninici pari a $2.2 \pm 0.66\%$, Chiodini et al., 2004). La CO_2 disciolta, infatti, a parità di origine rispetto a quella emessa nei gas *vent*, presenta un valore del $\delta^{13}\text{C}$ mediamente più negativo, in quanto esso è controllato dalle più o meno ripetute interazioni del flusso gassoso profondo con gli acquiferi, che portano a una progressiva “negativizzazione” del valore isotopico originario (Mook et al., 1974). Infatti, dall'equazione (3) si ha:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)_{(\text{gas})} = \delta^{13}\text{C}(\text{TDIC}) - [(\epsilon_b * (\text{CO}_2)_{(\text{aq})}) / \text{CO}_2_{(\text{aq}) + \text{HCO}_3} + (\epsilon_a * (\text{HCO}_3) / \text{CO}_2_{(\text{aq}) + \text{HCO}_3})] \quad (4)$$

in cui il termine isotopico del bicarbonato, anione dominante nelle acque naturali, risulta essere arricchito mediamente del 7‰ (a 25°C) rispetto alla $\text{CO}_2(\text{gas})$ di partenza (Faure, 1986), ricoprendo un ruolo primario nel determinare il valore finale del $\delta^{13}\text{C}$. Alla stessa temperatura, infatti, il termine che si riferisce alla CO_2 disciolta (i.e. $\text{CO}_2(\text{acq})$ o H_2CO_3) è impoverito solamente di circa l'1‰ rispetto alla $\text{CO}_2(\text{gas})$ di partenza (Mook et al., 1974).

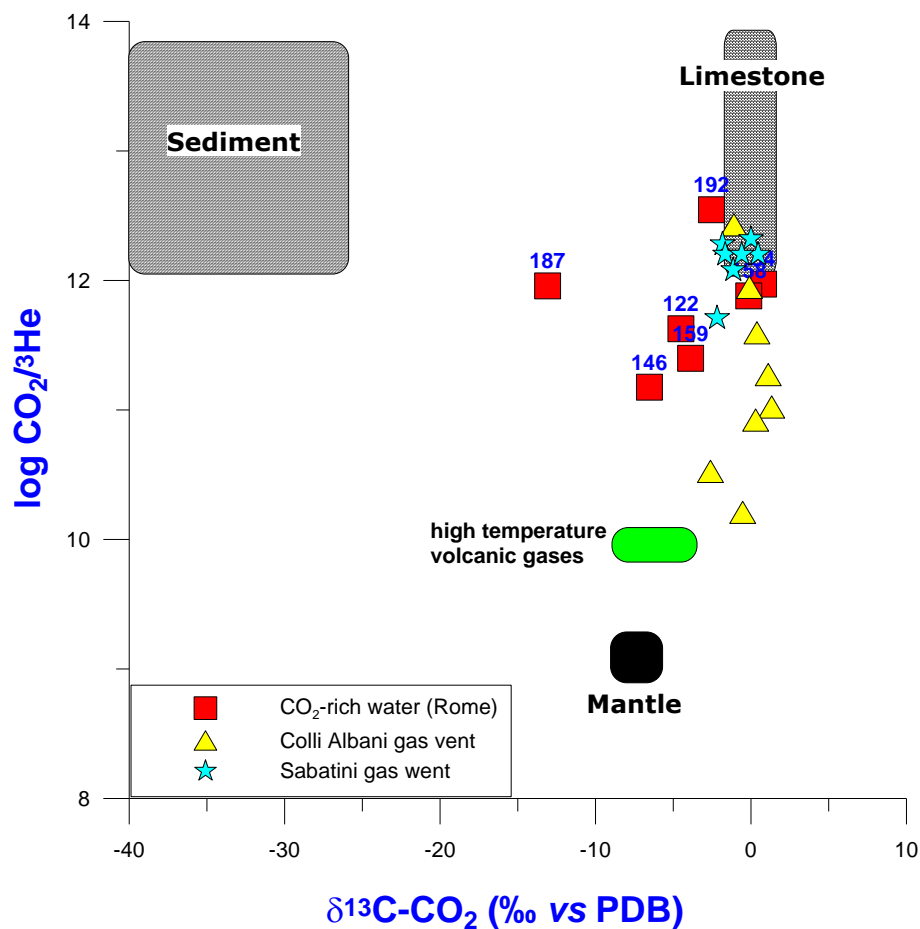


Figura 5.32. Diagramma $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ (calcolata per le acque di Roma) vs $\log \text{CO}_2/{}^3\text{He}$ delle acque dell'area urbana di Roma. Per confronto, sono riportati i valori isotopici della CO_2 , i rapporti $\log \text{CO}_2/{}^3\text{He}$ delle principali manifestazioni naturali dei Colli Albani e dei Sabatini, e gli *end-member* del mantello, dei carbonati e dei sedimenti (organico).

5.7 Origine dell'elio nelle acque di sottosuolo

Lo studio della composizione isotopica del TDIC ha permesso la definizione di aree caratterizzate da acque che disciolgono una CO_2 profonda da quelle caratterizzate da acque con prevalente CO_2 di origine biogenica. Il grande limite nell'interpretazione dei risultati è, a volte, la mancanza di una chiara e univoca origine della CO_2 , in quanto essa può essere il risultato di miscelamenti tra più "sorgenti" con valori isotopici profondamente diversi (p.es. CO_2 biogenica e dei carbonati) o avere un valore isotopico che ricade nel *range* tipico di due sorgenti che possiedono caratteristiche completamente differenti (per esempio CO_2 del mantello con $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ tra -4.5 e -6.5‰, e.g. Kyser, 1986 e CO_2 atmosferica con $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ compresa tra -6 e -8‰ vs PDB, e.g. Faure, 1986). Quanto ora descritto diventa evidente quando si analizza la fase acquosa in cui, come riportato in precedenza, le ripetute interazioni gas-acquiferi possono apportare continui frazionamenti isotopici del carbonio, rendendo lo studio sull'origine della CO_2 particolarmente

complesso. Alla luce di ciò, l'interpretazione del dato isotopico del carbonio è da considerare qualitativa, non potendo, nella maggior parte dei casi, quantificare l'apporto delle varie sorgenti che contribuiscono al valore misurato. Tale obiettivo può essere raggiunto avvalendosi degli isotopi dell'elio i cui *end-member* sono ben definiti e con valori isotopici (R/Ra dove $R = {}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ del campione e $Ra = {}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ dell'atmosfera, pari a $1.39 \cdot 10^{-6}$) ben differenziati (e.g. Ozima and Podosek, 2002): mantello tipo MORB = $8.0Ra$, mantello sub-continentale europeo = $6.5Ra$ (Dunai & Baur, 1995), crosta = $0.02Ra$ e aria = 1. Sono state selezionate 13 acque di sottosuolo su cui effettuare l'analisi isotopica dell'elio, rappresentative delle circolazioni profonde nell'area urbana di Roma. Su questi campioni sono state effettuate, o si stanno effettuando, anche le analisi isotopiche di Sr e Trizio (vedi paragrafo 5.3). Una prima valutazione sull'origine delle acque può essere effettuata tramite l'analisi del diagramma di Giggenbach Ar-N₂-He di **figura 5.33**. La maggior parte delle acque ha una composizione gassosa simile all'ASW (Air Saturated Water, *end-member* superficiale), ma alcune di esse (34, 146, 158, 159) tendono verso il vertice dell'elio, come arricchimento verso un termine definito in prima approssimazione come crostale (Giggenbach et al., 1983). Questi campioni sono ubicati nel settore meridionale (Capannelle, il 34) e centro settentrionale (Saxa Rubra, il 146 e Tor di Quinto, 158 e 159) di Roma, che erano già stati riconosciuti come sede di acque ricche in CO₂ profonda, giustificando pienamente la loro posizione nel diagramma di **figura 5.33**. I campioni 87, 163, 187 e 192 non sono riportati nel diagramma in quanto non è stato determinato il loro contenuto in Ar. Per discriminare l'origine dell'elio di cui sono arricchiti i campioni 34, 146, 158 e 159, si può utilizzare il diagramma di **figura 5.34**, He/Ne vs R/Ra. In questo grafico sono riportate le acque superficiali (6), caratterizzate da He/Ne < 1 e R/Ra circa = 1, e le acque che disciolgono una componente profonda (7, i.e. quelle con un alto He/Ne), che si allontanano dall'ASW e si dispongono in un campo indicante un *mixing* tra la sorgente tipica del mantello (indipendentemente se si considera quello sub-continentale europeo o quello locale contaminato da contributi crostali, entrambi arricchiti in ³He) e quella crostale (arricchita in ⁴He). I campioni in questione sono quelli con He/Ne > 1: 34, 122, 146, 158, 159, 187 e 192 (**figura 5.34**). Sono tutte acque che circolano in aree riconosciute come caratterizzate da risalite di CO₂ profonda e che disciolgono anche elio di provenienza profonda. Nello stesso diagramma, per confronto, sono riportati i valori isotopici dell'elio delle manifestazioni gassose principali dei Colli Albani e dei Sabatini (Mariucci et al., 2008; Cinti et al., 2011); ovviamente, questi campioni hanno un rapporto He/Ne elevato (fino a 800), risentendo in misura contenuta sia del contributo dell'ASW (He/Ne = 0.285) sia del contributo atmosferico (He/Ne = 0.318). Il loro R/Ra compreso tra 0.18 e 1.38, mediamente, è molto simile a quello delle acque investigate (compreso tra 0.42 e 1.11,

tabella A6 e figura 5.35), confermando che i processi profondi che modulano il degassamento “locale” nelle acque di Roma sono comuni a un più ampio settore dell’Italia centrale, e possono essere considerati, quindi, a livello “regionale”; nel settore tirrenico centrale, infatti, sono stati riconosciuti, nei fluidi circolanti, evidenti contributi dal mantello (Minissale et al., 1997; Minissale, 2004).

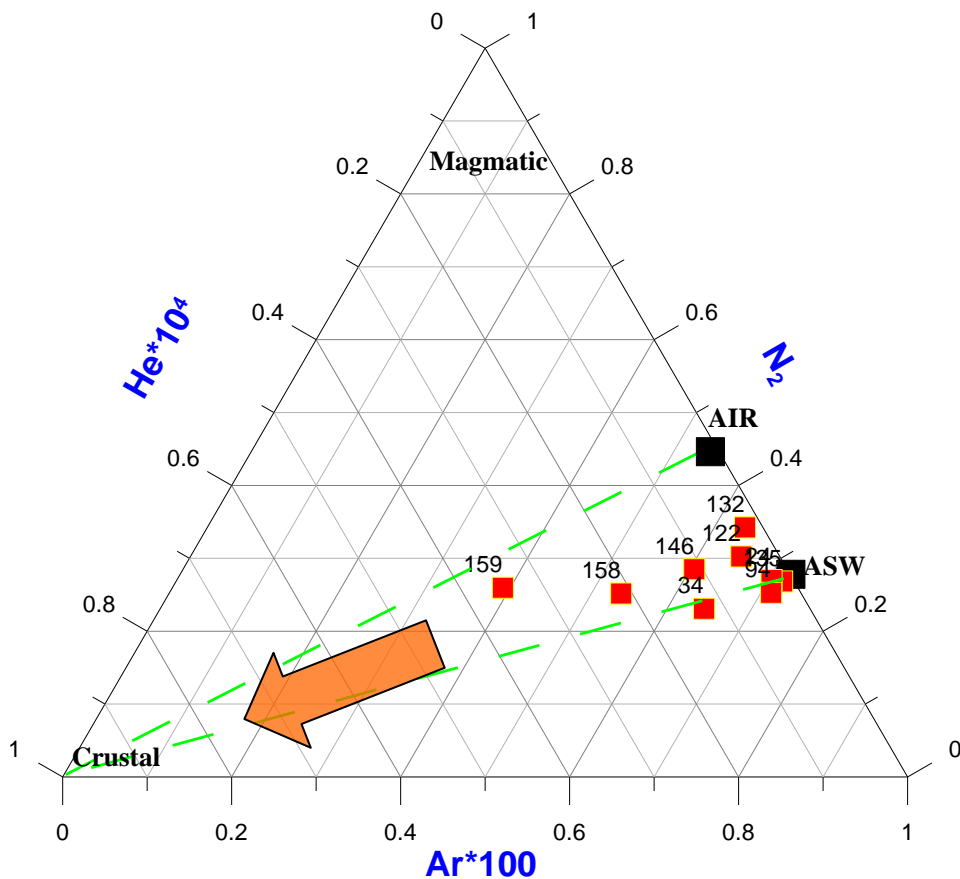


Figura 5.33. Diagramma ternario Ar-N₂-He delle acque campionate nell’area urbana di Roma. Per confronto, sono riportate le composizioni dell’aria (AIR) e dell’ASW (Air Saturated Water). La freccia arancione indica la tendenza di alcune acque verso il vertice dell’elio, definito come “crostale”.

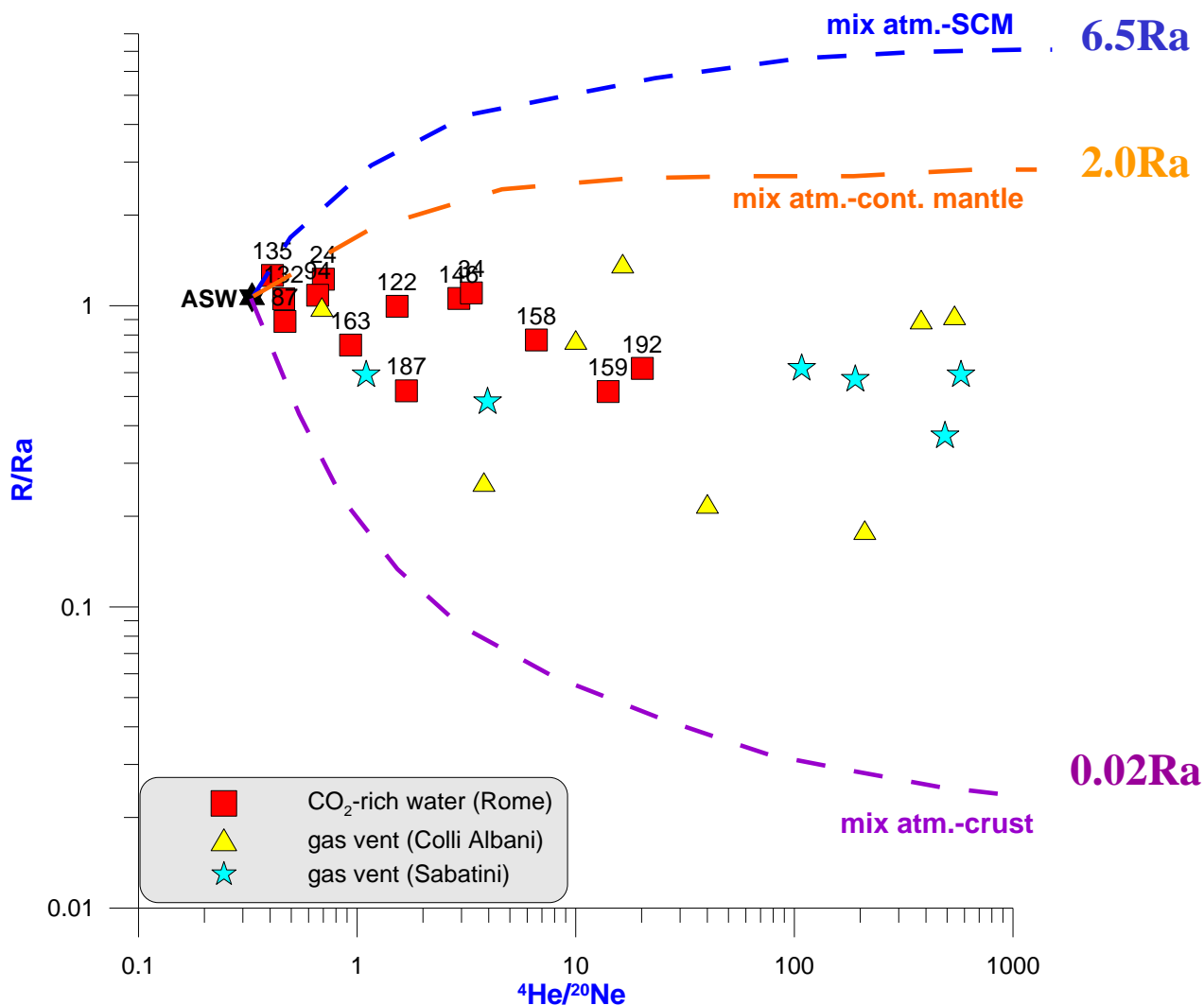


Figura 5.34. Diagramma $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ vs R/R_a delle acque dell'area urbana di Roma. Per confronto, sono riportati gli *end-member* del mantello sub-continentale europeo ($R = 6.5R_a$), quello "locale" basato sul massimo rapporto trovato nelle vulcaniti albane e sabatine ($R = 2.0R_a$), e quello crostale ($R = 0.02R_a$), tutti con $\text{He}/\text{Ne} > 1000$. In blu, arancione e viola sono riportate, rispettivamente, le linee di *mixing*, tra l'ASW e il mantello, il mantello "locale" e la crosta.

Tramite il rapporto isotopico dell'elio, conoscendo R_c/R_a (R_c è il valore corretto per la contaminazione atmosferica, possibile solo sui campioni con $\text{He}/\text{Ne} > 1$) e i valori degli *end-member* atmosfera, mantello e crosta, si possono finalmente calcolare i contributi di queste tre componenti nelle acque investigate. Ricordiamo che i campioni che presentano $R_c/R_a > 0.1$ sono considerati in maniera inequivocabile influenzati da un componente mantellico (Ballentine et al., 2002).

In particolare, per le finalità del presente studio, si riportano nella **figura 5.36** le percentuali di elio originato nel mantello nelle acque di sottosuolo selezionate, considerando il valore di $2.0R_a$ come riferimento per il mantello sottostante l'area del Lazio centro-settentrionale (valore massimo di $^3\text{He}/^4\text{He}$ nelle inclusioni fluide dei prodotti vulcanici Albani e Sabatini,

Martelli et al., 2004), di $0.02R_a$ per la crosta e $1R_a$ per l'atmosfera. Le percentuali calcolate variano tra il 17 e il 36% per l'area di Tor di Quinto-stadio Olimpico, sono pari al 41% per il campione di Montesacro, al 48% per il campione di Saxa Rubra e, per finire, al 50% per il campione di Capannelle. Da notare che quest'ultimo campione, che mostra il valore più elevato tra quelli ottenuti, è situato nei pressi dell'alto strutturale di Ciampino dove, presso la manifestazione gassosa di Cava dei Selci ($R/R_{a_c} = 1.40$), è stato calcolato un contributo del mantello pari al 68%, il più alto di tutta l'area dei Colli Albani.

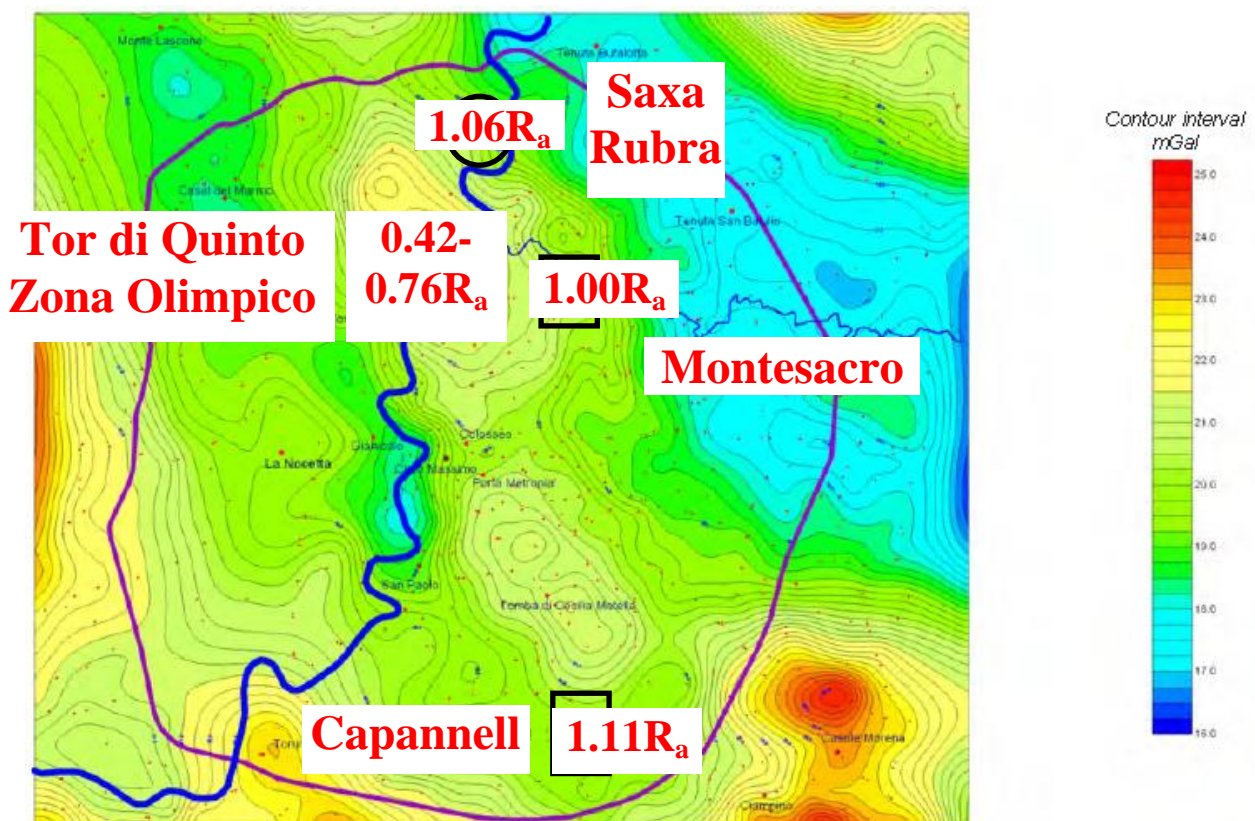


Fig. 8 - Mappa filtrata Highpass (λ 11 Km). - High Pass Filtered Map (λ 11 Km).

Figura 5.35. Mappa dei valori R/R_a nelle acque di sottosuolo dell'area romana. L'area di Saxa Rubra (campione 146) ha $1.06R_a$; l'area di Tor di Quinto-stadio Olimpico (campioni 158, 159, 187 e 192) $0.42-0.76R_a$; l'area di Montesacro (campione 122) $1.00R_a$; l'area di Capannelle (campione 34) $1.11R_a$.

Le percentuali di elio mantellico che si disciolgono negli acquiferi di alcuni settori dell'area urbana di Roma raggiungono valori davvero degni di nota, comparabili con le acque che circolano nell'area a maggior degassamento dei Colli Albani (alto strutturale di Ciampino, dati INGV non pubblicati) e notevolmente superiori a quelle dei Sabatini (Cinti et al., 2011). Quanto osservato è un segnale inequivocabile che le strutture geologiche profonde dell'area romana, che favoriscono la risalita del gas dal luogo di produzione (mantello e crosta), degassano attivamente e hanno carattere litosferico (Klemperer et al., 2013).

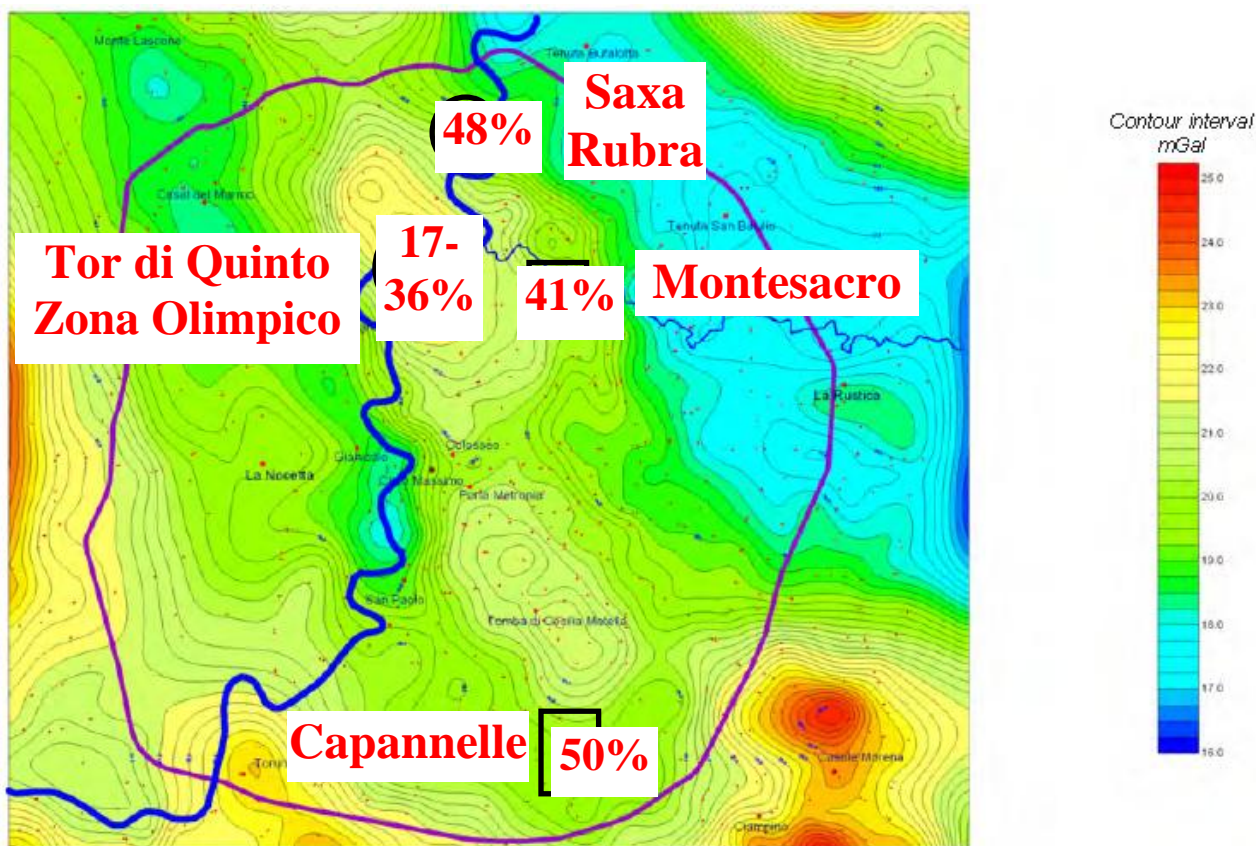


Fig. 8 - Mappa filtrata Highpass (λ 11 Km). - High Pass Filtered Map (λ 11 Km).

Figura 5.36. Mappa della distribuzione percentuale della componente dell'elio originato dal mantello nelle acque di sottosuolo dell'area romana.

5.8 Origine e distribuzione del radon nelle acque di sottosuolo

Come per la CO_2 , la distribuzione di frequenza dell'attività del gas radon nelle acque di sottosuolo di Roma è stata analizzata tramite l'istogramma di figura 5.37. I dati utilizzati sono quelli ottenuti nel presente lavoro (190 acque) con l'aggiunta di altri 7 campioni selezionati da Vivona (2001). La classe più rappresentata (i.e. quella con maggiore frequenza) corrisponde all'intervallo 1-50 Bq/l, mentre quella con minore frequenza è nell'intervallo 250-300 Bq/l. L'analisi statistica descrittiva evidenzia un valore medio di 46 Bq/l, una mediana di 31 Bq/l, e un quartile superiore (75%) pari a 61 Bq/l. Il valore medio più grande di quello della mediana definisce una distribuzione di frequenza caratterizzata da una coda verso i valori più elevati (*skewness* positiva). Come nel caso della distribuzione della CO_2 disciolta (*par.* 5.4), l'asimmetria positiva osservata potrebbe essere dovuta alla presenza di due sottopopolazioni con media e deviazioni standard differenti (Ciotoli & Finoia, 2005), di nuovo corrispondenti alle acque del sedimentario e quelle del vulcanico. Infatti, le prime (72 campioni) mostrano un'attività del radon generalmente più bassa (media = 21 Bq/l) rispetto alle seconde (119

campioni), che mostrano valori generalmente maggiori di radon (media = 63 Bq/l). Le acque di Tor di Quinto (solo 6 campioni) hanno un piccolo peso statistico, ma possono essere sommate al contributo del dominio sedimentario in quanto gli acquiferi che le alimentano sono ospitate in questo tipo di litologia e, di conseguenza, presentano bassi valori radon (media = 10 Bq/l). Quanto osservato probabilmente dipende dal diverso contenuto degli elementi precursori del radon (i.e. U, Ra), elevato nelle vulcaniti albane e sabatine e notevolmente inferiore nei termini sedimentari pre-vulcanici dell'area romana (Tuccimei et al., 2006; Castelluccio, 2010, Castelluccio et al., 2012; Lucchetti, 2014).

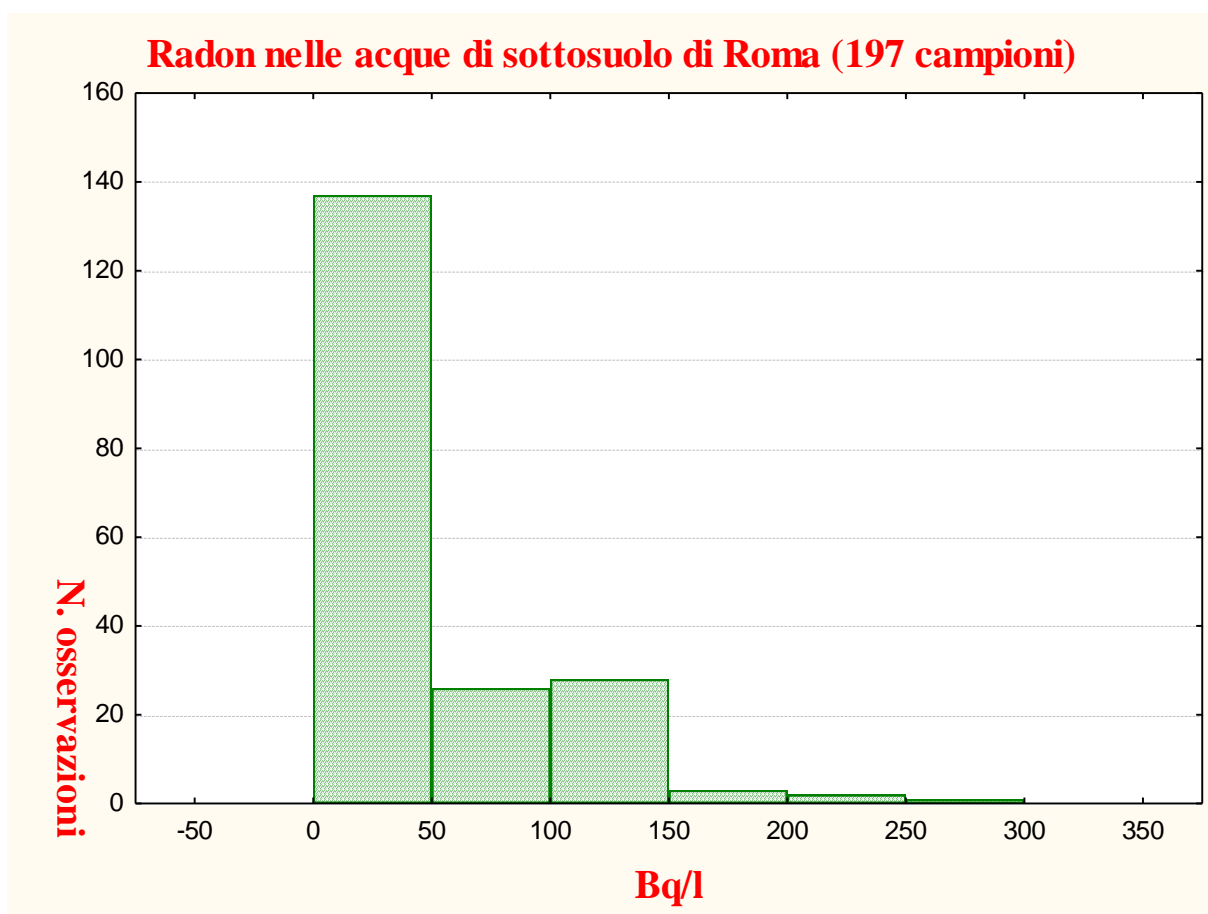


Figura 5.37. Istogramma dell'attività del radon nelle acque di sottosuolo dell'area romana (197 campioni).

In ogni caso, l'aspetto più importante che può essere evidenziato nell'istogramma di frequenza è che nell'area romana, come atteso considerando il *background* regionale (Beaubien et al., 2003; Capaccioni et al., 2012 Cinti et al., 2013, Cinelli et al., 2014) vi sono numerose acque ricche in radon, con valori misurati fino a 280 Bq/l (tabella A5 e figura 5.37). La distribuzione del radon disciolto nelle acque di sottosuolo di Roma è riportata nella figura 5.38. La soglia di anomalia è stata calcolata tramite il diagramma di probabilità cumulata, e posta a 80

Bq/l (molto vicina al quantile superiore, pari a 61 Bq/l); tale valore identifica, nella scala cromatica, i valori dal giallo al rosso, che risultano le aree in cui l'attività del radon disciolto è maggiore. Nella **figura 5.38** è evidenziata una vasta area che copre il settore meridionale (Ardeatino-Laurentino) e sud-orientale di Roma (Appio, Tuscolano, Capannelle), inglobando anche parte di quella orientale (Centocelle, Colli Aniene). Aree con acque di sottosuolo ricche in radon, a carattere più isolato, sono ubicate nel settore sud-occidentale (EUR-Torrino), centrale (Porta Metronia-Terme di Caracalla) e settentrionale (Salaria, Saxa Rubra, Montesacro) della capitale. Da notare che tutto il settore ovest e parte di quello nord-est presenta attività di radon molto basse (< 50 Bq/l, aree grigie in **figura 5.38**).

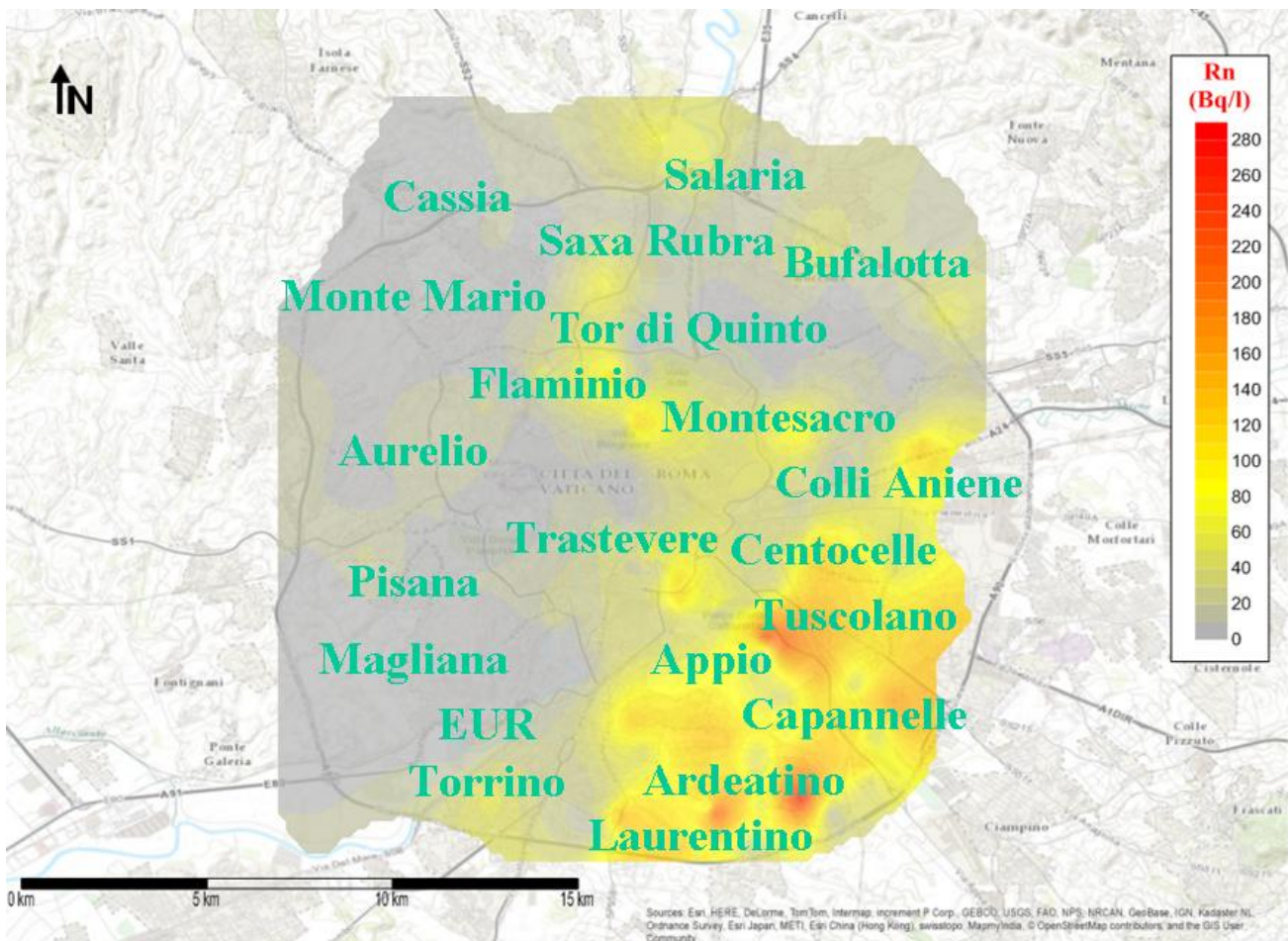


Figura 5.38. Distribuzione del radon nelle acque di sottosuolo dell'area romana (197 campioni). Le aree dal giallo al rosso sono caratterizzate da elevate attività di radon disciolto.

La forte correlazione tra tipo di substrato (vulcanico o sedimentario) e attività di radon nelle acque di sottosuolo è chiaramente evidenziata nella **figura 5.39** tramite le *classed-post maps* (mappe a classi di valori). In questo tipo di rappresentazione cartografica i dati sono raggruppati in classi discrete di valori, al fine di mettere in evidenza zone caratterizzate da valori elevati e/o bassi fornendo la possibilità di esaminare le relazioni uno-a-molti tra il valore vero e

il simbolo (Ciotoli & Finoia, 2005). In particolare, i punti di misura, identificati da simboli a grandezza proporzionale all'attività di radon misurata, sono riportati sulla carta delle unità idrogeologiche dell'area investigata. Il metodo di classificazione segue il valore dei quantili pari, rispettivamente, a 8 Bq/l (25%), 31 Bq/l (50%) e 61 Bq/l (75%).

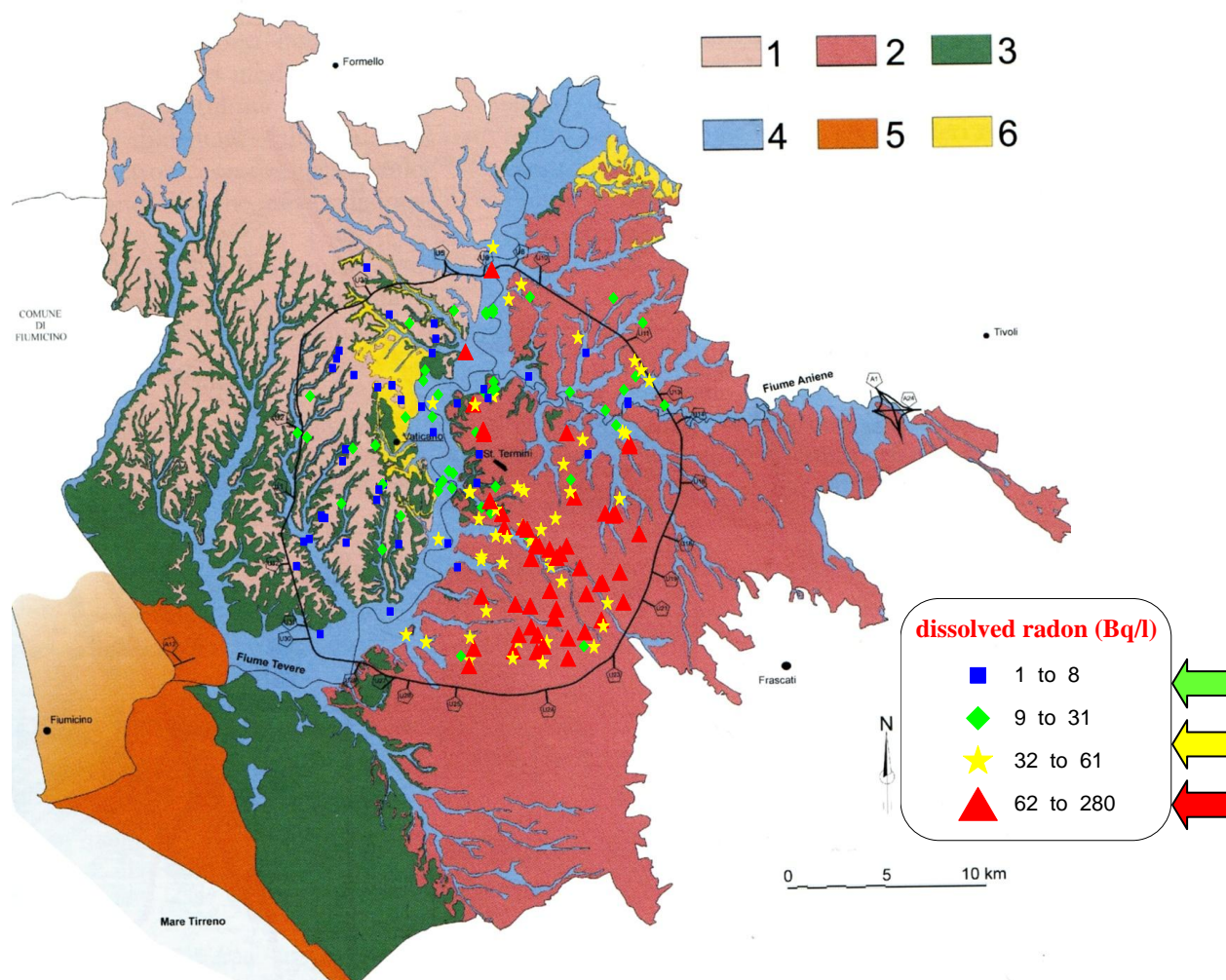


Figura 5.39. Distribuzione del radon nelle acque di sottosuolo dell'area romana (197 campioni) sovrapposta alla carta delle unità idrogeologiche (Capelli et al., 2008). Le acque con la stella gialla e il triangolo rosso sono caratterizzate da elevate attività di radon disciolto. Unità idrogeologiche: (1) Monti Sabatini; (2): Colli Albani; (3): Ponte Galeria; (4): depositi alluvionali recenti e attuali; (5): delta del delta del Fiume Tevere; (6): Complesso idrogeologico dei depositi argilloso-marnosi a bassa permeabilità.

Dall'esame della **figura 5.39** si nota una netta differenza tra l'attività di radon nelle acque circolanti in riva sinistra del Fiume Tevere rispetto a quelle circolanti in riva destra. Le prime presentano mediamente valori più elevati di 32 Bq/l (stella gialla), con un numero consistente di siti nella classe 62-280 Bq/l (triangolo rosso), mentre le seconde, a parte rare eccezioni, ricadono nelle classi 1-8 Bq/l e 9-31 Bq/l (rispettivamente quadrato blu e rombo verde). Nel settore in riva sinistra del

Fiume Tevere affiorano prevalentemente i termini vulcanici dei Colli Albani che, come già riportato, sono ricchi in elementi precursori del radon come uranio e radio. In particolare, sono state misurate attività di radio tra 93 e 220 Bq/kg in prodotti vulcanici quali tufi litoidi, pozzolane, scorie e lapilli (Tuccimei et al., 2006; Castelluccio, 2010, Castelluccio et al., 2012; Lucchetti, 2014) e in uranio fino a 35 ppm (media 22 ppm) nelle pozzolane rosse e 21-29 ppm (media 22 ppm) nelle pozzolane nere (Boari et al., 2009). Mattia (2014) ha determinato in 94 Bq/l il valore dell'attività del radon contenuto in un'acqua di sottosuolo in equilibrio con le pozzolane rosse, considerando una porosità del 30%, un coefficiente di emanazione di 0.2 e una concentrazione in uranio di 6 ppm. Ricordiamo che le pozzolane rappresentano, grazie al loro spessore alla estesa continuità laterale che distingue questa formazione, l'acquifero più importante, dal punto di vista volumetrico, della città di Roma, in particolare nell'area in riva sinistra del Tevere (Roma sud e sud-est). Nel settore di nord-est (Bufalotta) lo spessore di queste vulcaniti è notevolmente ridotto, e le acque circolano nelle ghiaie del "Fosso della Crescenza" (spesse fino a 40 metri, *cap. 2*); di conseguenza, qui le acque presentano attività di radon < 61 Bq/l, con una media intorno a 15-20 Bq/l (**figura 5.38 e 5.39**). Nel settore in riva destra del Fiume Tevere affiorano i termini vulcanici dei Sabatini, che hanno caratteristiche chimiche molto simili ai prodotti degli albanici ma il loro spessore è notevolmente ridotto (alcuni metri, *cap. 2*) e, di conseguenza, gli acquiferi intercettati dai pozzi sono essenzialmente contenuti nei complessi idrogeologici sedimentari pre-vulcanici del settore occidentale di Roma (Unità di Monte Mario, Unità di Ponte Galeria). L'attività del radio in questi termini sedimentari è di gran lunga inferiore rispetto a quelli vulcanici (Lucchetti, 2014); questa caratteristica si riflette nell'attività del radon nelle acque di sottosuolo in riva destra del Tevere, che mostrano valori contenuti, compresi tra 1 e 31 Bq/l (**figura 5.35**).

Alla luce di quanto sopra riportato, si evince chiaramente come l'attività del radon nelle acque di sottosuolo della città di Roma sia strettamente correlata con la litologia che ospita gli acquiferi, che modula la distribuzione finale osservata. Localmente, le variazioni dei parametri geochimici reologici e idrologici riferite ai vari complessi litologici (stato di fratturazione e porosità della roccia, rapporto acqua/roccia, tempo di residenza nell'acquifero, distribuzione degli atomi di uranio e radio nella roccia e suo contenuto d'acqua) e la presenza di faglie o sistemi di faglia possono far variare l'attività del radon disciolto, causando o arricchimenti o impoverimenti rispetto ai valori di *background*. Inoltre, fenomeni di arricchimento in radon nelle acque circolanti, rispetto ai valori teorici (i.e. in equilibrio con le rocce) calcolati, devono essere presi in considerazione per quelle acque circolanti nel settore sud-orientale di Roma che presentano valori ben al di sopra di 94 Bq/l (Mattia 2014). Per queste acque sono probabili processi di trasporto del radon da parte della CO₂ (che funge da *carrier gas*, e.g. Pizzino et al., 2002; Yang et al., 2003; Etiope et al., 2005;

Giammanco et al., 2007; Bigi et al., 2014; Girault and Perrier, 2014), presente in elevate concentrazioni (**figura 5.28**) in questo settore della capitale.

5.9 Modelli concettuali della circolazione delle acque di sottosuolo e origine dei gas disciolti (CO_2 e He)

Di seguito sono illustrati graficamente i tre modelli di circolazione delle acque di sottosuolo riferiti ai principali domini litologici e strutturali riconosciuti nell'area romana (vulcanico, **figura 5.40**, sedimentario, **figura 5.41** e Tor di Quinto, **figura 5.42**), che hanno rappresentato la base per la discussione idrochimica e isotopica effettuata finora. Ogni modello riporta tutti i principali dati ottenuti nel presente studio, delineandone le caratteristiche geochimiche peculiari. Le sezioni geologiche utilizzate sono tratte da studi precedenti, opportunamente citati.

DOMINIO VULCANICO (ROMA SUD-EST)

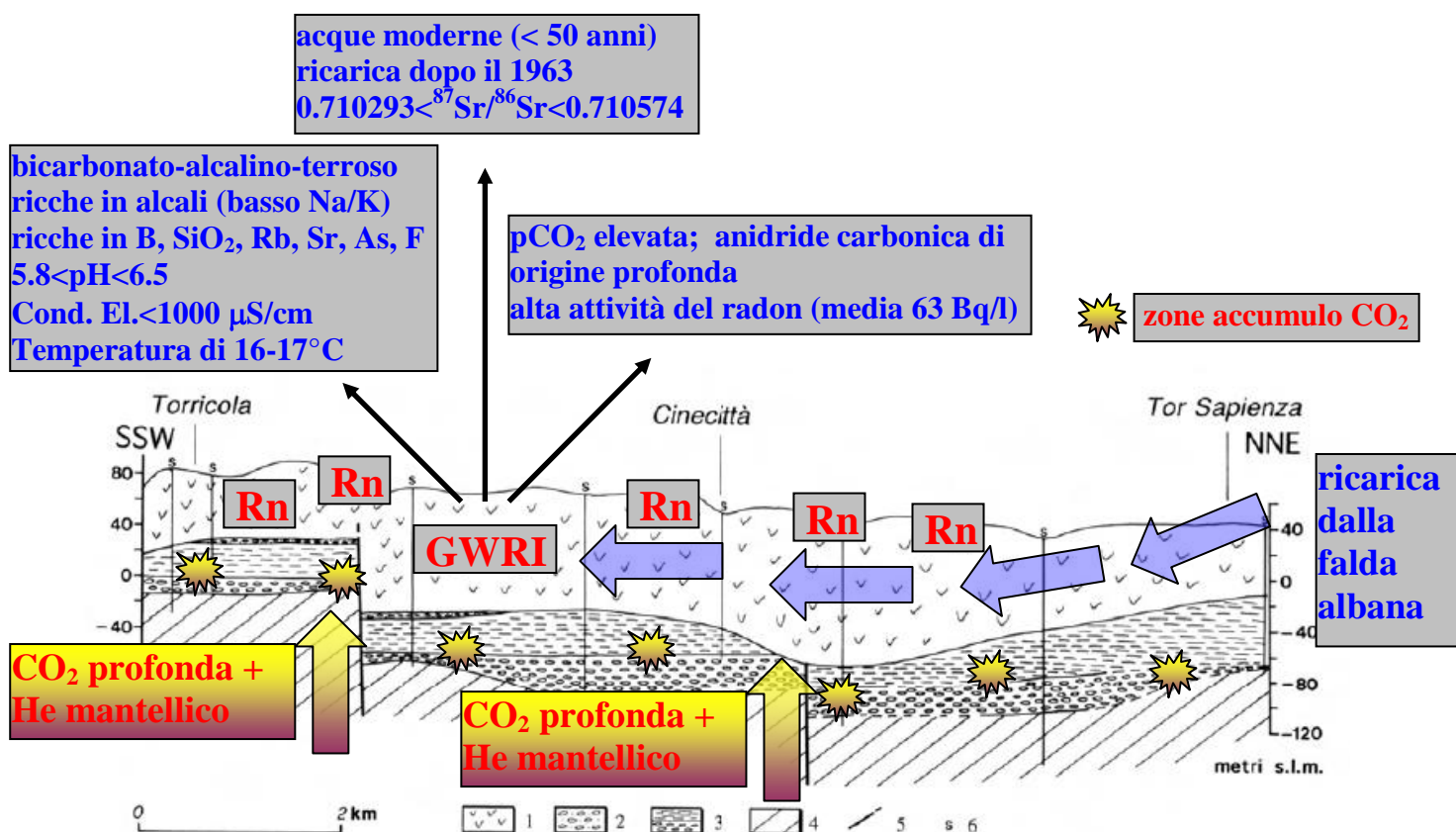


Figura 5.40. Modello concettuale di circolazione delle acque di sottosuolo nel dominio vulcanico (esempio Roma sud-est). Legenda: 1) Unità piroclastiche; 2) Orizzonte conglomeratico pre-vulcanico; 3) Unità del Paleotevere; 4) Unità del Monte Vaticano; 5) Faglie; 6) Sondaggi. (Capelli et al., 2008).

L'acquifero del dominio vulcanico è ricaricato da SE (falda regionale albana) da acque meteoriche infiltratesi all'incirca dopo il 1963 (i.e. acque moderne). Le acque si infiltrano nel terreno e interagiscono con le vulcaniti ricche in alcali (soprattutto potassio), disciogliendo una componente gassosa profonda ricca in CO₂ (GWRI, *Gas-Water-Rock-Interaction*) ed elio, che presenta una evidente (fino al 50%) componente originatesi nel mantello (1.11Ra). La composizione chimica delle vulcaniti (minerali silicatici a dissoluzione lenta, dominati dalla leucite), l'ambiente acido (5.8 < pH < 6.5) e la presenza di calcite (caratterizzata da una veloce cinetica di dissoluzione) come minerale secondario, modulano il chimismo finale delle acque, che risulta essere principalmente bicarbonato alcalino-terroso, con Ca e HCO₃, rispettivamente, catione e anione dominanti e bassi valori Na/K per l'alto contenuto in potassio (media 52 mg/l). In caso di prolungata interazione con le rocce e/o a causa di scambi cationici con le argille (sempre in ambiente ricco in CO₂), il chimismo delle acque evolve verso la *facies* bicarbonato-alcalina, con Na (in sostituzione del Ca) e HCO₃ come ioni dominanti. Le acque presentano elevate concentrazioni di silice (vetro vulcanico chimicamente attaccabile da soluzioni acide), rubidio, stronzio, arsenico e fluoro, tutti elementi presenti nei minerali delle vulcaniti albane. L'analisi isotopica dello stronzio mette in evidenza la buona corrispondenza tra i valori misurati nelle acque e quelli delle vulcaniti albane, confermando quanto ipotizzato sui principali processi di *Gas-Water-Rock-Interaction*. Le temperature dell'acquifero non elevate (16-17°C), il chimismo delle vulcaniti e il basso tempo di residenza (< 50 anni) stimato tramite il contenuto in trizio limitano i processi di interazione acqua-roccia, non permettendo alle acque di sottosuolo di raggiungere un contenuto salino apprezzabile (mediamente < 1000 µS/cm). Stante il loro elevato contenuto in radio, le acque di sottosuolo presentano un'attività del radon elevata, con una media di 63 Bq/l, ma con valori che raggiungono i 280 Bq/l. In presenza di litologie con valori contrastanti di permeabilità (es. ghiaie-argille dell'Unità del Paleotevere, **figura 5.40**), si possono formare delle sacche di CO₂ (definite come CO₂ *pockets*) in cui il gas si accumula; tale gas può risiedere in loco, formando acquiferi in pressione, oppure risale verso la superficie (*macroseepage*, Brown, 2000) tramite le faglie e le fratture che interessano, per esempio, le argille basali di Monte Vaticano, quelle più recenti dell'Unità del Paleotevere, o le vulcaniti quaternarie.

DOMINIO SEDIMENTARIO (ROMA OVEST)

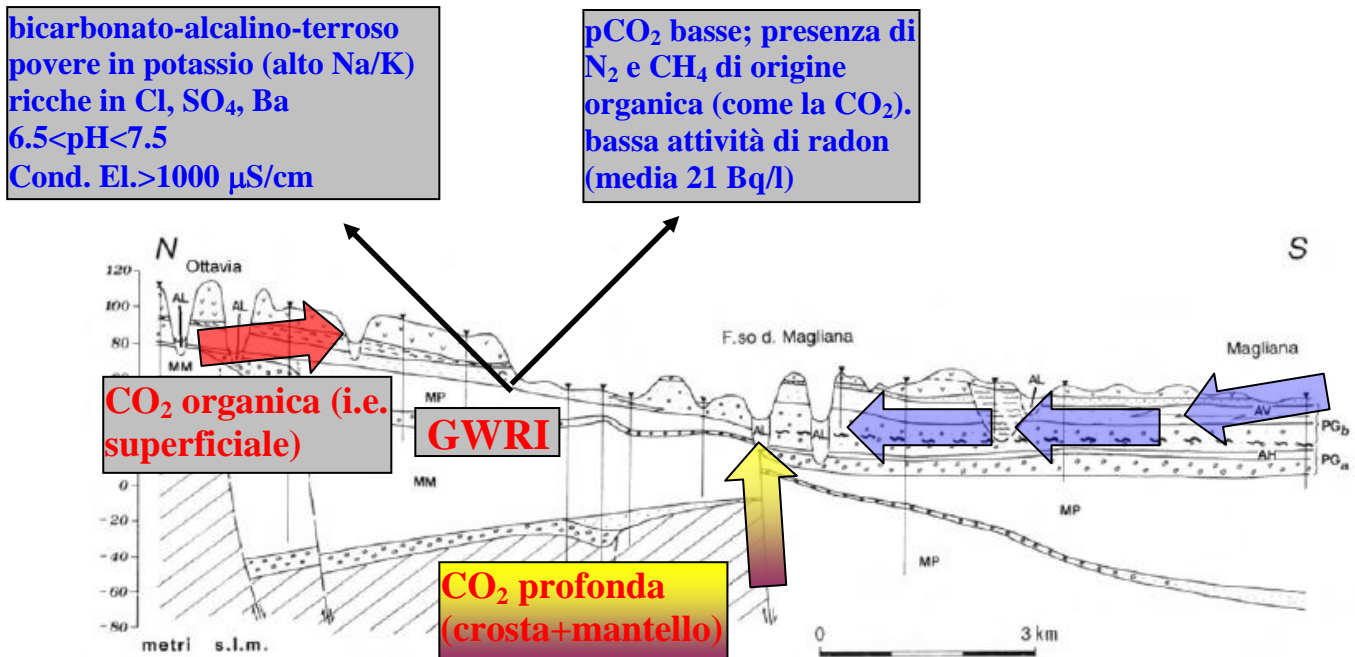


Figura 5.41. Modello concettuale di circolazione delle acque di sottosuolo nel dominio sedimentario (esempio Roma ovest). Legenda: PGa e PGb) Formazione di Ponte Galeria (PGa conglomerati, PGb sabbie); AH, AV) sabbie; MM) Formazione di Monte Mario; MP) Formazione di Monte delle Piche; MVA) Formazione di Monte Vaticano. (Capelli et al., 2008).

Le acque di sottosuolo appartenenti al dominio sedimentario circolano essenzialmente nelle sabbie e nei conglomerati dell'Unità idrogeologica di Ponte Galeria, largamente affiorante in riva destra del Tevere. Le acque meteoriche si infiltrano nel terreno e interagiscono con le litologie sopra riportate, disciogliendo una componente gassosa dominata da CO₂, prevalentemente di origine organica, e N₂; localmente, le acque si arricchiscono in metano (anch'esso di origine organica). Il chimismo finale delle acque è principalmente bicarbonato alcalino-terroso, con Ca e HCO₃, rispettivamente, catione e anione dominanti. Le acque presentano elevate concentrazioni di cloro (media 55 mg/l), solfato (media 56 mg/l) e alti valori Na/K per l'alto contenuto in sodio (media 62 mg/l). Quanto osservato è dovuto alla dissoluzione di minerali altamente solubili (solfati e cloruri) contenuti nelle sabbie e nei conglomerati (GWRI, *Gas-Water-Rock-Interaction*); stante la presenza di nitrati (media 19 mg/l, con valori massimi ben oltre 50 mg/l), una parziale origine antropica (i.e. attività agricola con uso di concimi e fertilizzanti industriali, anticrittogamici e insetticidi a base di prodotti chimici) di cloro e solfato nelle acque analizzate, non può essere scartata. Stessa origine potrebbe essere ricercata per il contenuto in bario che caratterizza queste acque (media 158 µg/l); i sali di bario sono mediamente

poco solubili, con l'eccezione del cloruro di bario che è impiegato in agricoltura come anticrittogamico e insetticida. L'elevata solubilità dei minerali lisciviati causa, nonostante un ambiente neutro o alcalino e basse pCO_2 , un alto contenuto di ioni in soluzione e, di conseguenza, un contenuto salino importante, fino a 3000 $\mu S/cm$. Stante il loro generale scarso contenuto in radio, le acque di sottosuolo del dominio sedimentario presentano una bassa attività del radon, con una media di 21 Bq/l.

Localmente (nell'esempio è riportato il settore Torino-Magliana, Roma sud-ovest), le acque del dominio sedimentario disciolgono una componente gassosa profonda (a CO_2 dominante) che risale lungo le più importanti faglie dell'area urbana di Roma (in questo caso la Faglia della Magliana, Foglio CARG Roma 1:50000).

TOR DI QUINTO (ROMA NORD)

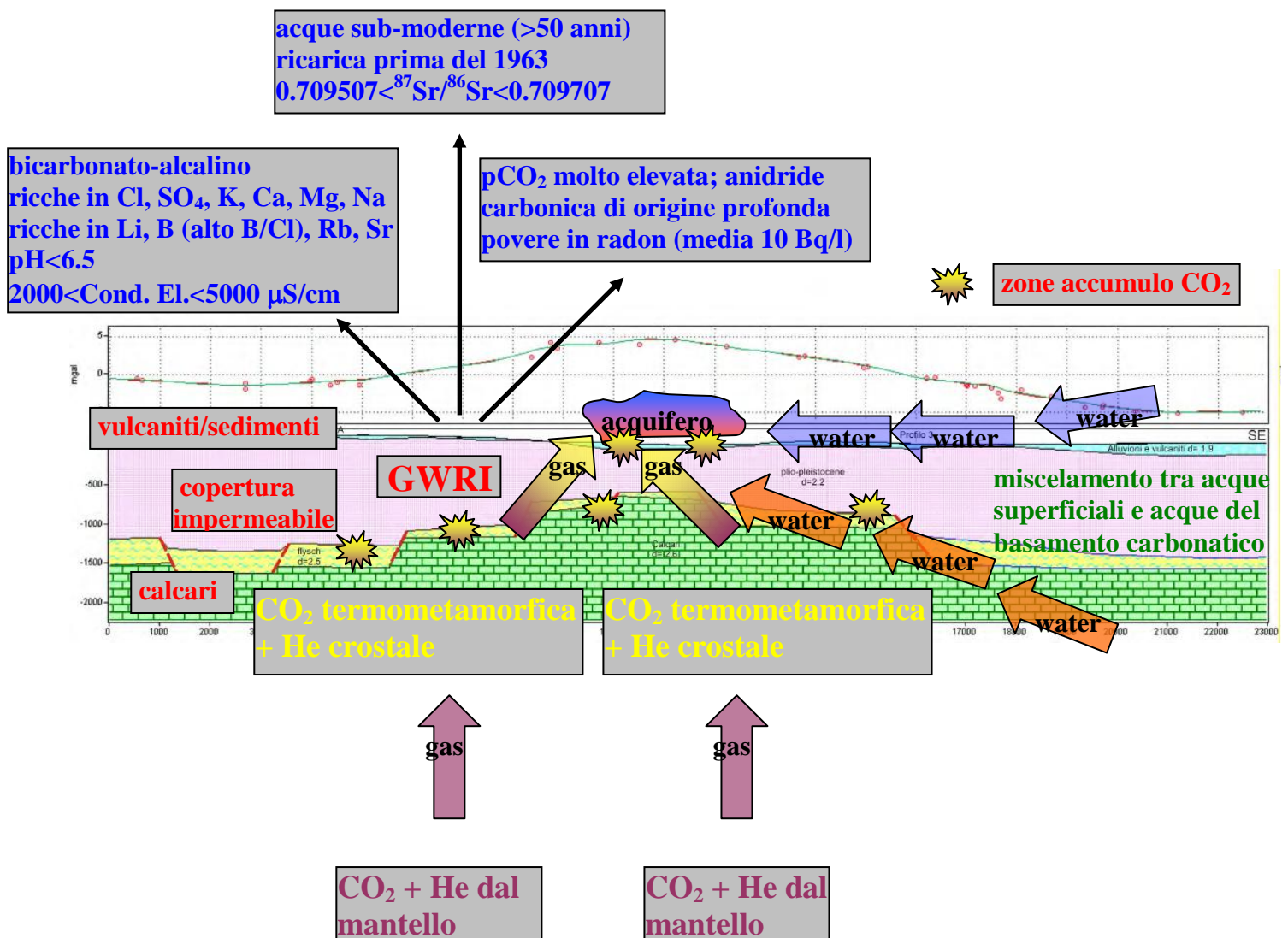


Figura 5.42. Modello concettuale di circolazione delle acque di sottosuolo nell'area di Tor di Quinto (Roma nord). (Cesi et al., 2008).

Le acque che circolano nell'area di Tor di Quinto presentano alta salinità, fino a 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, elevata PCO_2 ($\text{pH} < 6.5$) e un chimismo da bicarbonato-alcalino-terroso (per i campioni meno salini) a bicarbonato-alcalino per quelli più salini, con evidenti e anomali arricchimenti soprattutto in potassio, tra gli elementi maggiori, litio, boro, rubidio e stronzio tra i minori e le tracce. Per queste acque, che non contengono trizio e possono essere definite come sub-moderne, si possono ipotizzare miscelamenti e contributi con/da acque saline e termali più profonde (i.e. brine ricche in CO_2) come quelle che, a una decina di chilometri a nord di Tor di Quinto sono state incontrate, a profondità tra i 2000 e i 3000 metri (nel basamento carbonatico), da pozzi per la ricerca geotermica. Il particolare assetto geologico di Tor di Quinto (alto strutturale del basamento carbonatico) potrebbe favorire l'esistenza di un sistema geotermico profondo con acque molto saline, come ipotizzato in altri settori dell'Italia centrale, supportando fortemente quanto asserito nel presente studio. Ulteriori indizi sul probabile miscelamento delle acque di Tor di Quinto con acque saline profonde del carbonatico derivano: *i*) dal rapporto isotopico dello stronzio tendente a quello dei calcari mesozoici e *ii*) dal loro arricchimento in boro; in particolare esse hanno un alto rapporto B/Cl, e tendono verso la composizione dei più importanti sistemi geotermici dell'Italia centrale ospitati nel basamento carbonatico.

Nell'area di Tor di Quinto si ha la risalita di CO_2 ($-7 < \delta^{13}\text{C} < -4$) ed elio (arricchito in ^3He) originati nel mantello, che diffondono nel basamento carbonatico, miscelandosi, rispettivamente, con CO_2 derivata dal termo-metamorfismo dei calcari profondi ($-2 < \delta^{13}\text{C} < +3$) ed elio radiogenico (arricchito in ^4He). Tale miscela di gas di differenti origini si può accumulare al *top* del basamento carbonatico (che funge da enorme serbatoio per la CO_2), sotto la copertura impermeabile, formando gas *pockets*. La CO_2 , attraverso le faglie bordiere dell'alto strutturale e il sistema di fratture presente sia nei calcari che nelle litologie impermeabili, risale verso la superficie con processi di *macroseepage* (Brown, 2000) andando a disciogliersi negli acquiferi superficiali contenuti nelle vulcaniti o nelle serie sedimentarie.

5.10 Prime valutazioni sul Natural Gas Hazard nell'area urbana di Roma

Le aree caratterizzate dalla circolazione di acque ricche in CO_2 (Cassia a NW; una lunga fascia che va dal Flaminio alla Salaria, passando per Tor di Quinto e Saxa Rubra, a N; lungo il corso del fiume Aniene (Montesacro); centro storico (via del Corso); Torrino-Laurentino a SW e Appio-Capannelle-Tuscolano a SE e quelle le cui acque presentano un'elevata attività di radon (Ardeatino-Laurentino, Appio, Tuscolano, Capannelle, Centocelle, Colli Aniene), sono da considerarsi come potenzialmente esposte al *Gas Hazard*. In queste aree andrebbero effettuati studi approfonditi da

parte delle autorità competenti, coadiuvati da esperti del settore, per quantificare il loro livello di esposizione a questo fenomeno, peraltro già noto e studiato nella Provincia Comagmatica Romana, dal Monte Amiata a Roccamonfina, passando per i Sabatini e i Colli Albani. Questi studi dovrebbero prevedere: *i*) una dettagliata indagine sulla distribuzione di CO₂ e radon nei suoli, in modo da conoscere la percentuale di questi gas che, dal luogo di produzione, riesce a risalire fino alla superficie andando a permeare i suoli, interessando le abitazioni esistenti e *ii*) indagini areali di *screening* all'interno delle abitazioni stesse per fornire una prima caratterizzazione quantitativa, rispettivamente, del livello e dell'esposizione *indoor* di CO₂ e radon, da valutare tenendo presente le normative esistenti in materia. Nei settori in cui le analisi di *screening* dovessero rilevare valori particolarmente elevati, si dovrebbe procedere con analisi di dettaglio, prevedendo anche misure prolungate nel tempo per comprendere in maniera opportuna le eventuali variazioni stagionali dei parametri considerati.

Si segnala la possibilità che nelle aree caratterizzate da risalite di CO₂ profonda, si possano verificare fuoriuscite incontrollate di anidride carbonica (a volte anche metano) a causa di trivellazione di pozzi, sondaggi o scavi di varia natura, con criticità e situazioni potenzialmente pericolose per la salute umana a carico della popolazione locale. Tali fenomeni sono già avvenuti in passato sia nell'area romana (Novarese, 1926, Carapezza et al., 2012) sia in settori adiacenti: Colli Albani (Pizzino et al., 2002; Carapezza & Tarchini, 2007; Mariucci et al., 2008; Carapezza et al., 2012) e Fiumicino (Barberi et al., 2007; Ciotoli et al., 2013; Sella et al., 2014). In particolare, la popolazione residente e gli enti/ditte/società operanti nelle aree potenzialmente esposte a emissioni gassose, a volte anche innescate da attività antropiche, dovrebbero essere informate su questa evenienza tramite seminari pubblici, opuscoli e volantini, contenenti anche le misure e le precauzioni da adottare per affrontare eventuali situazioni di pericolo. Tale attività di informazione andrebbe effettuata seguendo, ad esempio, quanto già fatto in passato dal DPC e dall'INGV presso la popolazione locale e le scuole medie, elementari e superiori dei comuni di Ciampino e Marino (Carapezza et al., 2000; Pizzino, 2004c; Pizzino & Galli, 2011).

I dati prodotti nel presente lavoro possono essere considerati la base di partenza per una corretta pianificazione e tutela del territorio urbano di Roma da parte delle autorità locali competenti, quanto mai necessaria in un'area abitata stabilmente da circa 2.500.000 persone, interessata in alcuni suoi settori da risalite di fluidi profondi (CO₂) e produzione superficiale di radioattività (radon) dalle rocce, alle volte potenzialmente nocivi per la salute umana.

6. Conclusioni

È stato effettuato uno studio dettagliato, unico nel suo genere in un'area urbana e assolutamente inedito per il settore investigato, delle caratteristiche chimico-fisiche, chimiche e isotopiche delle acque di sottosuolo circolanti nell'area urbana di Roma. Sono stati analizzati 192 siti (175 pozzi d'acqua e 17 sorgenti naturali) in un'area di 621 km² delimitata dal Grande Raccordo Anulare.

In particolare, il lavoro svolto ha riguardato una lunga e difficoltosa attività di reperimento siti tramite indagini sul territorio, contatti con privati cittadini ed enti pubblici e privati; tutte queste attività hanno avuto la finalità di ottenere i permessi per il prelievo delle acque per le analisi di campagna e la raccolta dei campioni per le successive analisi di laboratorio.

I risultati ottenuti fanno riferimento ai seguenti obiettivi principali oggetto della presente ricerca: *i*) definizione delle *facies* idrochimiche e dei processi di interazione acqua-roccia anche tramite metodologie isotopiche; *ii*) distribuzione della CO₂ (e definizione della sua origine tramite gli isotopi del carbonio) e del radon nelle acque di sottosuolo e individuazione delle aree caratterizzate da degassamento diffuso. La distribuzione di CO₂ e radon è stata inoltre confrontata con le strutture geologiche profonde e le litologie superficiali dell'area romana; *iii*) prima valutazione del livello del *Natural Gas Hazard* cui le aree degassanti sono esposte.

I principali risultati raggiunti sono di seguito elencati e commentati:

- Tramite l'analisi fattoriale sono stati individuati tre gruppi principali cui sono state associate le acque di sottosuolo per la successiva interpretazione del chimismo e per la definizione dei principali processi di interazione acqua-roccia tramite diagrammi quadrati, binari e ternari: *i*) dominio vulcanico (prodotti albanici e sabatini); *ii*) dominio sedimentario (pre e post-vulcanico) come alluvioni, ghiaie, sabbie e argille e *iii*) Tor di Quinto.

I risultati ottenuti hanno confermato la bontà della trattazione effettuata, mostrando una netta differenziazione nella composizione chimica e isotopica tra questi tre gruppi di acque; in particolare, sono state riconosciute 2 principali *facies* idrochimiche:

- Bicarbonato-alcantino terrosa (Ca e HCO₃ come ioni dominanti) che include la maggior parte delle acque campionate, con una profonda differenziazione tra le acque del vulcanico e quelle del sedimentario. Le acque del dominio sedimentario, infatti, presentano, rispetto a quelle del vulcanico, un rapporto (Ca + Mg)/ (Na + K) generalmente più elevato, e un contenuto in HCO₃ (i.e. alcalinità) decisamente più basso, a fronte di contenuti maggiori di Cl e SO₄. In linea generale, si può affermare che queste differenze sono da attribuirsi ai differenti processi di interazione gas-acqua-roccia che avvengono nell'area romana quali dissoluzione dei metalli

alcalini, K in particolare, costituenti i minerali delle rocce vulcaniche, e dissoluzione di grandi quantità di CO₂ negli acquiferi vulcanici (soprattutto ubicati a Roma sud) per gli acquiferi nel vulcanico e interazioni con argille, marne, sabbie e conglomerati, e conseguente arricchimento preferenziale in Na, Cl e SO₄, per gli acquiferi del sedimentario. I processi di interazione gas-acqua-roccia ora citati possono avere, all'interno dei due principali gruppi considerati, diverse estensioni, durate e gradi di intensità, giustificando il differente contenuto dei vari elementi chimici nelle acque a composizione bicarbonato-alcalino-terrosa;

➤ Bicarbonato-alcalino (Na e HCO₃ come ioni dominanti), che rappresentano la naturale evoluzione delle acque circolanti soprattutto nel dominio vulcanico con chimismo bicarbonato-alcalino-terroso. Infatti, l'alto grado di interazione acqua-roccia, in presenza di un elevato flusso di CO₂, rende l'acqua più aggressiva nei confronti dei minerali costituenti le rocce presenti, portandone in soluzione i principali costituenti. Le acque del sedimentario con questo chimismo, sia ricche in CO₂ che non, hanno subito probabilmente processi di scambio ionico con le argille con le quali interagiscono nel loro percorso sotterraneo;

➤ Le acque di Tor di Quinto presentano alta salinità, elevata PCO₂ e un chimismo da bicarbonato-alcalino-terroso (per i campioni meno salini) a bicarbonato-alcalino per quelli più salini, con evidenti e anomali arricchimenti in potassio, tra gli elementi maggiori, litio, boro, rubidio e stronzio tra i minori e le tracce. Per queste acque si possono ipotizzare contributi da acque saline più profonde (i.e. brine ricche in CO₂) come quelle che, a una decina di chilometri a nord di Tor di Quinto sono state incontrate, a profondità tra i 2000 e i 3000 metri (nel basamento carbonatico), da pozzi per la ricerca geotermica. Il particolare assetto geologico di Tor di Quinto (alto strutturale del basamento carbonatico, che si trova a meno di 1000 metri dal piano campagna) potrebbe favorire l'esistenza di un sistema geotermico profondo con acque molto saline, come ipotizzato in altri settori dell'Italia centrale, supportando fortemente quanto asserito nel presente studio. Un'ulteriore indizio sul probabile miscelamento delle acque di Tor di Quinto con acque saline profonde deriva dal loro arricchimento in boro; in particolare esse hanno un alto rapporto B/Cl, e tendono verso la composizione dei più importanti sistemi geotermici dell'Italia centrale ospitati nel basamento carbonatico;

▪ I processi di interazione acqua-roccia sono stati investigati tramite diagrammi binari e ternari in cui sono stati messi a confronto i parametri chimico-fisici e chimici più significativi e più rappresentativi delle diverse *facies* idrochimiche riconosciute. I campioni del dominio vulcanico e del dominio sedimentario si differenziano profondamente per quanto riguarda il rapporto Na/K: i primi presentano un rapporto Na/K che tende a quello caratteristico dei prodotti vulcanici sia dei sabatini sia degli albanesi, mentre il secondo presenta un rapporto Na/K

decisamente. L'andamento osservato è molto importante in quanto conferma: *i*) in maniera inequivocabile la bontà della trattazione statistica applicata alle acque di sottosuolo e *ii*) la peculiarità delle acque dell'area romana, in cui il K assume una importanza rilevante in qualità di rappresentante dei processi di interazione acqua-roccia, almeno per le acque ricche in CO₂ appartenenti al dominio vulcanico.

A conferma di ciò sono stati messi a confronto i parametri quali salinità, tra i chimico-fisici, potassio, sodio, cloro e solfato tra gli elementi maggiori e bario, rubidio e stronzio, quali rappresentanti degli elementi in traccia, con il log PCO₂. La CO₂ disciolta nelle acque di sottosuolo circolanti in alcuni settori dell'area urbana di Roma ricopre, infatti, un ruolo importante nel definire il grado di interazione acqua-roccia modulando, in maniera proporzionale al suo contenuto (e.g. creando un ambiente acido), il trasferimento dei vari elementi chimici dai minerali costituenti la roccia alle acque con cui entrano in contatto, definendo, al contempo, le *facies* idrochimiche osservate. Di conseguenza, risulta evidente, almeno per il dominio vulcanico, la correlazione positiva tra alcuni dei parametri su indicati (salinità, potassio, bario, rubidio e stronzio) e la PCO₂, a conferma di quanto esposto in precedenza in sede di classificazione geochimica delle acque. Al contrario, tale correlazione risulta più evidente per le acque del dominio sedimentario tra PCO₂ e sodio, cloro e solfato, minimizzando quella con il potassio anche per quelle più ricche in CO₂, in quanto questo elemento non risulta un elemento discriminante nei processi che guidano il loro chimismo finale.

- Gli isotopi stabili di Sr e H (trizio), misurati in campioni selezionati rappresentativi delle circolazioni del dominio vulcanico e di Tor di Quinto, si sono dimostrati un ottimo supporto, rispettivamente, nell'interpretazione dei rapporti acqua-roccia e della circolazione delle acque. Sono stati riconosciuti due gruppi di acque: *i*) il primo formato dai campioni ubicati nel settore meridionale della capitale (Ardeatino, Appio, Capannelle), con valori isotopici di stronzio nel *range* delle vulcaniti albane confermando quanto ipotizzato analizzando le caratteristiche chimiche di queste acque, e cioè che esse appartengono alla circolazione di base delle vulcaniti albane, con cui scambiano diversi elementi chimici, tra cui lo stronzio, riflettendone la loro composizione isotopica; *ii*) il secondo, formato dalle acque di Tor di Quinto e da campioni ubicati in settori adiacenti (Montesacro, Saxa Rubra e Salaria), mostra un rapporto isotopico dello stronzio nettamente inferiore rispetto al precedente, facendo ipotizzare che esse risentano del miscelamento con acque provenienti dal basamento carbonatico profondo, abbassando il loro rapporto isotopico ai livelli misurati. Un aiuto alla comprensione della circolazione delle acque di sottosuolo è stata fornita dal loro contenuto in trizio, tramite il quale si possono distinguere tra acque vecchie o sub-moderne quelle dove i valori del trizio sono minori di 0.6 UT ed acque

recenti o moderne quelle con valori più elevati. Le acque sono chiaramente divise in due gruppi: uno caratterizzato da una conduttanza elettrica compresa tra 900 e 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e contenuto in trizio tra 1.3 e 2.7 U.T., e un altro caratterizzato da conduttanza variabile tra 1500 e 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e contenuto in trizio compreso tra 0 e 0.3 U.T.. Il primo gruppo di acque è rappresentato prevalentemente da quelle ricche in CO_2 del dominio vulcanico di Roma sud (circolazione idrica alla base delle vulcaniti), caratterizzate da una circolazione “giovane”, essendosi infiltrate dopo il 1963; in particolare, la maggior parte di esse è molto vicina al valore misurato nella pioggia attuale. L'altro gruppo di acque è formato prevalentemente dalle acque di Tor di Quinto, che mostrano un contenuto nullo in trizio; queste acque si possono definire vecchie o sub-moderne, ricaricate prima del 1963, confermando ulteriormente l'ipotesi di possibili miscelamenti con acque “vecchie” del substrato carbonatico. Alla luce dei risultati ottenuti, l'analisi del contenuto in trizio, quindi, si è dimostrato un valido supporto per definire qualitativamente l'età di alcune acque presenti nell'area investigata, confermando quanto era stato ipotizzato solo con l'analisi del chimismo (elementi maggiori, minori e in traccia), degli isotopi stabili dello stronzio e dei parametri chimico-fisici;

- È stata effettuata un'analisi approfondita della distribuzione geografica della CO_2 nelle acque di sottosuolo, rappresentata dal logaritmo della sua pressione parziale. Tale distribuzione evidenzia dei settori in cui circolano acque maggiormente ricche in CO_2 . Esse sono: *i*) Cassia a NW; *ii*) una lunga fascia che va dal Flaminio alla Salaria passando per lo stadio Olimpico, Tor di Quinto e la via Flaminia (Saxa Rubra), a N; *iii*) lungo il corso del fiume Aniene (Montesacro); *iv*) centro storico (via del Corso); *v*) Torrino-Laurentino a SW e *vi*) Appio-Capannelle-Tuscolano a SE. Data la loro estensione, le aree Appio-Capannelle-Tuscolano e Flaminio-Tor di Quinto-Salaria possono essere considerate come vere e proprie DDS (*Diffuse Degassing Structure*) all'interno dell'area urbana della capitale. Le acque ricche in CO_2 circolano in corrispondenza di particolari strutture geologiche profonde chiamate “alti strutturali” del basamento carbonatico in cui il gas si accumula e risale lungo le faglie che li bordano. L'anidride carbonica, quindi, si conferma un *marker* strutturale importante nell'area romana, come già riconosciuto sia nei Colli Albani che nei Sabatini;

- L'analisi isotopica del carbonio totale disciolto è stata effettuata per discriminare le differenti sorgenti del carbonio presenti nelle acque di sottosuolo. Nell'area romana le acque presentano una grande variabilità nei valori isotopici misurati, compresi tra -23.30‰ e 10.25‰. La distribuzione osservata fa supporre, in prima approssimazione, diverse sorgenti di provenienza della CO_2 e differenti processi di frazionamento isotopico a carico del carbonio. Sono state identificate le aree in cui circolano acque che disciolgono carbonio “pesante” di origine profonda.

Si può notare una buona sovrapposizione con le aree (riportate nel punto precedente) le cui acque sono ricche in CO₂, a conferma che quelle caratterizzate da elevati valori di log PCO₂ disciolgono carbonio originato ad alta temperatura (processi di decarbonatazione, mantello), mentre quelle con bassi valori di log PCO₂ disciolgono prevalentemente carbonio organico di origine superficiale.

I campioni del dominio sedimentario e del vulcanico, tranne rari casi, hanno, rispettivamente, un $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ medio tra -15 e -10‰, giustificabile con un miscelamento tra CO₂ di origine organica (biogenica-microbica) prodotta nel suolo e quella dovuta all'attacco dei carbonati dispersi in falda, e un $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ mediamente più elevato, dovuto a dissoluzione di anidride carbonica di origine profonda. Le acque di Tor di Quinto hanno una caratterizzazione isotopica del carbonio che lascia ipotizzare senza alcun dubbio apporti di CO₂ profonda. Da notare che le acque che presentano valori più positivi del $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ ricadono nell'intervallo isotopico della CO₂ emessa dalle principali manifestazioni naturali sia dei Colli Albani che dei Sabatini facendo ipotizzare una sua comune origine (di alta temperatura, mantellica e/o crostale);

- L'analisi isotopica dell'elio, effettuata su 13 acque di sottosuolo rappresentative delle circolazioni profonde nell'area urbana di Roma, mostra una composizione gassosa simile all'ASW, con alcune di esse tendenti verso il vertice dell'elio, definito in prima approssimazione come crostale. Questi campioni sono ubicati nel settore meridionale (Capannelle) e centro settentrionale (Saxa Rubra e Tor di Quinto) di Roma, che erano già stati riconosciuti come sede di acque ricche in CO₂ profonda. Le acque che disciolgono una componente profonda (quelle con un alto He/Ne), si allontanano dall'ASW e si dispongono in un campo indicante un *mixing* tra la sorgente tipica del mantello (indipendentemente se si considera quello sub-continentale europeo o quello locale contaminato da contributi crostali, entrambi arricchiti in ³He) e quella crostale (arricchita in ⁴He). I campioni in questione sono tutte acque che circolano in aree riconosciute come caratterizzate da risalite di CO₂ profonda e che disciolgono anche elio di provenienza profonda (R/Ra compreso tra 0.42 e 1.11), molto simili ai valori delle manifestazioni gassose dei Sabatini e dei Colli Albani (R/Ra compreso tra 0.18 e 1.38), confermando che i processi profondi che modulano il degassamento "locale" nelle acque di Roma sono comuni a un più ampio settore dell'Italia centrale, e possono essere considerati, quindi, a livello "regionale"; nel settore tirrenico centrale, infatti, sono stati riconosciuti, nei fluidi circolanti, evidenti contributi dal mantello.

Le percentuali di elio originato nel mantello, considerando il valore di 2.0Ra come riferimento per il mantello sottostante l'area del Lazio centro-settentrionale (valore massimo di ³He/⁴He nelle inclusioni fluide dei prodotti vulcanici Albani e Sabatini), di 0.02Ra per la crosta e

$1R_a$ per l'atmosfera, variano tra il 17 e il 36% per l'area di Tor di Quinto-Stadio Olimpico, sono pari al 41% per il campione di Montesacro, al 48% per il campione di Saxa Rubra e, per finire, al 50% per il campione di Capannelle. Da notare che quest'ultimo campione, che mostra il valore più elevato tra quelli ottenuti, è situato nei pressi dell'alto strutturale di Ciampino dove, presso la manifestazione gassosa di Cava dei Selci ($R_c/R_a = 1.40$), è stato calcolato un contributo del mantello pari al 68%, il più alto di tutta l'area dei Colli Albani. Le percentuali di elio mantellico che si disciolgono negli acquiferi di alcuni settori dell'area urbana di Roma raggiungono valori davvero degni di nota, comparabili con le acque che circolano nell'area a maggior degassamento dei Colli Albani (e.g. alto strutturale di Ciampino) e notevolmente superiori a quelle circolanti nei Sabatini. Quanto osservato è un segnale inequivocabile che le strutture geologiche profonde dell'area romana, che favoriscono la risalita del gas dal luogo di produzione (mantello e crosta), degassano attivamente e hanno carattere litosferico;

- La distribuzione di frequenza dell'attività del gas radon nelle acque di sottosuolo di Roma mostra una profonda differenza tra le acque del sedimentario e quelle del vulcanico. Infatti, le prime mostrano un'attività del radon generalmente più bassa (media = 21 Bq/l) rispetto alle seconde, che mostrano valori generalmente maggiori di radon (media = 63 Bq/l). Le acque di Tor di Quinto possono essere sommate al contributo del dominio sedimentario in quanto gli acquiferi che le alimentano sono ospitate in questo tipo di litologia e, di conseguenza, presentano bassi valori radon (media = 10 Bq/l). Quanto osservato probabilmente dipende dal diverso contenuto degli elementi precursori del radon (i.e. U, Ra), elevato nelle vulcaniti albane e sabatine e notevolmente inferiore nei termini sedimentari pre-vulcanici dell'area romana. In ogni caso, l'aspetto più importante che può essere evidenziato è che nell'area romana, come atteso considerando il *background* regionale, circolano numerose acque ricche in radon, con valori misurati fino a 280 Bq/l (zona sud-est di Roma). La distribuzione del radon disciolto nelle acque di sottosuolo di Roma evidenzia una vasta area ad alta attività che interessa il settore meridionale (Ardeatino-Laurentino) e sud-orientale di Roma (Appio, Tuscolano, Capannelle), inglobando anche parte di quella orientale (Centocelle, Colli Aniene). Aree con acque di sottosuolo ricche in radon, a carattere più isolato, sono ubicate nel settore sud-occidentale (EUR-Torrino), centrale e settentrionale (Salaria) della capitale. Da notare che tutto il settore ovest e parte di quello nord-est presenta attività di radon molto basse (< 30 Bq/l). La forte correlazione tra tipo di substrato (vulcanico o sedimentario) e attività di radon nelle acque di sottosuolo è chiaramente evidenziata confrontando l'ubicazione dei siti di misura con le unità idro-geologiche dell'area investigata. Si nota una netta differenza tra l'attività di radon, chiaramente più elevata nelle acque circolanti in riva sinistra del Fiume Tevere, rispetto a quelle circolanti in riva destra. Nel settore in riva

sinistra del Fiume Tevere affiorano prevalentemente i termini vulcanici dei Colli Albani che, come già riportato, sono ricchi in elementi precursori del radon come uranio e radio. Uno studio recente ha determinato in 94 Bq/l il valore dell'attività del radon contenuto in un'acqua di sottosuolo in equilibrio con le pozzolane rosse; ricordiamo che le pozzolane rappresentano, grazie al loro spessore alla estesa continuità laterale che distingue questa formazione, l'acquifero più importante, dal punto di vista volumetrico, della città di Roma, in particolare nell'area in riva sinistra del Tevere (Roma sud e sud-est). Nel settore in riva destra del Fiume Tevere affiorano i termini vulcanici dei Sabatini, che hanno caratteristiche chimiche molto simili ai prodotti degli albanici ma il loro spessore è notevolmente ridotto e, di conseguenza, gli acquiferi intercettati dai pozzi sono essenzialmente contenuti nei complessi idrogeologici sedimentari pre-vulcanici del settore occidentale di Roma (Monte Mario, Ponte Galeria). L'attività del radio in questi termini sedimentari è di gran lunga inferiore rispetto a quelli vulcanici; questa caratteristica si riflette nell'attività del radon nelle acque di sottosuolo in riva destra del Tevere, che mostrano valori contenuti, compresi tra 1 e 31 Bq/l.

Si evince chiaramente come l'attività del radon nelle acque di sottosuolo della città di Roma sia strettamente correlata con la litologia che ospita gli acquiferi, che modula la distribuzione finale osservata. Localmente, le variazioni dei parametri geochimici reologici e idrologici riferite ai vari complessi litologici e la presenza di faglie o sistemi di faglia possono far variare l'attività del radon disciolto, causando o arricchimenti o impoverimenti rispetto ai valori di *background*. Inoltre, fenomeni di arricchimento in radon nelle acque circolanti, rispetto ai valori teorici (i.e. in equilibrio con le rocce) calcolati, devono essere presi in considerazione per quelle acque circolanti nel settore sud-orientale di Roma che presentano valori ben al di sopra di 94 Bq/l. Per tali acque sono possibili processi di trasporto del radon da parte della CO₂ (che funge da *carrier gas*), presente in elevate concentrazioni in questo settore della capitale.

- Nelle aree caratterizzate da degassamento diffuso andrebbero effettuati studi approfonditi da per quantificare il loro livello di esposizione al *Natural Gas Hazard*. Questi studi dovrebbero prevedere: *i*) una dettagliata indagine sulla distribuzione di CO₂ e radon nei suoli, in modo da conoscere la percentuale di questi gas che, dal luogo di produzione, riesce a risalire fino alla superficie andando a permeare il suolo, interessando le abitazioni esistenti e *ii*) indagini areali di *screening* all'interno delle abitazioni stesse per fornire una prima caratterizzazione quantitativa, rispettivamente, del livello e dell'esposizione *indoor* di CO₂ e radon, da valutare tenendo presente le normative esistenti in materia. Nei settori in cui le analisi di *screening* dovessero rilevare valori particolarmente elevati, si dovrebbe procedere con analisi di dettaglio, prevedendo anche misure prolungate nel tempo per

comprendere in maniera opportuna le eventuali variazioni stagionali dei parametri considerati.

Un'altra fonte di *hazard* nell'area romana è costituita da fuoriuscite incontrollate di anidride carbonica (a volte anche metano) che si possono verificare a causa di trivellazioni di pozzi, sondaggi o scavi di varia natura, con criticità e situazioni potenzialmente pericolose per la salute umana a carico della popolazione locale. Nelle aree caratterizzate da risalite di CO₂ profonda tali fenomeni sono già avvenuti in passato, e la popolazione residente coloro che operano nelle aree potenzialmente esposte a emissioni gassose dovrebbero essere informate su questa evenienza tramite seminari pubblici, opuscoli e volantini, contenenti anche le misure e le precauzioni da adottare per affrontare eventuali situazioni di pericolo.

I dati prodotti nel presente potrebbero costituire la base di partenza per una corretta pianificazione e tutela del territorio urbano di Roma da parte delle autorità locali competenti, quanto mai necessaria in un'area abitata stabilmente da circa 2.500.000 persone, interessata in alcuni suoi settori da risalite di fluidi profondi (CO₂) e produzione superficiale di radioattività (radon) dalle rocce, alle volte potenzialmente nocivi per la salute umana.

Bibliografia

- Acocella V & Funiciello R., 2006. Transverse systems along the extensional Tyrrhenian margin of central Italy and their influence on volcanism, *Tectonics*, 25, TC 2003.
- Amato, A., C. Chiarabba, M., Cocco, M. Di Bona and G. Selvaggi 1994. The 1989-1990 seismic swarm in the Alban Hills volcanic area, central Italy, *J.Volc.Geoth.Res.*, 61, 225-237.
- Amato, A. & Chiarabba, C., 1995. Recent uplift of the Alban Hills Volcano (Italy): evidence for magmatic inflation? *Geophys. Res. Lett.* 22, 1985-1988.
- Annunziatellis A., Ciotoli G., Lombardi S., Nolasco F., 2003. Short and long term gas hazard: the release of toxic gases in the Alban Hills volcanic area (central Italy). *J. Geochem. Explor.* 77, 93–108.
- Annunziatellis A., Beaubien S.E., Bigi S., Ciotoli G., Coltella M., Lombardi S., 2008. Gas migration along fault systems and through the vadose zone in the Latera caldera (central Italy): Implications for CO₂ geological storage. *Int J Greenhousegas Control* 2, 353–372.
- Appelo C. A. J. & Postma D. (1996). *Geochemistry, Groundwaters and Pollution*. A.A. Balkema., Rotterdam, 536 p.
- Ballentine C.J., B. Marty and R Burgess, Tracing fluid origin, transport and interaction in the crust. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 47 (2002) 539-614
- Barberi F., Carapezza M.L., Ranaldi M., Tarchini L., 2007. Gas blowout from shallow boreholes at Fiumicino (Rome): induced hazard and evidence of deep CO₂ degassing on the Tyrrhenian margin of Central Italy. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 165, 17-31.
- Barberi F., Carapezza M.L., Giordano G., Pensa A., Ranaldi M., 2008. L'acquifero nelle ghiaie di base del Tevere: una risorsa geotermica per la città di Roma. In: Funiciello R., Praturlon A., & Giordano G. (ed.) "La Geologia di Roma", *Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia*, LXXX, 407-420.
- Barbieri M., Sappa G., 1999. Primi risultati dell'applicazione di tecniche di analisi isotopica per la determinazione di di alcuni caratteri litologici peculiari del sistema idrogeologico dei Colli Albani. V convegno nazionale dei giovani ricercatori in *Geologia Applicata*, 7 pp.
- Beaubien, S. E., G. Ciotoli, and S. Lombardi 2003. Carbon dioxide and radon gas hazard at the Alban Hill Area (central Italy), *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 123, 63– 80.
- Bersani P., Nisio S., Pizzino L., 2013. Acque Mineralizzate, Emissioni Gassose E Sismicità Nell'area Compresa Tra Roma E Il Litorale:Dati Storici E Nuovi Contributi. *Mem. Descr. Carta Geol. D'it*, Xciii, 409-438.
- Bigi S., Beaubien S.E., Ciotoli G., D'Ambrogio C., Doglioni C., Ferrante V., Lombardi S., Milli S., Orlando L., Ruggiero L., Tartarello M.C., Sacco P., 2014. Mantle-derived Co₂ migration along faults within an

extensional basin margin (Fiumicino, Rome, Italy). *Tectonophysics*.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2014.10.001>.

- Boeri E., Avanzinelli R., Melluso L., Giordano G., Mattei M., De Benedetti Arnaldo A., Morra V., Conticelli S., 2009. Isotope geochemistry (Sr–Nd–Pb) and petrogenesis of leucite-bearing volcanic rocks from “Colli Albani” volcano, Roman Magmatic Province, Central Italy: inferences on volcano evolution and magma genesis. *Bull Volcanol* (2009) 71:977–1005.
- Bozzano, F., Gaeta, M., Marcoccia, S., 2006. Weathering of Valle Ricca stiff and jointed clay. *Engineering Geology* 84, 161–182.
- Brown A., 2000. Evaluation of possible gas micro-seepage mechanism. *AAPG Bull.*, 184 (11), 1775-1789.
- Camponeschi B. & Nolasco F., 1982. Le risorse naturali della Regione Lazio, volume 7: Roma e i Colli Albani, 547 pp.
- Capaccioni, B., Cinelli, G., Mostacci, D., & Tositti, L., 2012. Long-term risk in a recently active volcanic system: Evaluation of doses and indoor radiological risk in the quaternary Vulsini Volcanic District (Central Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 247–248, 26–36. doi:10.1016/j.jvolgeores.2012.07.014.
- Capasso G., Inguaggiato S., 1998. A simple method for the determination of dissolved gases in natural water: an application to thermal water from Vulcano Island. *Applied Geochemistry* 13, 631-642.
- Capelli G. & Mazza R., 2005. Schema idrogeologico della Città di Roma – Gestione della risorse idrica e del rischio idrogeologico. In: Atti del convegno “la IV Dimensione – Lo spazio sotterraneo di Roma” *Geologia dell’Ambiente – periodico trimestrale della SIGEA (Società Italiana di Geologia Ambientale)*, Anno XIII n° 4 (supplemento), Roma, p. 47-58.
- Capelli G., Mazza R. & Gazzetti C. (A CURA DI) 2005. Strumenti e strategie per la tutela e l’uso compatibile della risorsa idrica nel Lazio – Gli acquiferi vulcanici. *Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale n.78*. Pitagora Editrice, 216 pp., 4 tavv. f.t., 21 tavv. f.t. su CD-ROM allegato.
- Capelli G., Mazza R., Taviani S. (2008) - Acque sotterranee nella città di Roma. In: Funicello R., Praturlon A., & Giordano G. (ed.) “La Geologia di Roma”, *Memorie descrittive della Carta Geologica d’Italia*, LXXX, 221-245.
- Carapezza M.L., Pizzino L., Quattrocchi F., Cavarra L., Scalzo A., 2000. Rischio da emanazioni gassose nei comuni di Ciampino e Marino. *Supplemento al numero di Novembre di DPC informa*.
- Carapezza, M.L., Badalamenti, B., Cavarra, L., Scalzo, A., 2003. Gas hazard assessment in a densely inhabited area of Colli Albani volcano (Cava dei Selci). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 123, 81–94.
- Carapezza, M. L. & Tarchini, L., 2007. Accidental gas emission from shallow pressurized aquifers at Alban Hills volcano (Rome, Italy): Geochemical evidence of magmatic degassing? *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 165, 5-16, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2007.04.008.

- Carapezza M.L., Lelli M., Tarchini L., 2008. Geochemistry of the Albano and Nemi crater lakes in the volcanic district of Alban Hills (Rome, Italy). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.06.031
- Carapezza M.L., Barberi F., Ranaldi M., Ricci T., Tarchini L., Barrancos J., Fischer C., Granieri D., Lucchetti C., Melian G., Perez N., Tuccimei P., Vogel A., Weber K., 2012. Hazardous gas emissions from the flanks of the quiescent Colli Albani volcano(Rome, Italy). *Appl. Geochem.* 27, 1767-1782.
- Carapezza M.L., Ranaldi M., Gattuso A., Pagliuca N.M., Tarchini L., 2015. The sealing capacity of the cap rock above the Torre Alfina geothermal reservoir (Central Italy) revealed by soil CO₂ flux investigations. *Journal of volcanology and geothermal research*, 291, 25-34.
- Castelluccio M. (2010) - Soil radon concentration survey in Caffarella Valley test site (Rome) Ph.D. Thesis in Geodynamics at the "Roma Tre" University.
- Castelluccio M., Giannella G., Lucchetti C., Moroni M., Tuccimei P., 2012. Classification of radon hazard in urban planning focused to risk management. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 2, 5-16.
- Cavinato G.P., Casentino D., De Rita D., Funicciello R., Parlotto M., 1994. Tectonic-sedimentary evolution of intra-penninic basins and correlation with the volcano-tectonic activity in Central Italy. *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia XLIX*, 63-76.
- Cesi C., Eulilli V., Ferri F., 2008. Analisi ed interpretazione dei valori delle anomalie di gravità del territorio dell'area romana: correlazione con gli elementi geologici di superficie e la struttura profonda. In: Funicciello R., Praturlon A., & Giordano G. (ed.) "La Geologia di Roma", *Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia*, LXXX, 97-113.
- Chiarabba, C., Amato, A., Delaney, P.T., 1997. Crustal structure, evolution, and volcanic unrest of the Alban Hills, Central Italy. *Bull. Volcanol.* 59 (3): 161-170.
- Chiodini G., Frondini F., Ponziani F., 1995. Deep structures and carbon dioxide degassing in Central Italy. *Geothermics* 24, 81-94.
- Chiodini G., Frondini F., 2001. Carbon dioxide degassing from the Albani Hills volcanic region, Central Italy. *Chem. Geol.* 177, 67-83.
- Chiodini G., Cardellini C., Amato A., Boschi E., Caliro S., Frondini F., 2004. Carbon dioxide Earth degassing and seismogenesis in Central and southern Italy. *Geophys. Res. Lett.* 31, L07615. <http://dx.doi.org/10.1029/2004GL019480>.
- Cinelli G, Tositti L., Capaccioni B., Brattich E., Mostacci D., 2014. Soil gas radon assessment and development of a radon risk map in Bolsena, Central Italy. *Environ Geochem Health* DOI 10.1007/s10653-014-9649-9.

- Cinti D., Procesi M., Tassi F., Montegrossi G., Sciarra A., Vaselli O., Quattrocchi F., 2011. Fluid geochemistry and geothermometry in the western sector of the Sabatini Volcanic District and the Tolfa Mountains (Central Italy). *Chem. Geol.* 284 (1-2), 160-181.
- Cinti D., Poncia P.P., Procesi M., Galli G., Quattrocchi F., 2013. Geostatistical Techniques Application To Dissolved Radon Hazard Mapping: An Example From The Western Sector Of The Sabatini Volcanic District And The Tolfa Mountains (Central Italy). *Applied Geochemistry* 35, 312-324;
- Cinti D., Tassi F., Procesi M., Bonini M., Capecchiacci F., Voltattorni N., Vaselli O., Quattrocchi F., 2014. Fluid Geochemistry And Geothermometry In The Unexploited Geothermal Field Of The Vicano-Cimino Volcanic District (Central Italy). *Chemical Geology*, Doi: 10.1016/J.Chemgeo.2014.02.005;
- Ciotoli G., Finoia M.G., 2005. Dalla statistica alla geostatistica. Introduzione all'analisi dei dati geologici e ambientali, 416 pp.
- Ciotoli, G., Etiope, G., Florindo, F., Marra, F., Ruggiero, L., Sauer, P.E., 2013. Sudden deep gas eruption nearby Rome's airport of Fiumicino. *Geophys. Res. Lett.* <http://dx.doi.org/10.1002/2013GL058132>.
- Clark J.D. & Fritz P., 1999. Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis publisher.
- Conticelli S., Francalanci L., Manetti P., Cioni R., Sbrana A., 1997. Petrology and geochemistry of the ultrapotassic rocks from the Sabatini Volcanic District, central Italy: the role of evolutionary processes in the genesis of variably enriched alkaline magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Researches*, 75, 107-136.
- Console R., Sonaglia A., 1972. Studio del terremoto di Tuscania.
- Corazza A. & Lombardi L., 1995. Idrogeologia del centro storico di Roma. *Mem. Descr. della Carta Geol. d'It.* Vol. 50.
- Corazza A., Lanzini M., Rosa C. & Salucci R., 1999. Caratteri stratigrafici, idrogeologici e geotecnici delle alluvioni tiberine nel settore del centro storico di Roma. *Il Quaternario* 12, 215-235.
- Corsi & Di Falco. Production test facilities of the hot brines of Cesano geothermal field. *ENEL*, 247-271.
- Cosentino D., Cipollari P., Di Bella L., Esposito A., Faranda C., Funicello R., Giordano G., Gliozzi E., Mattei M., Mazzini I., Porreca M., 2008. Geologia dei Monti della Farnesina (Roma); nuovi dati di sottosuolo dalla galleria Giovanni XXIII. In: Funicello R., Praturlon A., & Giordano G. (ed.) "La Geologia di Roma", *Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia*, LXXX, 25-39.285-311.
- Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science* 133, 1702-1703.
- Deines, P., 1970. The carbon and oxygen isotopic composition of carbonates from the Oka Carbonatite complex, Quebec, Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta* 34, 1199-1225.
- De Panfilis M., 1969. Un periodo sismico nei monti della Tolfa.

- De Rita, D., Faccenna, C., Funiciello, R., Rosa, C., 1995. Stratigraphy and volcano-tectonics. In: *The Volcano of the Alban Hills*. A cura di Trigila R. Tipografia SGS Roma, 33-71.
- De Simone G., 2012. Tesi di laurea inedita, Università degli Studi Roma 3.
- Di Fonzo F., Giannoni U, Maruffi F., 1986. Rilievo gravimetrico della città di Roma. *Boll. Serv. Geol. D'Italia*.
- Di Salvo C, Di Luzio E, Moscatelli M, Capelli G, Cavinato GP, Mancini M, Mazza R., 2012. GIS-based hydrogeological modeling in the city of Rome: analysis of the geometric relationships between a buried aquifer in the Tiber valley and the confining hydrogeological complexes. *Hydrogeol J* 20:1549–1567. doi:10.1007/s10040-012-0899-2.
- Di Salvo C., Moscatelli M., Mazza R., Capelli G., Cavinato G.P., 2014. Evaluating groundwater resource of an urban alluvial area through the development of a numerical model. *Environ Earth Sci* DOI 10.1007/s12665-014-3138-4.
- Dunai, T.J., Baur, H., 1995. Helium, neon and argon systematics of the European subcontinental mantle: implications for its geochemical evolution. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 2767-2783 doi:10.1016/0016-7037(95)00172-V.
- Etiopo G., Guerra M., Raschi A., 2005. Carbon Dioxide and Radon Geohazards Over a Gas-bearing Fault in the Siena Graben (Central Italy). *TAO*, Vol. 16, No. 4, 885-896.
- Faccenna C., Funiciello R. & Marra F., 1995. Inquadramento geologico strutturale dell'area romana - Mem. descr. *Carta Geol.* 50.
- Faure G., 1986. *Principles of isotope geology*. 2nd edition.
- Favara, R., Grassa, F., Inguaggiato, S., Pecoraino, G., Capasso, G., 2002. A simple method to determine the $\delta^{13}\text{C}$ content of total dissolved inorganic carbon. *Geofis. Int.* 41, 313-320.
- Feroci F., 2014. “L'uso del radon come tracciante delle emergenze di acque sotterranee in alveo, parco della cafferella -rm-“. Tesi di laurea inedita, Università degli studi di Roma 3.
- Feuillet, N., C. Nostro, C. Chiarabba, and M. Cocco 2004. Coupling between earthquake swarms and volcanic unrest at the Alban Hills volcano (Italy) through elastic stress transfer, *J. Geophys. Res.*, 109, B02308, doi:10.1029/2003JB002419.
- Freda C., Gaeta M., Giaccio B., Marra F., Palladino Danilo M., Scarlato P., Sottili G., 2010. CO₂-driven large mafic explosive eruptions: the Pozzolane Rosse case study from the Colli Albani Volcanic District (Italy). *Bull Volcanol.*, DOI 10.1007/s00445-010-0406-3
- Fronzoni F., Caliro S., Cardellini C., Chiodini G., Morgantini N., Parello F., 2008. Carbon dioxide degassing from Tuscany and Northern Latium (Italy), *Global and Planetary Change*, 16, 89-102.

- Funiciello R. & Parotto M. 1978. Il substrato sedimentario nell'area dei Colli Albani: considerazioni geodinamiche e paleogeografiche sul margine tirrenico dell'Appennino Centrale. *Geol. Rom.* 17, 233-287.
- Funiciello, R., Giordano, G., De Rita, D., Carapezza, M. L., Barberi, F., 2002. L'attività recente del cratere del Lago Albano di Castelgandolfo, *Rend. Acc. Naz. Lincei* 9-13, 113-143.
- Funiciello R., Giordano G., De Rita D., 2003. The Albano maar lake (Colli Albani Volcano, Italy): recent activity and evidence of pre-Roman Age catastrophic lahar events. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 123, 43-61.
- Funiciello R., Giordano G. (a cura di) 2005. Carta Geologica di Roma alla scala 1:10000, vol. 1, Dipartimento Scienze Geologiche Università Roma TRE – Comune di Roma.
- Funiciello, R., Giordano, G. (Eds.), 2008. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 374 Roma. Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici, Rome, pp. 158.
- Gambardella B., Marini L., Baneschi I., 2005. Dissolved potassium in the shallow groundwaters circulating in the volcanic rocks of central-southern Italy. *Applied Geochemistry* 20 (2005) 875-897.
- Giammanco S, Sims K.W.W., Neri M., 2007. Measurements of ^{220}Rn and ^{222}Rn and CO_2 emissions in soil and fumarole gases on Mt. Etna volcano (Italy): Implications for gas transport and shallow ground fracture. *G3*, 8, 1-14.
- Giggenbach, W.F., Gonfiantini, R., Jangi, B.L. and Truesdell, A.H., 1983. Isotopic and chemical composition of Parbati valley geothermal discharges, NW-Himalaya, India, *Geothermics*, 12: 199-222.
- Girault, F., and F. Perrier (2014), The Syabru-Bensi hydrothermal system in central Nepal: 2. Modeling and significance of the radon signature, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 4056-4089 doi:10.1002/2013JB010302.
- Gorgoni, C., Martinelli, G., Sighinolfi, G.P., 1982. Isotopic evidence of paleowaters in the Po sedimentary basin (Northern Italy). *Geochem. J.* 16, 51-61.
- Hem J. D., 1989. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. U.S. Geological Survey Water-Supply, Paper 2254 (third edition).
- Javoy, M., Pineau, F., Allegre, C.J., 1982. Carbon geodynamic cycle. *Nature* 300, 171-173.
- Kass W., 1988. Tracing techniques in geohydrology. A.A. Balkema.
- Klemperer Simon L., B. Mack Kennedy, Siva R. Sastry, Yizhaq Makovsky, T. Harinarayana, Mary L. Leech, 2013. Mantle fluids in the Karakoram fault: Helium isotope evidence. *Earth and Planetary Science Letters* 366 (2013) 59-70.
- Kyser, K. T., 1986. Stable isotope variations in the mantle, in *Stable Isotopes in High Temperature Geologic Processes*, edited by J. W. Valley, B. E. Taylor and J. R. O'Neil, p. 141-164, Mineral. Soc. Am., Washington.

- ISPRA, 2013. Studio dell'area in frana denominate Viale Aurelio Saffi/Via Ugo Bassi a Monteverde, Roma. Relazione finale.
- Langelier, W, Ludwig, H., 1942. Graphical methods for indicating the mineral character of natural waters. *J. Am. Water Ass.* 34, 335-352.
- Lanzarone D., 2003. Caratterizzazione idrogeochimica delle acque risorgive della Tenuta di Tor Marancia” Settore del Fosso di Tor Carbone (Grottone). Saggio di laboratorio, Dipartimento di Scienze Geologiche, Università degli studi di Roma 3, 32 pp.
- La Vigna F., Capelli G., Mazza R., 2008. Assetto idrogeologico del settore romano del bacino del Fiume Aniene. In: Funicello R., Praturlon A., & Giordano G. (ed.) “La Geologia di Roma”, Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia, LXXX, 121-134.
- Longinelli, A., Selmo, E., 2003. Isotopic composition of precipitation in Italy: a first overall map. *J. Hydrol.* 270, 75-88.
- Lucchetti C., 2014. Valutazione dell'influenza di cavità sotterranee e campi di fratturazione sulle concentrazioni di radon e thoron nel suolo in aree idrotermali e perivulcaniche della Regione Lazio. Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Roma Tre.
- Maluccio S., 2008: Rischio da Natural Gas Hazard e studio della chimica dei fluidi nel complesso vulcanico dei Colli Albani, tesi di laurea inedita, Università “La Sapienza” di Roma.
- Mancini C., Quattrocchi F., Guadoni C., Pizzino L., Porfidia B., 2000. ^{222}Rn study throughout different seismotectonical areas: comparison between different techniques for discrete monitoring. *Annali di Geofisica*, 43 (1), 31-60.
- Manfra L., Masi U., Turi B., 1976. La composizione isotopica dei travertini del Lazio. *Geologica Romana*, 15, 127-174.
- Mariucci, M.T., Pierdominici, S., Pizzino, L., Marra, F., Montone, P., 2008. Looking into a volcanic area: an overview on the 350 m scientific drilling at Colli Albani (Rome, Italy). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 176, 225-240.
- Marra, F., Rosa, C., 1995. Stratigrafia e assetto geologico dell'area romana. *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia* 50, 49-118.
- Marra F. & Florindo, 2014. The subsurface geology of Rome: Sedimentary processes, sea-level changes and astronomical forcing. *Earth-Science Reviews* 136, 1-20.
- Martelli, M., Nuccio, P.M., Stuart, F.M., Burgess, R., Ellam, R.M. & Italiano, F., 2004. Helium-Strontium isotope constraints on mantle evolution beneath the Roman Comagmatic Province, Italy. *Earth Planet. Sci. Lett.* 224, 295-308.

- Martini M., Giannini L., Prati F., Tassi F., Capaccioni B., Iozzelli P., 1994. Chemical characters of crater lakes in the Azores and Italy: the anomaly of Lake Albano. *Geoch. Journ.*, 28, 173-184.
- Mattia M., 2014. Studio geochimico dell'Acquedotto Vergine Antico di Roma. Tesi di laurea inedita, Università degli studi Roma 3.
- Mc Crea J., 1950. On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. *J. Chem. Phys.*, 18, 849-857.
- Minissale, A., Evans, W.C., Magro, G., Vaselli, O., 1997. Multiple source components in gas manifestations from north-central Italy. *Chem. Geol.* 142, 175-192.
- Minissale A. 2004. Origin, transport and discharge of CO₂ in central Italy. *Earth Science Review* v.66, 89-141
- Mook, W.G., Bommerson, J.C., Staverman, W.H., 1974. Carbon isotope fractionation between dissolved bicarbonate and gaseous carbon dioxide. *Earth Planet. Sci. Lett.* 22 (2), 169-176.
- Novarese, V., 1926. La trivellazione di Fiumicino e le emanazioni di CO₂ del Vulcano laziale. *Bollettino del Regio Ufficio geologico d'Italia* 51, 1-9.
- Ozima, M., Podosek., F.A., 2002. *Noble Gas Geochemistry*: Cambridge University Press. Cambridge, UK, 286 pp.
- Parkhurst, D.L., Appelo, A.A.J., 1999. User's guide to PHREEQC (version 2) — a computer program for speciation, batch-reaction, one dimensional transport and inverse geochemical modeling. U.S. Geological Survey, Water-Resource Investigation Report 99-4259, p. 312.
- Parotto M & Praturlon A., 1975. Geological summary of the Central Apennines. *Quaderni di ricerca scientifica* 90, 257-311.
- Parotto M., 2008. Evoluzione paleogeografica dell'area romana. In: Funicello R., Praturlon A., & Giordano G. (ed.) "La Geologia di Roma", *Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia*, LXXX, 25-39.
- Pizzino, L., Quattrocchi, F., 1999. Studio delle emanazioni gassose diffuse (CO₂ and radon) nei territori dei Comuni di Marino e Ciampino (Roma). *ING Report*, 27 pp.
- Pizzino, L., Galli, G., Mancini, C., Quattrocchi, F., Scarlato, P., 2002. Natural gas hazard (CO₂, 222Rn) within a quiescent volcanic region and its relations with tectonics: the case of the Ciampino-Marino area, Alban Hills volcano, Italy. *Natural Hazards* 27: 257-287.
- Pizzino L., Quattrocchi F., Cinti D., Galli G., 2004a. Fluid geochemistry along the Eliki and Aigion seismogenic segments (Gulf of Corinth, Greece). *C. R. Geoscience* 336, 367-374.
- Pizzino L., Burrato P., Quattrocchi F., Valensise G., 2004b. Geochemical signature of large active faults: the example of the 5 February 1783, Calabrian earthquake. *Journal of Seismology*, 8 (3), 363-380.
- Pizzino L., 2004c. Rischio da emissioni gassose naturali. *La Geopagina* (n. 2 febbraio 2004).

- Pizzino L., Galli G., 2011. Report finale relativo alla convenzione Comune di Ciampino-Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia per l'esecuzione di un programma di monitoraggio della concentrazione di radon indoor: Relazione periodo gennaio-dicembre 2008.
- Quattrocchi F., Guerra M., Pizzino L., Lombardi S., 1999. Radon and helium as pathfinders of fault systems and groundwater evolution in different Italian areas. *Il Nuovo Cimento* 22(3-4), 309-316.
- Rice, A., 2000. Rollover in volcanic crater lakes: a possible cause for Lake Nyos type disaster, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 97, 233-239.
- Riguzzi F., Pietrantonio G., Devoti R., Atzori S., Anzi dei M., 2009. Volcanic unrest of the Colli Albani (central Italy) detected by GPS monitoring test. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 177, 79-87.
- Salvi S., Atzori S., Tolomei C., Allievi J., Ferretti A., Rocca F., Prati C., Stramondo S., Feuillet N., 2004. Inflation rate of the Colli Albani volcano complex retrieved by the permanent scatterers SAR interferometry technique. *Geophysical Research Letters*, VOL. 31, L12606, doi:10.1029/2004GL020253, 2004
- Sitchler-Navarre A., Thyne G., 2007. Effects of carbon dioxide on mineral weathering rates at earth surface conditions. *Chemical Geology* 243 (2007) 53-63.
- Solomon, D. K., and T. E. Cerling, The annual carbon dioxide cycle in a montane soil: Observations, modeling, and implications for weathering, *Water Resour. Res.*, 23(12), 2257-2265, 1987.
- Sella P., Billi A., Mazzini I., De Filippis L., Pizzino L., Sciarra A., Quattrocchi F., 2014. A new-emerged (August 2013) artificially-triggered fumarole near the Fiumicino airport, Rome, Italy. *J. Volcan. Geotherm. Res.* 280, 53-66.
- Selvaggi G., D'Ajello Caracciolo F., 1998. Seismic deformation at the Alban Hills volcano during the 1989-1990 seismic sequence. *Annali di Geofisica*, 41 (2), 225-231.
- Tarchini L., 2009. Le emissioni di gas endogeno dei Colli Albani e dell'isola di Vulcano e valutazione della loro pericolosità. Tesi di Dottorato, Università Roma 3.
- Toro B., 1978. Anomalie residue di gravità e strutture profonde nelle aree vulcaniche del Lazio settentrionale. *Geologica Romana* 17, 35-44.
- Tuccimei P., Moroni M., Norcia D., 2006. Simultaneous determination of ^{222}Rn and ^{220}Rn exhalation rates from building materials used in Central Italy with accumulation chambers and a continuous solid state alpha detector: Influence of particle size, humidity and precursors concentration. *Appl. Radiat. Isot.* 64: 254-263.
- Ventriglia U., 1971. *Geologia della città di Roma*.
- Ventriglia U., 1990. *Idrogeologia della Provincia di Roma - III Volume - Regione vulcanica dei Colli Albani*, Amm.ne Provinciale di Roma - Assessorato LL.PP. viabilità e trasporti.
- Ventriglia U., 2002. *Geologia del territorio del comune di Roma*. A cura dell'Amministrazione Provinciale di Roma.

- Venturini, L., Zuppi, G.M., Bertoni, W., 1990. Studio chimico-isotopico delle acque sotterranee della pianura ravennate. In: Pitagora (Ed.) Studi sulla Vulnerabilità degli Acquiferi. Bologna, Italy, 109-143.
- Vivona R., 2001. Valutazione del Natural Gas Hazard e delle aree con possibile rischio da Rn-indoor nei settori Laurentina-Cecchignola-Trigoria nel contesto geodinamico dei Colli Albani, tesi di laurea inedita Università "La Sapienza" di Roma.
- Yang T.F., Chou C.Y., Chen C-H., Chyi L.L., Jiang J.H., 2003. Exhalation of radon and its carrier gases in SW Taiwan. *Radiation Measurements* 36, 425 – 429.
- Washington, H.S., 1906. The Roman Comagmatic Region, vol. 57. Carnegie Institute, Washington, pp. 1–199.
- WHO-IARC (World Health Organization-International Agency for Research on Cancer), 1988. IARC Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Man-made Mineral Fibres and Radon. IARC Monographs Vol. 43, Lyon, France.
- WHO-IARC (World Health Organization-International Agency for Research on Cancer), 2001. IARC Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Some Internally Deposited Radionuclides. IARC Monographs Vol. 78, Lyon, France.
- Zhang, J., Quay, P.D., Wilbur, D.O., 1995. Carbon isotope fractionation during gas–water exchange and dissolution of CO₂. *Geochim. Cosmochim. Acta* 82, 161–173.

Campione	latitudine	longitudine	Temp.	pH	Eh	Cond. el.
						°C
1	41,8336	12,4886	15,4	6,57	208	771
2	41,8890	12,4704	16,1	7,95	168	705
3	41,8966	12,4712	17,4	7,62	70	707
4	41,8731	12,4871	18,8	7,10	194	980
5	n.d.	n.d.	18,5	7,20	133	1019
6 (s)	41,8917	12,4628	15,7	7,26	251	969
7 (s)	41,8909	12,4630	14,7	7,08	277	1050
8 (s)	41,8933	12,4846	17,6	7,50	n.d.	917
9 (s)	41,8916	12,4858	17,8	8,49	127	381
10 (s)	41,8927	12,4853	19,0	7,78	197	649
11 (s)	41,8978	12,4685	15,4	7,07	235	952
12	n.d.	n.d.	18,9	6,92	n.d.	1031
13	n.d.	n.d.	18,1	7,05	n.d.	1780
14	41,8581	12,4765	18,9	7,24	n.d.	861
15	n.d.	n.d.	19,9	6,43	226	862
16	41,8137	12,5235	18,2	6,56	182	847
17	41,8286	12,5188	17,4	6,33	172	902
18	41,8365	12,5310	17,9	6,03	148	898
19	41,8482	12,5495	18,4	6,53	143	927
20	41,8554	12,5373	20,3	6,21	163	961
21	41,8490	12,5316	18,0	6,04	190	900
22 (s)	41,8546	12,5304	18,0	6,02	183	963
23	41,8535	12,5351	17,6	6,04	164	991
24	n.d.	n.d.	18,5	6,64	61	1125
25	n.d.	n.d.	18,8	6,95	159	743
26	41,8056	12,5085	19,1	6,48	238	580
27	41,8103	12,5116	17,4	6,82	167	763
28	41,8101	12,5291	19,5	6,18	143	871
29	41,8076	12,5582	18,2	6,65	141	481
30	41,8758	12,5715	19,2	6,64	127	749
31	41,8834	12,5741	19,0	6,69	81	788
32	n.d.	n.d.	19,6	6,01	85	1029
33	41,8751	12,5699	19,2	6,71	75	818
34	n.d.	n.d.	19,1	5,87	n.d.	1065
35	n.d.	n.d.	19,1	5,93	63	916
36	41,8300	12,5666	18,3	6,18	52	1071
37	41,8844	12,5461	16,5	6,97	38	919
38	41,8869	12,5436	18,6	6,83	47	891
39	41,8406	12,5634	17,7	6,16	100	921
40	n.d.	n.d.	18,7	6,18	82	892
41	n.d.	n.d.	19,8	7,27	136	713

Campione	latitudine	longitudine	Temp.	pH	Eh	Cond. el.
						°C
42	41,8259	12,4916	17,1	7,10	151	611
43	41,8762	12,4945	19,7	7,28	86	944
44	41,8791	12,4888	18,2	7,03	86	1010
45	41,8687	12,5027	19,3	6,93	68	1091
46	41,9253	12,4417	17,8	6,82	152	1038
47	41,9469	12,4098	17,6	7,24	87	742
48	41,9398	12,4972	18,7	6,99	202	953
49	41,8522	12,4884	25,3	7,09	178	1088
50	41,8539	12,4888	24,6	7,11	168	1095
51	41,9417	12,4333	16,9	6,98	228	776
52	41,8759	12,5014	18,7	7,06	178	855
53	41,8779	12,4975	18,5	7,03	158	1154
54	41,8825	12,4939	16,9	7,14	107	760
55	41,8529	12,5194	18,4	6,23	138	860
56	41,9429	12,4387	18,5	7,15	-35	691
57	41,9089	12,4047	21,9	7,58	70	676
58 (s)	41,9307	12,4517	18,9	8,08	87	582
59	41,9655	12,4604	19,5	7,15	29	745
60	41,9582	12,4582	21,1	7,15	90	881
61	41,9931	12,5133	17,2	7,04	70	1260
62 (s)	41,9737	12,5884	16,2	7,47	71	519
63	41,9660	12,5484	17,6	7,13	115	721
64	n.d.	n.d.	20,4	6,60	49	2534
65	41,9869	12,5187	18,3	6,76	128	991
66	41,9863	12,5702	21,7	7,29	108	658
67	41,9462	12,5179	17,0	7,30	155	713
68	41,8612	12,4605	19,7	7,20	115	909
69	41,9432	12,5403	17,7	7,11	86	758
70	41,8811	12,4021	20,1	7,16	80	713
71	41,9137	12,5512	19,4	6,90	110	671
72 (s)	41,8617	12,5191	16,3	6,30	136	856
73 (s)	41,8602	12,5224	16,9	6,34	146	759
74 (s)	41,8576	12,5308	18,3	6,31	149	865
75 (s)	41,8592	12,5244	18,4	6,48	137	738
76	41,8611	12,4050	20,2	7,41	-26	657
77	41,8656	12,5862	19,4	6,74	134	757
78	n.d.	n.d.	18,5	6,03	162	976
79	41,8653	12,5163	17,3	6,55	30	1283
80	41,8485	12,4738	19,7	7,46	95	714
81	41,9173	12,5414	18,3	6,98	31	927
82 (s)	41,8695	12,5141	19,0	6,99	42	950

Campione	latitudine	longitudine	Temp.	pH	Eh	Cond. el.
			°C		mV	µS/cm (a 25°C)
83	41,8691	12,5145	17,4	6,85	55	1033
84 (s)	41,8679	12,5170	17,1	7,11	62	828
85	41,8575	12,4274	18,2	6,91	45	993
86	41,8459	12,5742	18,3	6,30	40	821
87	n.d.	n.d.	18,5	6,51	30	715
88	41,8223	12,5335	18,9	6,04	36	850
89	41,8490	12,3743	19,5	7,15	134	1197
90	n.d.	n.d.	19,0	6,89	120	969
91	n.d.	n.d.	16,9	6,90	85	682
92	41,9028	12,4028	20,1	7,42	85	675
93	41,8142	12,3890	18,2	6,90	50	1593
94	41,8182	12,5640	22,2	5,99	108	825
95	41,8635	12,5046	17,5	6,50	101	842
96	n.d.	n.d.	17,2	6,42	82	868
97	41,8933	12,5439	15,8	6,72	85	575
98	n.d.	n.d.	20,0	6,91	68	1043
99	41,8258	12,4322	15,9	6,63	88	2732
100	n.d.	n.d.	16,0	6,70	160	517
101	41,8607	12,4679	17,3	6,81	42	1927
102	41,8927	12,4648	14,5	7,34	115	734
103	41,8411	12,5382	17,2	6,74	156	641
104	n.d.	n.d.	15,2	6,12	172	777
105	41,8830	12,4240	11,7	7,64	220	517
106	41,8603	12,4375	16,0	7,07	163	791
107	41,9583	12,5532	15,3	7,32	155	642
108	41,8008	12,4814	17,8	6,99	84	868
109	41,8747	12,4388	18,7	6,95	125	828
110	41,9169	12,4902	16,5	7,11	113	819
111	41,9189	12,4898	17,7	7,30	133	860
112	41,9175	12,4853	16,4	7,11	161	774
113	41,8893	12,5109	16,9	7,37	134	773
114	41,9322	12,5792	17,7	7,20	158	914
115	41,9010	12,5394	17,2	6,78	170	697
116	41,9288	12,5653	18,7	7,24	166	869
117	41,9779	12,4317	20,0	7,14	134	1229
118	41,9150	12,3808	18,2	7,27	65	713
119	n.d.	n.d.	17,9	7,33	174	701
120	41,8100	12,4545	18,9	7,08	190	896
121	41,9393	12,5767	18,3	7,17	139	787
122	41,9306	12,5354	18,9	6,53	180	1172
123	41,9594	12,4007	19,6	7,30	136	726

Campione	latitudine	longitudine	Temp.	pH	Eh	Cond. el.
			°C		mV	µS/cm (a 25°C)
124	41,9540	12,5834	17,4	7,35	141	717
125	n.d.	n.d.	17,6	7,36	159	687
126	n.d.	n.d.	17,9	7,21	133	740
127	41,9438	12,5925	17,4	7,20	135	635
128	41,9462	12,5840	17,1	7,35	110	646
129	41,9169	12,5779	17,9	6,94	157	697
130	41,9177	12,5759	17,2	7,05	158	909
131	41,9212	12,5719	14,5	7,58	125	614
132	41,9856	12,5055	17,6	6,70	39	1323
133	41,8069	12,4839	18,0	6,76	206	461
134	41,8124	12,4816	17,9	7,11	140	575
135	41,8295	12,5096	18,9	6,45	200	781
136	n.d.	n.d.	17,3	6,54	160	717
137	41,9505	12,3966	15,2	7,25	200	609
138	41,9361	12,3827	18,4	7,20	128	693
139	42,0008	12,4950	19,6	6,79	21	1093
140	42,0123	12,4959	20,4	6,85	69	963
141	n.d.	n.d.	17,2	6,88	207	800
142	41,9493	12,5876	17,5	7,14	223	666
143	41,9314	12,6018	18,2	7,06	221	962
144	41,9333	12,5792	18,0	7,22	220	952
145	41,9109	12,4231	17,2	7,30	240	944
146	41,9806	12,4960	19,4	6,78	20	1558
147	41,9789	12,4960	19,5	6,67	178	1505
148	41,8737	12,3903	17,2	6,96	173	1171
149	41,8750	12,3896	18,0	6,84	184	1163
150	41,8737	12,3919	18,1	6,93	170	1245
151	41,8871	12,4819	17,9	7,34	245	1203
152	41,8868	12,4812	18,9	7,32	238	1195
153 (s)	41,8897	12,4974	16,1	7,33	202	859
154	41,8876	12,5150	18,5	7,38	188	783
155	41,8616	12,3789	18,1	6,93	179	1045
156	41,8630	12,3822	18,5	6,99	155	1002
157	41,9426	12,4879	19,5	6,42	119	2187
158	41,9435	12,4962	19,6	6,11	140	4032
159	41,9380	12,4906	21,0	6,12	-47	4200
160	41,9397	12,4902	19,5	6,24	-111	4682
161	41,9362	12,4960	18,1	7,31	234	845
162	41,9063	12,4874	18,2	7,24	205	826
163	41,8138	12,4421	18,6	6,74	43	1163
164 (s)	41,8507	12,5016	17,3	6,34	228	927

Campione	latitudine	longitudine	Temp.	pH	Eh	Cond. el.
			°C		mV	µS/cm (a 25°C)
165	41,9352	12,4928	20,5	6,79	75	1841
166	41,9363	12,4953	19,2	6,97	220	917
167	41,9392	12,4959	18,0	6,78	167	1304
168	41,9369	12,4619	19,9	6,50	250	1520
169	41,9324	12,4585	18,3	6,72	136	1480
170	41,9255	12,4583	19,3	6,94	83	1259
171	41,9733	12,4595	19,1	7,19	140	797
172	n.d.	n.d.	19,4	7,28	202	679
173	n.d.	n.d.	19,5	6,86	213	792
174	n.d.	n.d.	19,1	6,92	110	714
175	41,9780	12,4918	18,7	7,27	200	735
176	41,9790	12,4914	19,3	6,92	210	689
177	41,9734	12,4442	18,8	7,08	219	593
178	41,9493	12,4539	18,3	6,95	177	965
179	n.d.	n.d.	18,2	6,88	223	1025
180	n.d.	n.d.	18,9	6,99	221	1024
181	41,8876	12,4620	17,0	7,36	180	689
182	41,9440	12,4528	17,3	6,84	193	936
183	41,8645	12,4976	17,6	6,62	181	1112
184	n.d.	n.d.	18,9	6,95	150	940
185	41,9799	12,4717	17,3	7,56	217	564
186	42,0020	12,4178	22,6	6,23	151	2290
187	41,9176	12,4589	18,9	6,91	151	2464
188	n.d.	n.d.	22,9	7,23	203	1227
189	n.d.	n.d.	20,9	7,33	254	757
190	n.d.	n.d.	17,7	7,38	278	703
191	n.d.	n.d.	18,6	6,98	234	994
192	41,9324	12,4737	19,6	6,29	n.d.	4635
Acqua S. Paolo (s)	41,8030	12,4760	22,3	6,15	268	3230
Cinema Metropolitan	41,9095	12,4769	22,5	7,26	n.d.	1579
Hotel Plaza	41,9050	12,4789	22,5	6,61	n.d.	3189
Monopolio di Stato	41,8871	12,4740	17,1	7,29	n.d.	1841
RS 1	n.d.	n.d.	20,5	6,62	139	1285
RS 2	n.d.	n.d.	21,4	6,71	325	1001
RS 3	n.d.	n.d.	26,2	6,64	267	937
RS 4	n.d.	n.d.	22,1	6,53	455	1043
RS 5	n.d.	n.d.	24,4	7,19	595	716
RS 6	n.d.	n.d.	23,4	6,63	406	821
pozzo parioli	n.d.	n.d.	17,2	7,02	n.d.	745
Tor Marancia 1 (s)	41,8492	12,5043	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Tor Marancia 2 (s)	41,8490	12,5051	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Campione	latitudine	longitudine	Temp.	pH	Eh	Cond. el.
			°C		mV	µS/cm (a 25°C)
Tor Marancia 3 (s)	41,8487	12,5045	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 1	41,9307	12,5066	16,3	7,07	n.d.	754
Villa Ada 2	41,9362	12,5055	n.d.	7,20	214	1028
Villa Ada 3	41,9369	12,5068	n.d.	6,90	208	990
Villa Ada 4	41,9332	12,5065	n.d.	7,30	192	692
Villa Ada 5	41,9334	12,5063	n.d.	7,00	193	973

Tabella A1. Coordinate geografiche e parametri chimico fisici delle acque di sottosuolo dell'area urbana di Roma. (s) = sorgente; ove non indicato: pozzo. n.d. = il proprietario ha negato il permesso di divulgare l'ubicazione del pozzo di acqua.

Campione	F⁻	Cl⁻	SO₄²⁻	HCO₃⁻	Na⁺	K⁺	Mg²⁺	Ca²⁺
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
1	1,49	20,10	40,30	305,00	46,90	50,90	16,60	48,20
2	0,17	30,10	60,68	292,80	43,80	50,60	10,20	69,00
3	0,26	24,90	3,39	414,80	37,20	39,90	14,40	85,40
4	0,47	38,26	56,40	475,80	57,20	12,70	23,40	135,00
5	0,50	61,02	87,20	439,20	89,90	23,20	24,10	104,00
6	0,61	54,69	57,70	427,00	44,60	30,27	14,50	117,00
7	0,59	76,00	153,97	366,00	56,30	12,00	17,20	155,00
8	0,28	54,60	78,80	244,00	49,80	22,90	5,80	115,00
9	0,31	12,22	24,98	164,70	16,69	33,13	12,48	20,24
10	0,28	27,60	34,70	244,00	31,20	33,30	13,20	49,10
11	0,75	53,90	67,70	408,70	52,10	27,60	18,60	111,00
12	0,23	73,50	58,90	402,60	45,90	1,11	20,40	143,00
13	0,24	353,69	69,52	475,80	111,24	20,47	38,99	220,73
14	0,19	32,60	46,30	353,80	30,10	71,90	13,10	91,20
15	2,47	33,32	36,02	378,20	42,30	58,26	19,09	79,16
16	1,71	39,35	35,54	366,00	43,45	56,70	22,01	72,75
17	1,78	34,03	36,65	402,60	46,21	64,91	22,01	74,75
18	1,65	31,20	26,42	457,50	46,90	68,43	21,77	84,57
19	0,55	49,99	62,68	439,20	36,39	44,19	29,55	125,85
20	1,14	37,58	34,58	481,90	46,90	64,52	26,75	96,39
21	1,83	31,91	30,26	463,60	41,61	64,13	25,05	92,58
22	1,90	32,26	30,26	439,20	43,68	66,86	24,56	87,98
23	1,71	31,55	34,10	451,40	42,30	62,56	25,17	93,99
24	4,37	25,88	46,59	555,10	62,76	95,02	15,08	114,83
25	3,61	29,07	33,62	280,60	43,68	56,31	13,62	55,11
26	3,42	33,32	24,02	170,80	35,63	43,79	11,55	36,07
27	2,09	23,75	36,50	323,30	49,20	35,97	17,63	62,52
28	2,66	28,36	33,14	414,80	47,13	65,30	21,77	72,75
29	4,56	20,56	26,90	140,30	39,54	39,49	8,63	22,04
30	0,95	26,59	28,34	305,00	40,92	44,97	16,90	63,93
31	1,33	30,13	25,94	341,60	42,76	50,83	17,51	72,34
32	0,34	35,45	48,27	488,00	46,12	65,69	28,33	101,20
33	0,57	29,43	36,98	366,00	47,56	35,19	19,21	80,16
34	1,10	27,30	45,15	549,00	46,21	67,65	29,55	106,21
35	1,75	25,53	25,46	439,20	46,58	69,21	22,86	89,58
36	0,95	30,84	34,58	549,00	42,07	62,95	29,37	127,25
37	1,29	43,25	51,15	280,60	47,50	39,61	23,71	87,98
38	1,20	51,76	38,42	317,20	47,36	44,97	26,87	80,36
39	0,68	34,39	47,07	366,00	42,53	55,13	25,72	89,10
40	1,80	29,43	25,94	402,60	46,90	67,26	21,77	74,55
41	3,04	20,92	21,61	347,70	41,15	66,47	10,09	42,69

Campione	F⁻	Cl⁻	SO₄²⁻	HCO₃⁻	Na⁺	K⁺	Mg²⁺	Ca²⁺
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
42	1,82	12,05	20,17	305,00	34,49	42,23	10,65	59,32
43	0,61	37,93	55,72	414,80	50,58	18,77	32,35	106,81
44	0,40	49,99	56,68	433,10	52,19	32,06	24,81	122,64
45	1,16	40,42	71,09	542,90	87,59	38,71	30,40	110,42
46	0,34	34,03	78,77	494,10	82,53	1,56	19,70	143,09
47	0,35	44,67	44,67	286,70	47,01	4,69	17,15	100,00
48	0,85	49,28	78,43	408,70	62,53	23,85	22,01	120,24
49	0,89	44,67	85,98	512,40	64,67	42,74	30,89	135,87
50	0,95	45,38	87,18	524,60	65,29	44,19	30,89	135,27
51	0,31	23,75	39,39	402,60	35,40	3,32	22,01	120,64
52	0,49	38,25	53,15	408,70	48,74	20,72	28,58	107,61
53	0,38	56,37	83,57	506,30	57,70	43,79	29,31	159,12
54	0,38	29,07	44,67	347,70	40,69	19,36	20,43	106,81
55	0,87	14,89	43,23	378,20	25,75	8,21	20,55	115,23
56	1,29	41,12	31,56	384,30	48,74	64,52	21,16	83,97
57	0,52	30,13	62,92	311,10	39,31	6,49	17,51	90,58
58	0,28	17,02	31,22	292,80	16,32	4,54	12,95	99,60
59	0,57	31,20	48,51	384,30	33,27	5,47	15,08	121,04
60	0,13	33,32	120,08	390,40	43,34	5,47	22,73	136,27
61	0,17	98,20	162,34	457,50	78,17	2,35	34,66	183,97
62	0,57	24,11	17,77	201,30	26,67	3,91	17,75	44,09
63	0,53	38,64	19,69	335,50	42,07	1,96	21,02	99,60
64	0,51	309,85	80,69	951,60	223,92	211,15	37,33	196,59
65	0,38	28,36	79,25	506,30	42,07	1,96	15,56	179,16
66	0,47	34,03	21,13	262,30	40,46	7,70	18,00	77,35
67	0,46	19,85	30,74	372,10	34,03	4,69	12,52	117,84
68	1,14	48,57	46,59	378,20	81,15	25,03	21,28	87,98
69	0,57	36,87	33,62	341,60	46,44	5,08	15,56	105,81
70	1,52	29,78	44,19	347,70	46,21	30,50	15,81	89,78
71	1,14	30,13	38,42	274,50	45,98	51,22	19,94	52,71
72	1,33	34,03	33,62	329,40	45,29	57,87	22,86	82,97
73	1,52	28,36	29,78	311,10	42,99	59,44	18,73	68,14
74	0,95	36,16	42,27	402,60	41,15	57,09	24,32	92,58
75	1,33	28,01	29,30	366,00	43,34	61,00	18,97	69,74
76	1,33	29,07	31,22	329,40	54,03	38,71	10,82	66,33
77	1,71	34,03	33,14	305,00	51,73	64,52	22,13	61,52
78	0,95	31,20	27,86	494,10	43,68	65,30	29,31	114,03
79	1,52	36,87	47,07	732,00	65,06	68,04	34,78	176,35
80	0,57	21,98	27,38	408,70	38,85	11,73	20,92	102,81
81	1,14	32,62	74,93	402,60	63,22	50,05	28,70	94,59
82	0,95	49,63	50,43	378,20	44,60	41,84	26,75	111,82

Campione	F⁻	Cl⁻	SO₄²⁻	HCO₃⁻	Na⁺	K⁺	Mg²⁺	Ca²⁺
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
83	1,14	34,03	56,20	555,10	52,65	45,75	31,13	128,66
84	1,52	29,07	37,94	341,60	45,75	44,97	24,81	80,56
85	0,38	52,47	88,38	457,50	60,46	8,21	27,97	137,27
86	1,14	30,84	36,02	390,40	42,07	55,52	25,66	80,16
87	1,52	27,30	32,18	317,20	39,54	52,79	19,70	66,33
88	1,71	26,94	23,54	414,80	47,36	68,43	21,77	83,57
89	0,57	96,78	212,78	463,60	94,03	3,52	39,52	180,36
90	0,57	56,37	65,80	481,90	66,67	3,36	24,08	140,48
91	0,57	23,75	31,22	329,40	39,54	5,08	27,85	76,95
92	0,57	40,06	60,04	311,10	39,77	7,04	16,42	95,19
93	1,33	133,30	220,94	689,30	80,69	5,87	47,55	266,33
94	1,33	30,49	27,86	433,10	36,78	57,09	23,59	92,79
95	1,71	42,90	42,27	335,50	40,92	46,14	24,32	89,18
96	0,95	69,84	42,75	317,20	28,28	80,55	59,22	69,74
97	1,71	13,47	14,89	286,70	21,61	31,67	20,55	64,93
98	0,57	78,70	37,94	573,40	70,81	30,50	20,06	146,69
99	0,95	357,00	12,97	1708,00	382,55	96,97	79,04	201,20
100	2,47	30,49	27,86	201,30	37,93	48,88	12,40	41,08
101	0,38	57,08	0,82	1610,40	115,18	21,12	74,30	233,87
102	0,76	31,91	38,91	396,50	42,07	34,80	19,46	103,01
103	1,33	41,12	34,10	286,70	47,13	61,78	16,54	50,90
104	1,14	32,62	30,26	414,80	37,47	61,39	25,17	96,39
105	0,19	9,22	17,29	317,20	6,67	3,71	18,00	96,79
106	0,57	35,81	58,60	408,70	47,36	8,21	27,48	114,43
107	0,51	36,16	34,10	335,50	49,66	9,38	18,60	81,56
108	0,76	62,04	54,76	414,80	56,33	34,41	32,22	96,99
109	1,14	56,01	78,29	359,90	48,05	6,65	36,12	108,82
110	0,19	25,53	49,52	378,20	29,20	4,69	18,60	114,23
111	0,19	24,11	49,95	378,20	29,89	5,47	19,33	123,65
112	0,38	18,79	34,10	372,10	24,37	9,38	14,23	119,44
113	0,57	32,26	29,30	347,70	31,73	16,42	17,63	102,20
114	0,57	15,60	27,38	408,70	91,96	19,94	24,32	39,48
115	1,90	26,23	28,34	262,30	34,03	44,97	17,75	59,32
116	1,33	30,49	55,72	323,30	58,62	25,81	21,28	78,36
117	1,33	47,86	41,79	591,70	69,89	122,39	20,55	100,20
118	0,57	34,03	54,76	298,90	33,57	4,69	14,11	92,58
119	0,57	24,82	30,26	317,20	40,23	12,12	18,24	78,16
120	0,57	30,13	30,74	445,30	31,04	21,90	17,27	121,64
121	0,95	26,59	39,39	372,10	51,96	5,47	27,48	80,76
122	1,52	40,42	51,39	591,70	59,08	34,41	18,60	166,93
123	0,38	38,29	31,70	286,70	44,60	6,65	15,81	83,97

Campione	F⁻	Cl⁻	SO₄²⁻	HCO₃⁻	Na⁺	K⁺	Mg²⁺	Ca²⁺
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
124	0,44	23,04	67,72	298,90	49,66	13,29	24,08	65,53
125	1,71	30,84	23,05	262,30	46,21	50,44	11,80	54,31
126	1,52	20,92	22,57	353,80	48,51	49,66	14,84	66,93
127	0,57	25,88	30,74	250,10	48,51	9,78	18,00	57,51
128	0,63	29,43	26,90	250,10	42,76	7,43	16,17	65,73
129	1,90	26,94	33,14	274,50	49,43	46,14	12,40	54,31
130	1,52	18,44	57,16	433,10	57,93	53,96	18,73	88,78
131	0,28	7,09	17,29	347,70	4,60	1,56	17,88	106,01
132	0,95	73,39	33,62	640,50	90,35	48,49	30,40	140,68
133	0,95	24,11	27,38	262,30	38,39	25,42	8,27	68,54
134	1,14	20,56	23,54	225,70	35,63	34,02	14,35	42,89
135	1,33	28,20	29,30	298,90	37,50	56,80	15,60	56,50
136	0,17	32,40	63,30	201,30	38,60	5,12	20,80	60,80
137	0,55	15,10	16,80	298,90	13,70	11,20	15,60	82,60
138	0,20	32,90	21,10	286,70	34,10	5,72	12,60	78,50
139	2,56	33,90	52,50	500,20	43,00	68,20	11,70	135,00
140	2,36	29,40	47,90	439,20	42,50	57,10	10,00	116,00
141	1,46	23,70	19,50	341,60	30,50	40,30	9,77	81,50
142	0,27	22,20	18,60	256,20	42,80	8,15	13,40	55,50
143	0,27	33,50	53,80	414,80	51,80	15,60	26,40	102,00
144	0,79	24,10	41,00	420,90	93,10	17,80	20,30	60,40
145	0,57	52,82	61,72	347,70	50,35	5,08	37,21	90,78
146	1,08	27,65	82,13	713,70	71,96	109,49	20,55	188,78
147	1,79	50,34	159,46	683,20	68,74	103,23	21,04	191,34
148	0,49	101,75	43,23	433,10	91,96	4,69	20,67	123,83
149	0,49	74,80	67,24	481,90	68,05	3,91	23,83	147,29
150	0,48	120,89	37,75	457,50	106,44	4,30	18,97	129,98
151	0,63	61,69	131,60	408,70	69,77	44,03	22,61	134,01
152	0,66	61,76	126,32	414,80	63,65	43,40	23,10	135,07
153	0,47	41,83	37,32	335,50	37,01	26,41	17,84	102,40
154	0,69	24,11	52,79	335,50	51,34	15,56	15,69	90,38
155	0,78	43,93	121,23	396,50	55,64	6,76	29,05	132,36
156	0,76	45,63	128,24	372,10	53,11	3,68	24,81	127,76
157	0,93	166,19	160,81	957,70	131,07	102,84	45,48	244,05
158	0,74	363,74	348,22	1891,00	319,24	291,19	90,11	354,51
159	0,63	639,55	110,23	1671,40	546,70	185,34	71,87	220,20
160	0,00	742,01	115,27	1805,60	641,93	190,82	78,68	204,51
161	0,85	29,78	56,20	366,00	42,81	18,77	20,15	98,40
162	0,76	42,37	96,54	323,30	65,29	7,82	20,79	82,97
163	0,86	49,99	3,94	610,00	85,18	13,96	25,29	117,84
164	1,01	28,61	32,16	378,20	48,53	51,75	16,56	58,19

Campione	F⁻	Cl⁻	SO₄²⁻	HCO₃⁻	Na⁺	K⁺	Mg²⁺	Ca²⁺
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
165	1,60	160,00	40,00	817,40	168,00	44,30	32,50	121,00
166	1,13	36,46	50,50	390,40	57,81	24,17	13,56	73,78
167	1,21	75,60	55,10	549,00	105,00	31,30	16,40	89,90
168	1,31	112,00	50,70	695,40	132,00	16,20	35,20	104,00
169	0,34	114,00	96,00	603,90	69,80	3,12	44,30	139,00
170	0,31	94,10	22,00	561,20	88,70	6,39	24,80	102,30
171	3,26	82,30	9,33	445,30	63,50	59,60	16,90	64,80
172	0,66	27,80	22,13	323,30	39,08	21,24	12,29	57,79
173	0,70	35,10	61,00	317,20	39,80	4,96	23,40	66,20
174	0,81	24,50	33,90	329,40	42,60	13,70	13,80	61,00
175	1,62	77,89	20,98	219,60	46,69	28,93	7,09	51,00
176	2,15	56,32	18,57	237,90	42,69	31,41	8,15	45,83
177	0,06	23,29	37,03	219,60	35,97	4,88	13,79	44,94
178	0,32	33,00	60,90	463,60	39,70	2,59	23,00	108,00
179	1,11	112,15	28,04	329,40	43,63	25,14	26,00	81,60
180	1,41	113,77	32,49	317,20	32,10	36,37	28,00	82,50
181	0,68	39,56	36,69	268,40	39,23	11,64	13,80	57,40
182	0,15	19,09	57,27	420,90	43,52	0,37	9,95	113,08
183	0,58	25,40	48,30	524,60	54,30	36,80	22,60	85,90
184	1,08	20,65	43,35	353,80	41,27	40,52	16,83	71,87
185	1,03	23,18	24,69	170,80	38,90	19,28	4,23	33,62
186	0,63	156,84	24,14	1122,40	109,02	106,79	49,45	210,05
187	0,06	136,50	7,28	1122,40	96,79	17,86	85,54	182,21
188	0,41	53,10	91,10	463,60	76,10	2,24	52,40	95,00
189	0,36	26,97	15,95	335,50	40,80	8,95	20,36	70,60
190	0,30	24,50	27,26	292,80	46,20	5,30	22,30	60,50
191	0,25	29,50	73,40	378,20	37,90	1,95	22,30	125,00
192	0,83	669,95	85,63	1933,70	370,44	286,06	155,17	331,50
Acqua S. Paolo	1,14	49,07	134,15	1781,20	248,06	186,13	80,65	272,34
Cinema Metropolitan	n.d.	76,58	6,29	390,40	69,89	69,21	37,94	209,42
Hotel Plaza	n.d.	457,44	6,29	1414,77	399,34	178,23	57,12	210,00
Monopolio di Stato	n.d.	214,48	3,84	854,00	260,02	58,26	27,97	94,59
RS 1	0,76	62,96	34,58	660,63	48,55	31,40	32,58	161,88
RS 2	0,89	86,36	26,08	538,02	54,85	63,89	27,35	113,33
RS 3	0,87	24,28	13,69	741,15	43,77	61,59	20,76	134,27
RS 4	1,14	47,68	25,17	408,09	45,31	66,71	20,32	74,53
RS 5	1,86	70,19	25,12	273,28	30,09	41,10	10,34	84,17
RS 6	0,55	32,65	15,47	426,39	36,16	49,54	22,82	85,75
pozzo parioli	0,54	26,40	49,10	366,00	24,20	2,57	16,70	122,00
Tor Marancia 1	n.d.	31,40	57,80	493,62	67,10	65,30	39,90	86,40
Tor Marancia 2	n.d.	73,40	51,10	501,43	63,80	74,90	56,30	60,80

Campione	F⁻	Cl⁻	SO₄²⁻	HCO₃⁻	Na⁺	K⁺	Mg²⁺	Ca²⁺
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Tor Marancia 3	n.d.	33,70	47,90	861,41	65,40	66,30	35,90	232,00
Villa Ada 1	0,60	22,40	375,12	354,00	38,60	16,80	15,60	86,70
Villa Ada 2	n.d.	31,10	41,70	430,00	59,80	11,90	14,60	77,40
Villa Ada 3	n.d.	24,10	43,30	482,00	56,90	3,20	14,00	122,00
Villa Ada 4	n.d.	26,30	31,00	320,00	40,80	17,20	12,50	65,10
Villa Ada 5	n.d.	34,40	41,70	468,00	45,90	5,60	16,00	110,00

Tabella A2. Elementi maggiori nelle acque di sottosuolo dell'area urbana di Roma.

Campione	Li	B	Al	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
1	14,11	119,10	38,90	46,98	2,08	0,63	14,78	0,20	1,12	4,70	41,78
2	6,12	318,00	20,55	31,52	1,21	5,40	5,25	0,22	0,90	2,49	11,11
3	6,12	97,86	24,02	12,39	0,96	241,00	20,42	3,31	2,32	76,77	11,71
4	19,91	290,90	17,73	34,84	2,68	0,56	4,54	0,43	0,66	1,62	16,23
5	16,54	196,60	21,67	71,48	2,71	0,37	9,08	1,39	6,86	3,12	16,43
6	14,68	192,75	59,09	2,72	1,41	1,09	53,37	0,96	5,50	1,68	17,20
7	2,72	45,78	6,06	1,00	0,26	0,20	7,23	0,17	0,53	7,24	3,93
8	9,58	90,46	15,92	11,34	4,56	0,39	13,09	0,64	3,27	14,00	52,25
9	5,13	45,64	21,11	21,60	1,42	2,15	13,00	0,21	0,39	2,00	7,75
10	7,17	88,14	34,61	17,97	2,37	1,15	25,81	4,60	3,73	14,17	42,45
11	2,39	50,78	8,61	1,70	0,26	0,27	2,67	0,21	0,48	2,59	19,36
12	23,78	181,50	6,37	2,32	1,46	8,88	112,30	0,89	2,30	1,69	7,26
13	16,27	672,70	10,34	2,13	1,02	88,63	63,53	1,39	2,21	1,43	12,48
14	1,79	92,94	13,02	29,12	1,63	8,85	7,87	1,61	2,33	1,82	1492,00
15	13,80	181,10	9,43	39,86	1,66	0,69	6,90	0,25	0,69	1,15	18,26
16	9,11	190,90	6,81	34,33	1,49	0,31	6,09	0,29	0,54	4,19	19,05
17	17,86	223,20	14,44	39,93	1,42	0,41	9,90	0,28	2,54	4,61	13,65
18	26,01	203,60	19,08	33,44	1,30	0,63	4,90	0,27	0,87	2,12	6,27
19	6,25	113,70	9,31	35,21	2,17	0,38	9,37	0,44	0,64	3,64	10,04
20	12,31	185,30	10,96	45,44	2,02	0,76	28,51	0,45	0,91	6,20	13,20
21	13,98	164,10	31,58	40,72	1,59	0,62	7,70	0,36	4,10	3,93	49,87
22	16,24	149,90	24,54	2,47	0,89	0,65	7,07	0,33	0,41	0,22	4,37
23	11,49	169,00	14,80	37,79	1,48	2,03	96,61	0,39	0,78	0,79	6,37
24	45,28	381,40	5,68	11,90	0,78	499,70	267,80	0,53	0,34	1,65	51,32
25	16,38	197,20	3,57	39,82	1,11	1,94	4,48	0,23	0,38	1,69	19,30
26	13,17	110,30	7,86	42,37	1,35	0,33	4,58	0,15	0,27	1,16	13,28
27	8,43	162,60	2,90	32,81	1,07	0,71	6,23	0,26	0,87	5,95	17,46
28	15,31	222,30	12,42	39,32	1,60	0,26	6,15	0,29	0,63	7,46	8,48
29	5,79	66,65	18,47	59,19	1,06	5,15	12,97	0,18	2,13	2,14	54,56
30	4,95	107,30	3,76	29,72	1,61	0,43	4,45	0,31	0,31	1,67	4,60
31	13,75	155,90	7,65	37,88	3,28	0,73	5,32	0,37	0,38	2,78	55,71
32	8,73	187,10	42,53	30,50	2,28	1,28	8,19	0,45	1,37	4,68	24,06
33	3,82	112,70	14,11	24,58	1,53	29,98	15,46	18,61	6,93	7,25	11,94
34	12,62	171,70	106,20	33,83	1,81	4,54	26,79	0,60	3,60	11,83	23,21
35	28,52	256,40	25,47	33,43	1,56	0,79	10,23	0,31	0,56	3,19	96,62
36	16,32	215,50	19,06	40,36	1,57	1,19	42,52	0,47	0,53	1,37	3,92
37	9,58	182,80	9,29	45,57	1,86	0,30	5,03	0,42	0,64	35,20	31,62
38	10,31	109,40	7,64	44,74	1,93	0,48	20,58	0,47	2,24	7,07	86,11
39	10,98	190,10	13,87	35,70	3,20	0,54	3,26	0,42	0,73	1,69	4,10
40	23,12	224,80	17,26	47,08	1,63	1,18	3,95	0,29	0,52	7,32	136,47
41	46,56	199,00	7,06	34,05	0,90	23,44	4,84	0,28	0,25	1,72	10,71

Campione	Li	B	Al	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
42	12,92	85,17	13,01	44,56	2,29	23,69	25,51	0,33	0,69	1,15	7,94
43	28,06	180,00	6,10	7,87	1,52	0,29	5,29	0,52	0,84	2,61	11,46
44	17,83	198,60	7,15	3,79	1,64	0,67	7,79	0,50	0,71	1,24	26,52
45	52,67	325,50	9,04	6,25	1,12	141,20	2,77	1,29	1,74	1,49	2,98
46	4,49	96,78	17,85	3,47	4,48	1,20	15,43	0,70	3,23	4,38	5,96
47	17,14	85,73	2,94	7,09	1,81	12,70	10,31	0,32	0,75	0,41	5,62
48	58,65	440,80	6,80	9,65	1,19	0,25	5,01	0,37	0,73	0,51	1,53
49	34,09	245,40	14,62	10,71	0,83	2,60	9,28	0,51	2,53	2,63	55,33
50	34,74	249,50	13,58	5,18	0,82	1,11	6,73	0,62	2,57	2,50	37,57
51	6,23	68,19	25,61	1,82	2,12	1,80	9,84	0,65	6,05	3,53	12,26
52	27,16	157,30	12,83	3,87	0,94	5,03	6,68	0,88	6,93	1,05	3,71
53	4,84	173,10	5,40	33,01	1,70	0,27	4,84	0,52	1,00	3,80	16,08
54	9,84	108,10	7,16	20,58	2,14	0,29	4,63	0,40	0,64	0,91	4,51
55	21,66	156,30	10,35	45,08	1,57	0,26	1,95	0,25	0,27	1,78	4,12
56	7,48	45,00	7,65	4,77	0,76	167,60	770,10	0,86	1,76	11,28	41,50
57	34,06	96,37	2,84	0,25	0,72	48,86	20,66	0,26	0,34	0,51	22,24
58	3,88	41,66	9,46	2,62	1,43	2,09	4,79	0,30	0,39	0,95	2,90
59	19,34	97,39	6,34	0,23	0,78	491,50	168,20	0,37	1,29	0,42	5,66
60	23,23	100,50	3,85	0,18	0,69	150,70	10,67	0,55	0,73	0,35	7,89
61	1,00	138,10	5,20	3,80	0,77	739,40	17,47	0,93	5,12	0,84	7,80
62	9,73	58,06	16,55	23,66	1,46	1,19	5,44	0,22	1,12	0,61	1,96
63	4,52	40,10	7,25	23,09	0,72	301,20	5,83	0,37	0,32	0,46	59,70
64	646,80	4537,00	16,74	0,21	0,50	951,60	336,50	0,60	0,47	1,88	24,89
65	6,81	63,13	4,28	3,53	0,85	1,31	2,11	0,48	2,18	2,20	2,84
66	12,33	83,12	8,50	15,83	2,27	0,39	2,75	0,26	0,62	2,04	11,57
67	9,98	77,77	5,76	10,23	1,25	0,27	3,51	0,38	0,51	7,18	5,76
68	28,25	195,30	5,36	48,97	2,60	0,25	8,06	0,44	0,93	0,64	2,62
69	11,55	80,54	5,72	10,54	1,90	0,35	2,17	0,32	0,41	1,69	17,07
70	58,24	323,20	10,89	2,99	1,01	3,75	4,87	0,37	1,21	1,06	10,02
71	12,16	89,29	5,48	43,46	1,62	0,93	12,91	0,51	0,70	7,20	14,68
72	21,47	149,50	16,92	41,34	1,32	4,13	26,18	0,25	0,22	0,86	3,14
73	21,30	138,40	9,55	41,37	1,37	0,37	3,41	0,51	0,30	0,88	1,72
74	13,40	170,80	9,63	41,84	1,46	2,44	3,73	0,24	0,25	1,01	1,74
75	19,57	143,30	14,03	42,14	1,22	3,29	6,47	0,21	0,31	1,08	4,90
76	77,97	405,00	12,85	0,10	0,49	79,57	53,53	0,13	0,17	0,23	39,89
77	11,96	130,60	34,47	47,22	1,36	1,18	8,69	2,15	1,86	3,37	12,63
78	10,94	173,10	37,80	38,10	1,49	1,00	8,72	0,39	2,14	1,60	15,14
79	54,09	438,10	28,49	29,03	2,30	4,47	56,28	3,26	1,43	5,15	21,18
80	8,48	179,00	30,39	0,28	1,23	558,40	101,40	0,64	1,90	72,41	3,44
81	27,96	49,39	8,92	70,93	1,77	2,35	23,92	0,26	0,59	5,04	19,85
82	7,22	174,60	75,70	59,06	2,84	4,32	14,55	1,15	1,78	3,48	3,68

Campione	Li	B	Al	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
83	38,62	255,20	7,98	41,88	0,99	1,48	4,63	0,90	0,45	0,72	4,31
84	9,45	175,60	5,47	65,18	3,27	0,24	3,45	0,32	0,44	0,81	2,08
85	17,73	215,60	14,96	1,53	0,60	0,81	7,99	0,38	1,46	1,57	8,24
86	10,53	151,90	10,61	35,09	1,22	0,39	17,06	0,18	0,21	0,95	321,30
87	10,85	110,50	5,95	41,07	1,40	0,20	5,90	0,15	0,17	1,33	3,85
88	32,80	230,40	21,06	39,01	1,11	0,83	9,89	0,18	0,31	2,77	6,74
89	17,22	111,60	5,07	8,51	2,78	0,98	66,34	0,87	4,24	1,81	66,56
90	25,96	85,65	10,47	1,71	1,13	0,34	4,85	0,54	1,62	1,39	6,09
91	16,04	88,40	4,76	20,87	0,97	0,76	14,80	0,20	1,19	4,01	22,68
92	31,33	85,36	4,13	0,55	0,67	176,30	10,66	0,27	0,71	2,19	5,95
93	3,39	218,00	6,31	0,93	0,91	699,90	527,00	2,19	4,81	4,36	41,65
94	9,99	151,90	17,63	39,00	1,16	2,38	6,82	0,19	0,72	1,93	31,08
95	11,95	137,30	5,78	45,40	1,64	0,32	3,77	0,20	0,21	4,26	4,14
96	8,98	124,10	6,57	37,64	1,50	0,48	5,23	0,30	0,71	1,45	30,49
97	7,77	53,89	7,26	39,48	1,24	0,52	4,99	0,16	0,31	3,19	20,27
98	39,86	729,70	4,37	0,10	0,59	1911,00	2002,00	0,28	0,43	0,16	44,51
99	156,20	1840,00	5,17	0,17	0,24	287,40	308,10	0,65	1,25	0,88	9,78
100	17,74	146,50	8,22	42,52	1,31	0,59	4,59	0,08	0,29	3,13	45,20
101	13,49	347,40	23,29	1,48	0,56	291,40	5407,00	0,78	3,33	1,66	4,65
102	8,48	155,30	50,02	9,64	1,20	43,58	37,42	0,21	0,41	3,83	18,22
103	8,44	143,20	7,07	66,23	1,58	2,72	8,41	0,13	0,65	1,41	27,07
104	10,94	132,60	27,83	39,98	2,09	0,68	4,30	0,19	0,27	9,72	26,73
105	3,23	45,43	9,74	1,17	1,52	0,17	2,68	0,17	0,38	1,57	2,45
106	22,63	176,70	5,98	0,41	0,87	2,26	17,95	0,56	2,42	8,88	103,40
107	20,88	127,90	5,23	2,59	0,76	9,72	6,37	0,15	0,58	0,87	304,00
108	6,07	111,70	14,54	27,07	1,03	0,97	4,61	0,65	0,91	1,28	4,30
109	33,14	113,20	5,42	29,97	1,62	2,86	5,20	0,21	2,95	0,78	3,20
110	8,50	44,84	4,87	12,78	1,59	0,12	1,99	0,31	0,75	0,88	2,62
111	8,83	45,43	3,72	14,31	1,47	6,21	75,75	0,27	1,06	2,18	8,97
112	6,47	40,12	3,46	13,68	1,50	11,89	19,66	0,26	0,93	0,63	7,69
113	7,65	82,87	5,15	32,52	1,53	0,05	1,90	0,33	1,94	0,54	129,60
114	19,15	169,50	24,10	48,54	2,26	0,34	10,48	4,30	0,90	1,83	13,55
115	9,31	82,59	5,56	48,99	1,48	0,13	3,57	0,25	0,40	0,87	6,42
116	13,94	138,30	5,38	64,16	2,23	0,05	1,26	0,33	0,57	2,13	11,30
117	247,20	1889,00	5,46	0,76	0,81	220,10	6,97	0,40	1,41	0,53	5,50
118	25,80	79,15	4,60	6,79	0,78	59,70	60,15	2,40	7,35	0,26	7,29
119	15,36	178,40	11,56	10,32	1,52	0,57	4,92	0,53	0,40	0,56	73,86
120	0,48	234,60	8,10	46,51	1,21	17,12	5,73	1,05	2,37	1,43	4,31
121	9,93	114,40	4,53	27,43	2,90	0,05	1,56	0,19	0,18	0,89	5,93
122	52,87	586,90	12,16	1,72	1,29	2,90	3,32	0,39	0,47	0,16	2,07
123	11,72	75,26	4,31	13,75	2,31	1,35	3,67	0,21	0,44	0,88	120,20

Campione	Li	B	Al	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
124	48,93	178,80	5,31	11,34	1,13	5,12	2,09	0,16	0,76	2,90	8,59
125	21,70	128,50	6,91	49,98	2,45	2,34	21,97	0,19	0,28	0,97	16,21
126	14,50	138,20	5,38	45,31	1,48	9,28	21,92	0,20	0,22	1,26	7,61
127	20,84	94,25	6,29	28,84	1,81	0,05	1,76	0,15	0,10	0,41	3,61
128	13,92	68,87	5,33	21,79	1,93	7,42	16,46	0,17	0,18	5,18	2,61
129	13,04	131,30	5,80	47,48	2,22	0,08	1,68	0,17	0,42	0,48	302,80
130	19,03	138,20	4,59	45,45	0,91	0,84	1,81	0,24	0,63	0,55	1,80
131	1,22	16,56	6,56	1,88	1,10	0,55	3,27	0,23	1,16	6,70	7,65
132	95,59	841,50	4,39	0,32	0,73	517,80	5472,00	0,35	0,43	0,12	1,31
133	2,70	76,89	6,36	28,45	1,28	2,27	13,84	0,17	0,39	0,72	3,25
134	6,26	72,59	5,44	39,58	1,27	12,71	8,80	0,16	0,28	0,48	1,53
135	12,55	169,90	6,30	39,59	1,45	0,15	1,97	<0,05	0,18	1,89	17,96
136	7,28	53,03	7,06	14,47	1,57	5,06	10,29	<0,05	0,76	8,55	95,71
137	9,59	133,50	6,12	1,33	1,16	0,32	2,88	<0,05	0,33	3,16	112,60
138	11,28	74,18	4,76	13,07	1,80	18,02	2,17	<0,05	0,35	0,92	10,25
139	46,47	169,70	4,92	0,47	0,78	975,70	726,70	0,56	0,98	0,64	15,33
140	50,33	151,80	6,84	0,26	1,08	520,10	307,70	0,04	0,28	0,26	4,20
141	15,35	103,80	8,39	37,80	2,44	2,38	6,63	<0,05	0,46	0,69	7,91
142	16,30	78,03	7,94	26,90	1,99	0,75	6,68	<0,05	0,26	0,82	126,50
143	32,39	179,50	3,97	23,64	0,86	11,00	1,83	<0,05	0,68	3,57	4,46
144	20,22	186,30	6,18	54,00	1,92	0,55	4,59	0,25	0,45	0,85	65,16
145	10,93	70,34	9,93	19,18	1,75	2,61	8,72	0,38	1,80	1,58	764,77
146	145,88	879,54	16,15	0,99	1,20	415,90	19260,78	0,48	0,70	0,50	51,85
147	139,42	813,41	8,45	3,60	1,12	150,76	348,11	0,40	1,00	0,17	29,97
148	12,08	81,61	7,82	0,72	1,03	0,79	44,47	2,04	8,92	1,97	16,42
149	15,57	63,23	12,12	0,81	1,13	1,33	16,89	1,26	4,01	1,63	18,07
150	9,91	68,39	6,82	0,86	1,10	0,32	5,99	1,83	4,71	0,61	13,88
151	7,92	241,54	5,54	24,30	2,47	0,36	40,16	0,44	7,46	1,21	11,93
152	8,93	206,86	5,54	32,80	2,21	0,35	32,72	0,47	0,46	2,47	190,32
153	3,92	60,89	6,22	28,71	2,15	0,06	1,90	0,36	0,20	2,25	1,32
154	6,23	83,49	5,45	33,53	2,14	7,95	10,33	0,31	2,57	2,68	110,05
155	24,54	67,53	5,35	0,43	1,17	0,74	4,40	0,28	0,68	0,49	27,06
156	18,50	41,66	6,44	1,16	1,64	0,87	5,51	0,30	0,65	0,50	56,14
157	233,96	2528,97	6,99	0,39	0,91	953,34	4203,07	0,84	0,49	<0,1	15,23
158	900,24	7489,36	6,64	0,10	0,23	765,66	1814,86	1,14	0,95	0,11	17,15
159	836,86	6439,67	9,33	1,29	1,22	323,21	22,29	0,45	<0,5	<0,1	1,04
160	1031,38	7162,68	9,71	1,79	1,20	340,31	48,43	0,48	<0,5	<0,1	<1
161	46,42	132,70	7,74	4,07	1,84	1,74	4,92	0,34	0,28	0,40	3,55
162	22,97	78,82	6,55	10,05	1,05	7,05	20,37	0,21	1,92	0,56	14,51
163	5,64	220,22	10,24	0,46	1,42	1004,20	5986,32	0,63	0,75	0,13	250,05
164	20,60	204,29	17,44	50,32	1,99	0,72	6,05	0,12	0,15	<0,1	2,34

Campione	Li	B	Al	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Tor Marancia 3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Tabella A3. Elementi minori ed in tracce nelle acque di sottosuolo dell'area urbana di Roma.

Campione	As	Se	Rb	Sr	Mo	Cd	Ba	Pb	U	SiO₂
	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l
1	15,60	0,19	95,41	1296	2,20	0,034	149,80	1,21	4,67	74,28
2	15,42	0,77	66,10	460	3,60	0,016	29,97	0,69	1,96	30,91
3	13,12	0,03	55,18	456	3,20	0,056	20,99	11,91	3,85	32,09
4	11,90	1,34	36,80	1365	2,33	0,014	117,30	0,17	16,01	56,73
5	12,37	1,37	34,29	876	0,92	0,010	9,36	0,30	9,51	40,71
6	3,72	0,23	20,71	881	0,62	0,076	128,00	0,67	4,72	27,11
7	1,25	<0.1	7,57	203	0,19	<0.05	10,18	4,18	1,02	4,98
8	3,77	1,38	97,25	791	11,10	0,066	31,52	0,89	5,09	29,03
9	10,73	0,19	34,04	364	3,54	<0.05	41,78	0,25	2,95	26,43
10	8,23	0,77	39,24	504	4,00	<0.1	25,97	1,07	4,10	29,04
11	1,18	0,08	10,12	215	0,40	<0.05	9,82	0,19	0,96	6,79
12	5,24	1,61	25,21	847	0,61	<0.05	280,70	0,15	8,81	46,10
13	1,04	3,22	15,07	1283	0,80	<0.05	192,90	0,21	10,90	31,21
14	8,67	0,77	41,06	822	2,65	<0.05	30,78	0,28	2,00	45,62
15	13,99	0,37	102,70	1383	2,30	0,025	186,50	0,16	3,24	75,03
16	10,79	0,37	97,64	1566	1,71	0,016	260,00	0,21	8,45	62,04
17	13,29	0,42	115,20	1941	1,48	0,026	206,80	0,35	3,28	81,98
18	14,34	0,45	98,85	1593	0,77	0,023	83,17	0,23	1,31	93,57
19	9,42	0,29	84,69	1512	0,76	0,022	363,50	0,35	12,12	65,74
20	13,92	0,40	120,90	1858	1,34	0,024	245,20	0,32	12,69	81,09
21	13,07	0,50	95,46	1886	1,02	0,036	102,90	0,62	7,24	86,62
22	15,45	0,55	87,31	1946	0,10	0,017	103,80	0,11	3,59	90,77
23	12,08	0,56	100,40	1746	0,98	0,016	142,30	0,15	10,29	84,78
24	63,86	0,13	120,10	935	2,64	<0.020	62,01	0,10	2,80	65,40
25	20,07	0,50	91,09	1017	2,66	0,015	149,70	0,12	2,49	72,67
26	20,34	0,43	64,21	853	1,31	<0.020	73,86	0,15	0,63	83,83
27	12,48	0,67	70,91	1297	1,92	<0.020	206,80	0,17	13,65	67,14
28	16,44	0,49	116,30	1503	2,01	<0.020	170,40	0,29	5,73	76,35
29	20,77	0,22	37,27	504	0,65	0,128	33,64	0,61	2,11	79,43
30	9,68	0,60	117,60	1231	0,74	<0.020	84,85	0,11	7,46	67,14
31	16,85	0,32	90,53	1129	1,61	0,040	90,52	0,26	8,15	63,97
32	8,74	0,25	112,30	1961	0,64	0,113	64,62	0,50	13,22	76,86
33	7,36	0,31	139,60	1640	1,63	0,109	230,10	0,75	11,02	57,13
34	11,14	0,32	111,70	2182	1,36	0,201	241,20	1,30	11,52	90,09
35	17,33	0,32	99,98	1535	0,81	0,066	117,50	0,20	0,81	89,95
36	12,31	0,33	146,20	2042	0,91	0,021	156,90	0,17	14,53	76,51
37	15,79	0,48	69,33	1571	2,38	0,020	132,80	1,56	20,60	56,25
38	15,01	0,43	75,01	1472	1,99	0,060	118,80	0,26	17,43	69,38
39	10,98	0,26	118,20	1815	0,83	0,019	89,59	0,17	12,17	72,69
40	16,88	0,25	122,90	1857	1,65	0,027	323,10	0,36	0,20	80,83
41	29,20	1,09	91,83	956	2,78	0,012	117,30	0,11	8,22	53,64

Campione	As	Se	Rb	Sr	Mo	Cd	Ba	Pb	U	SiO₂
	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l
42	19,16	0,24	87,36	1093	1,54	0,015	96,29	0,37	0,93	66,64
43	4,29	1,82	21,62	1329	2,81	0,012	137,90	0,18	18,17	37,48
44	2,49	1,01	16,67	1224	2,94	0,012	144,90	0,17	9,83	35,79
45	5,04	2,32	29,06	1204	7,99	0,021	135,30	0,15	48,49	41,43
46	1,26	0,52	3,96	416	0,21	0,030	115,10	0,54	2,79	33,85
47	20,94	1,64	7,16	682	0,50	<0.05	51,66	0,16	6,27	60,05
48	2,40	1,62	30,14	821	2,08	<0.05	69,89	0,18	17,65	41,72
49	7,02	0,86	29,34	1280	2,99	<0.05	155,20	0,40	21,86	42,69
50	6,36	0,87	29,60	1299	2,93	0,020	164,60	0,35	21,64	44,95
51	1,42	0,48	11,09	479	0,41	0,192	107,00	0,56	2,27	25,98
52	3,77	3,00	16,35	930	3,99	0,025	106,60	0,24	20,20	42,01
53	7,62	1,15	60,93	1223	2,72	<0.05	33,40	0,23	13,38	45,01
54	10,47	1,61	23,95	722	3,21	<0.05	90,03	0,17	9,38	44,04
55	13,31	0,42	85,71	1785	1,33	<0.05	155,50	0,20	5,07	86,03
56	14,50	0,18	9,81	535	0,61	0,021	98,86	0,81	4,73	40,52
57	12,00	0,01	20,01	629	1,64	0,031	70,41	0,11	0,25	45,75
58	1,31	0,32	7,39	411	0,59	<0.05	61,59	0,18	1,26	17,24
59	6,70	0,01	30,41	566	0,85	<0.05	101,60	0,12	0,04	33,60
60	0,42	0,09	17,97	667	1,00	<0.05	101,90	0,10	0,71	35,78
61	1,01	0,12	26,34	885	1,23	0,028	113,20	0,20	5,64	29,83
62	6,43	0,16	32,28	399	0,38	<0.05	67,69	0,29	3,45	65,46
63	7,70	0,12	14,02	822	1,04	<0.05	154,60	0,14	7,14	69,22
64	3,35	0,02	445,90	1849	0,35	<0.05	113,00	0,23	0,05	37,82
65	0,74	0,51	5,77	731	0,19	<0.05	180,90	0,20	10,28	25,06
66	4,06	0,52	37,85	475	0,39	0,025	95,85	0,20	1,60	69,32
67	10,24	0,30	12,07	715	0,58	<0.05	44,77	0,18	4,05	37,37
68	12,97	0,60	45,40	669	0,81	<0.05	135,00	0,19	14,12	41,49
69	7,39	0,63	19,97	846	0,53	<0.05	82,79	0,28	5,84	43,79
70	6,33	0,69	71,17	676	1,01	0,030	63,58	0,28	2,18	37,65
71	13,92	0,25	54,87	685	0,72	<0.05	38,31	0,22	10,05	70,71
72	12,44	0,32	93,89	1692	0,75	<0.02	173,50	0,19	7,01	80,39
73	12,00	0,31	87,35	1450	0,81	<0.02	157,00	0,11	2,52	86,00
74	10,75	0,24	99,75	1646	1,02	<0.02	103,50	0,16	13,15	75,85
75	12,15	0,27	88,66	1360	0,79	<0.02	150,40	0,19	2,34	87,43
76	3,86	0,10	28,72	700	1,15	<0.02	104,60	0,14	0,01	25,16
77	10,85	0,17	44,04	1246	0,44	0,031	29,19	0,42	12,77	69,42
78	8,05	0,31	122,00	2192	0,80	0,024	114,90	0,41	12,22	83,41
79	8,10	0,80	82,41	1979	1,68	<0.02	71,85	0,51	5,52	75,67
80	1,20	0,54	16,40	793	1,65	<0.02	81,35	0,29	5,32	22,97
81	19,73	0,41	76,40	1261	0,23	0,028	175,20	0,22	44,10	58,55
82	16,02	0,59	77,28	1250	2,13	0,041	120,00	0,56	25,37	56,47

Campione	As	Se	Rb	Sr	Mo	Cd	Ba	Pb	U	SiO₂
	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l
83	12,81	3,87	61,14	1276	1,58	<0.02	141,20	0,20	45,97	54,07
84	17,72	0,41	81,20	1145	1,80	<0.02	91,85	0,14	31,52	61,44
85	0,43	0,74	14,10	996	0,46	<0.02	149,70	0,20	5,36	26,95
86	9,46	0,27	86,46	1360	0,45	<0.02	67,77	0,17	26,13	72,92
87	12,28	0,31	92,07	1279	0,71	<0.02	56,80	0,78	12,87	70,78
88	13,35	0,21	128,70	1700	1,01	<0.02	168,50	0,27	0,86	88,48
89	3,89	1,19	12,88	1118	0,69	<0.02	149,30	0,22	26,46	35,38
90	0,69	0,76	4,10	972	0,58	<0.02	224,20	0,22	9,17	37,08
91	8,81	0,23	43,91	904	0,32	<0.02	409,90	0,50	12,17	63,01
92	15,33	0,10	20,84	650	1,47	0,033	122,00	0,17	0,42	42,15
93	1,25	0,20	8,54	1549	0,86	0,031	124,70	0,17	15,58	21,33
94	8,42	0,26	115,30	1780	0,82	0,025	69,21	0,58	5,74	90,00
95	13,25	0,41	76,22	1464	0,67	<0.02	104,70	0,25	13,56	74,19
96	8,84	0,81	84,81	1481	0,87	0,037	109,10	0,22	10,04	68,24
97	11,22	0,24	49,85	975	1,49	<0.02	71,37	0,18	9,54	52,23
98	22,82	0,10	75,59	1001	0,99	<0.02	500,90	0,12	0,38	43,21
99	0,32	0,07	80,64	2217	0,28	0,038	529,00	0,23	0,05	46,17
100	16,82	0,26	74,29	889	2,48	0,024	87,14	0,23	1,58	64,70
101	1,03	0,09	24,82	2970	0,26	0,030	959,10	0,32	0,08	29,20
102	7,44	0,29	47,27	731	0,91	<0.01	36,47	0,54	3,23	31,71
103	7,82	0,19	26,35	1824	0,84	<0.01	123,50	0,15	6,72	57,72
104	9,43	0,29	84,04	1724	1,04	0,020	173,50	0,25	6,62	73,19
105	0,67	0,20	8,35	325	0,83	<0.01	57,84	0,23	0,64	5,41
106	0,37	1,25	5,60	894	0,77	0,011	147,40	0,51	8,85	22,24
107	0,92	0,13	11,52	722	0,22	0,004	139,40	0,14	2,18	40,66
108	8,42	<0.1	69,49	1482	3,67	0,012	166,50	0,19	32,05	49,75
109	6,02	0,25	58,99	863	0,63	0,011	126,60	0,14	10,44	58,99
110	8,89	0,56	15,01	634	1,68	0,105	102,90	0,29	41,97	45,84
111	16,83	1,62	19,66	666	1,31	0,028	100,10	0,42	64,98	41,89
112	16,99	0,49	26,87	843	1,25	<0.02	179,00	0,13	4,63	44,79
113	12,79	0,29	37,01	820	1,80	0,016	66,59	0,51	5,58	45,96
114	19,05	0,30	56,91	694	0,72	0,023	102,70	0,51	9,95	55,61
115	15,70	0,16	61,97	982	1,01	0,011	87,35	0,16	7,99	65,34
116	25,93	0,34	48,07	930	0,50	<0.02	147,00	0,18	9,21	50,79
117	13,04	<0.1	200,40	913	3,54	<0.02	262,30	0,11	0,28	33,05
118	14,06	6,65	8,32	661	2,15	<0.02	73,48	0,10	34,29	35,92
119	9,49	0,13	16,65	937	0,20	0,016	151,10	0,51	5,77	56,91
120	12,43	0,29	28,99	1264	0,82	<0.02	323,50	0,19	7,03	44,32
121	10,38	0,18	26,48	585	0,56	<0.02	48,89	0,11	13,41	50,70
122	5,24	0,67	39,51	1085	0,62	<0.02	100,80	0,10	4,09	41,59
123	3,58	0,13	28,58	883	0,19	<0.02	149,90	0,72	3,39	63,73

Campione	As	Se	Rb	Sr	Mo	Cd	Ba	Pb	U	SiO₂
	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l
124	6,99	0,39	22,57	871	2,23	0,013	146,80	0,17	19,86	41,56
125	23,44	0,23	63,83	686	1,23	<0.02	71,12	0,13	9,58	49,75
126	19,59	<0.1	67,44	1019	1,24	<0.02	143,00	0,10	18,84	47,83
127	10,50	0,23	33,01	459	0,30	<0.02	53,22	0,10	4,22	61,72
128	7,91	0,31	31,28	451	0,26	<0.02	77,03	0,11	3,95	57,03
129	20,17	0,23	60,81	678	1,46	<0.02	29,65	0,46	10,70	49,58
130	16,91	<0.1	78,78	1281	2,06	<0.02	84,21	0,11	36,02	51,52
131	0,80	0,24	3,64	311	0,82	<0.02	35,87	0,18	0,91	7,15
132	22,39	<0.1	30,41	1370	1,35	<0.02	205,10	0,09	3,10	35,56
133	10,33	0,14	52,60	754	0,45	<0.02	73,30	0,12	1,27	62,90
134	13,01	0,16	57,49	869	0,79	<0.02	100,00	0,11	10,21	61,68
135	11,76	0,26	101,10	1492	1,78	<0.05	161,50	0,25	1,95	77,61
136	2,75	0,18	42,46	740	0,27	<0.05	196,50	0,74	5,10	76,25
137	1,23	0,11	33,30	398	0,73	<0.05	53,19	0,35	1,01	4,84
138	3,22	0,48	34,25	572	0,40	<0.05	140,30	0,13	2,44	65,53
139	2,48	<0.1	62,48	852	1,62	<0.05	115,40	0,11	1,52	63,56
140	0,55	<0.1	58,17	666	0,96	<0.05	115,50	0,18	0,46	63,78
141	16,76	0,36	55,80	867	1,92	<0.05	64,13	0,34	5,01	70,06
142	9,49	0,16	35,14	393	0,25	<0.05	46,56	0,34	2,78	69,58
143	22,24	4,01	17,24	855	1,43	<0.05	31,64	0,16	14,33	55,84
144	20,90	0,44	62,62	713	0,71	<0.05	92,44	0,17	12,88	59,85
145	25,62	0,21	46,57	851	0,86	0,038	98,12	0,60	16,94	66,59
146	<5	0,37	121,41	1378	1,51	0,026	104,90	0,41	0,65	48,58
147	<5	<0.1	115,19	1419	2,41	<0.01	103,12	0,20	1,18	50,80
148	<5	0,46	3,27	906	0,39	0,015	333,68	0,37	5,37	24,23
149	<5	1,08	4,13	913	0,34	0,013	291,29	2,17	5,05	26,37
150	<5	0,32	3,56	883	0,45	<0.01	356,66	0,29	7,49	26,82
151	4,69	1,43	58,06	859	3,10	0,019	14,54	0,20	6,50	31,68
152	8,71	1,27	50,67	879	3,72	<0.01	23,81	0,19	7,58	32,77
153	5,26	0,74	44,17	699	2,89	<0.01	22,44	0,49	4,09	38,12
154	8,33	0,63	44,29	571	3,49	<0.01	43,17	0,15	8,25	43,55
155	<5	1,40	5,55	984	1,07	<0.01	113,13	0,16	11,28	28,73
156	<5	1,55	3,21	866	0,94	<0.01	149,66	0,17	12,32	27,51
157	<5	<0.1	134,27	1864	0,59	<0.01	247,49	0,18	0,55	45,39
158	<5	<0.1	353,51	3979	0,60	<0.01	110,21	0,06	0,30	59,08
159	<5	29,46	298,93	2873	<0.1	<0.01	143,44	0,11	0,02	45,18
160	<5	6,37	358,88	3101	<0.1	<0.01	247,15	0,08	0,02	37,69
161	<5	1,34	23,30	708	2,05	<0.01	49,05	0,27	6,38	41,99
162	<5	<0.1	28,64	679	5,16	0,012	86,72	0,15	34,37	22,05
163	603,60	<0.1	18,88	2111	1,11	<0.01	597,65	0,29	0,04	47,14
164	15,00	0,37	91,93	1756	0,95	<0.03	139,50	0,12	5,89	83,38

Campione	As	Se	Rb	Sr	Mo	Cd	Ba	Pb	U	SiO₂
	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l
Villa Ada 1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Tabella A3. Elementi minori ed in tracce nelle acque di sottosuolo dell'area urbana di Roma.

Campione	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Trizio	$\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$	$\delta^{18}\text{O}$	δD	log PCO₂	Total Carbon
		U.T.	‰ vs.PDB	‰ vs.SMOW	‰ vs.SMOW	bar	mmol/kg
1	n.d.	n.d.	-7,30	-6,00	-39	-1,37	5,00
2	n.d.	n.d.	-9,94	-5,71	-37	-2,56	4,81
3	n.d.	n.d.	-9,53	-8,11	-51	-2,09	6,81
4	n.d.	n.d.	-14,01	-7,18	-45	-1,56	7,81
5	n.d.	n.d.	-14,34	-7,07	-45	-1,68	7,20
6	n.d.	n.d.	-10,84	-6,32	-40	-1,76	7,01
7	n.d.	n.d.	-9,43	-4,28	-28	-1,68	6,01
8	n.d.	n.d.	-8,07	-8,07	-48	-2,21	4,00
9	n.d.	n.d.	-8,98	-6,64	-43	-3,33	2,71
10	n.d.	n.d.	-12,75	-6,89	-42	-2,45	4,00
11	n.d.	n.d.	-11,64	-5,93	-38	-1,62	6,71
12	n.d.	n.d.	-19,38	-7,80	-47	-1,48	6,61
13	n.d.	n.d.	-12,12	-7,90	-51	-1,54	7,81
14	n.d.	n.d.	-21,58	-7,30	-44	-1,80	5,81
15	n.d.	n.d.	-4,52	-5,43	-33	-1,16	6,20
16	n.d.	n.d.	-7,85	-5,19	-32	-1,26	6,00
17	n.d.	n.d.	-2,69	-5,20	-30	-1,10	6,61
18	n.d.	n.d.	0,93	-5,75	-32	-0,92	7,51
19	n.d.	n.d.	-8,19	-6,25	-37	-1,17	7,20
20	n.d.	n.d.	-1,10	n.d.	n.d.	-0,94	7,91
21	n.d.	n.d.	0,48	-5,94	-38	-0,92	7,61
22	n.d.	n.d.	0,85	-6,22	-34	-0,93	7,20
23	n.d.	n.d.	0,00	-6,20	-36	-0,93	7,40
24	0,71057	1,27	-1,94	-5,38	-30	-1,13	9,11
25	n.d.	n.d.	-6,60	-5,84	-31	-1,65	4,61
26	n.d.	n.d.	-8,64	-5,81	-34	-1,53	2,81
27	n.d.	n.d.	-11,71	-5,54	-32	-1,50	5,30
28	n.d.	n.d.	-2,23	-5,85	-32	-1,00	6,81
29	n.d.	n.d.	-6,08	-5,94	-36	-1,73	2,30
30	n.d.	n.d.	-8,95	-6,88	-40	-1,38	5,00
31	n.d.	n.d.	-8,22	-6,32	-40	-1,37	5,61
32	n.d.	n.d.	-0,93	-6,06	-38	-0,87	8,00
33	n.d.	n.d.	-14,45	-6,37	-40	-1,35	6,00
34	0,71029	2,67	2,31	-5,77	-36	-0,78	9,00
35	n.d.	n.d.	1,04	-5,61	-34	-0,89	7,20
36	n.d.	n.d.	0,82	-5,91	-37	-0,89	9,01
37	n.d.	n.d.	-12,92	-7,04	-45	-1,69	4,61
38	n.d.	n.d.	-13,30	-7,21	-46	-1,51	5,20
39	n.d.	n.d.	-1,58	-6,04	-37	-1,07	6,01
40	n.d.	n.d.	-0,76	-5,45	-34	-1,02	6,61
41	n.d.	n.d.	-5,86	-5,66	-31	-1,81	5,71

Campione	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Trizio	$\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$	$\delta^{18}\text{O}$	δD	log PCO_2	Total Carbon
		U.T.	‰ vs.PDB	‰ vs.SMOW	‰ vs.SMOW	bar	mmol/kg
42	n.d.	n.d.	-8,99	-7,44	-45	-1,74	5,00
43	n.d.	n.d.	-12,26	-7,22	-43	-1,76	6,81
44	n.d.	n.d.	-14,91	-7,33	-45	-1,54	7,10
45	n.d.	n.d.	-7,87	-6,68	-40	-1,35	8,91
46	n.d.	n.d.	-14,11	-7,49	-45	-1,32	8,11
47	n.d.	n.d.	-13,44	-6,31	-37	-1,90	4,71
48	n.d.	n.d.	-8,70	-7,19	-44	-1,53	6,71
49	n.d.	n.d.	-9,72	-6,75	-40	-1,47	8,40
50	n.d.	n.d.	-10,03	-6,76	-40	-1,48	8,62
51	n.d.	n.d.	-10,43	-7,83	-47	-1,54	6,61
52	n.d.	n.d.	-10,72	-7,79	-47	-1,59	6,71
53	n.d.	n.d.	-14,98	-7,53	-44	-1,48	8,30
54	n.d.	n.d.	-11,57	-8,15	-49	-1,73	5,71
55	n.d.	n.d.	0,28	-7,80	-49	-1,07	6,20
56	n.d.	n.d.	-9,43	-6,01	-35	-1,69	6,30
57	n.d.	n.d.	-13,18	-6,26	-38	-2,15	5,10
58	n.d.	n.d.	-9,39	-7,28	-45	-2,68	4,81
59	n.d.	n.d.	-13,37	-6,19	-36	-1,68	6,30
60	n.d.	n.d.	-10,88	-7,06	-44	-1,67	6,40
61	n.d.	n.d.	-12,80	-6,50	-42	-1,54	7,52
62	n.d.	n.d.	-13,90	-5,39	-34	-2,26	3,30
63	n.d.	n.d.	-14,19	-5,75	-30	-1,73	5,51
64	n.d.	n.d.	0,39	-5,47	-30	-0,87	15,64
65	n.d.	n.d.	-16,29	-5,51	-34	-1,26	8,30
66	n.d.	n.d.	-13,08	-5,27	-34	-1,95	4,30
67	n.d.	n.d.	-11,21	-7,49	-47	-1,84	6,10
68	n.d.	n.d.	-11,53	-7,60	-48	-1,73	6,20
69	n.d.	n.d.	-12,23	-5,93	-37	-1,71	5,61
70	n.d.	n.d.	-11,39	-5,49	-34	-1,72	5,71
71	n.d.	n.d.	-9,36	-6,96	-43	-1,61	4,51
72	n.d.	n.d.	2,84	-5,80	-35	-1,19	5,40
73	n.d.	n.d.	2,98	-6,04	-37	-1,22	5,10
74	n.d.	n.d.	2,03	-6,10	-37	-1,08	6,61
75	n.d.	n.d.	3,19	-5,78	-35	-1,21	6,00
76	n.d.	n.d.	-11,01	-5,98	-35	-1,97	5,40
77	n.d.	n.d.	-8,96	-5,79	-36	-1,45	5,00
78	n.d.	n.d.	3,75	-5,96	-35	-0,88	8,11
79	n.d.	n.d.	-0,19	-6,15	-37	-0,97	12,01
80	n.d.	n.d.	-7,61	-7,94	-50	-1,93	6,71
81	n.d.	n.d.	-16,26	-5,83	-37	-1,53	6,61
82	n.d.	n.d.	-12,90	-7,91	-50	-1,56	6,20

Campione	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Trizio	$\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$	$\delta^{18}\text{O}$	δD	$\log \text{PCO}_2$	Total Carbon
		U.T.	‰ vs.PDB	‰ vs.SMOW	‰ vs.SMOW	bar	mmol/kg
83	n.d.	n.d.	-3,41	-6,94	-42	-1,30	9,11
84	n.d.	n.d.	-10,37	-7,92	-50	-1,72	5,61
85	n.d.	n.d.	-13,30	-6,18	-37	-1,42	7,52
86	n.d.	n.d.	-0,41	-6,07	-36	-1,09	6,40
87	n.d.	n.d.	-5,17	-6,54	-39	-1,29	5,20
88	n.d.	n.d.	3,97	-5,95	-34	-0,95	6,81
89	n.d.	n.d.	-14,66	-5,78	-33	-1,62	7,62
90	n.d.	n.d.	-14,10	-5,84	-35	-1,38	7,91
91	n.d.	n.d.	-9,43	-8,03	-50	-1,56	5,40
92	n.d.	n.d.	-12,43	-6,04	-35	-2,01	5,10
93	n.d.	n.d.	-19,03	-5,58	-31	-1,25	11,31
94	0,71032	2,20	4,02	-5,83	-34	-0,88	7,10
95	n.d.	n.d.	-3,35	-6,45	-37	-1,27	5,51
96	n.d.	n.d.	-3,32	-6,21	-37	-1,26	5,20
97	n.d.	n.d.	-5,34	-8,23	-50	-1,49	4,71
98	n.d.	n.d.	-9,53	-6,23	-36	-1,31	9,40
99	n.d.	n.d.	-0,53	-5,77	-35	-0,69	28,08
100	n.d.	n.d.	-6,45	-5,31	-32	-1,63	3,29
101	n.d.	n.d.	10,25	-6,76	-42	-0,83	26,45
102	n.d.	n.d.	-10,90	-6,80	-44	-1,87	6,51
103	n.d.	n.d.	-6,44	-6,06	-37	-1,49	4,71
104	n.d.	n.d.	1,77	-5,96	-38	-1,02	6,81
105	n.d.	n.d.	-4,80	-8,14	-48	-2,26	5,20
106	n.d.	n.d.	-23,30	-7,28	-45	-1,61	6,71
107	n.d.	n.d.	-13,44	-5,51	-34	-1,92	5,51
108	n.d.	n.d.	-16,02	-6,08	-33	-1,53	6,81
109	n.d.	n.d.	-11,98	-6,84	-42	-1,55	n.d.
110	n.d.	n.d.	-9,31	-7,64	-50	-1,68	n.d.
111	n.d.	n.d.	-9,76	-7,98	-51	-1,84	n.d.
112	n.d.	n.d.	-8,52	-7,92	-52	-1,68	6,10
113	n.d.	n.d.	-10,04	-7,87	-53	-1,94	5,71
114	n.d.	n.d.	-12,11	-6,96	-45	-1,70	6,71
115	n.d.	n.d.	-8,60	-7,57	-46	-1,56	4,30
116	n.d.	n.d.	-13,59	-7,29	-45	-1,84	5,30
117	n.d.	n.d.	-2,81	-6,41	-36	-1,48	9,72
118	n.d.	n.d.	-13,05	-5,81	-37	-1,90	4,90
119	n.d.	n.d.	-11,90	-6,27	-43	-1,93	5,20
120	n.d.	n.d.	-14,14	-6,39	-38	-1,56	7,30
121	n.d.	n.d.	-14,09	-6,29	-41	-1,72	6,10
122	0,70976	2,23	0,36	-6,30	-42	-1,04	9,72
123	n.d.	n.d.	-13,93	-6,76	-44	-1,94	4,71

Campione	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Trizio	$\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$	$\delta^{18}\text{O}$	δD	log PCO_2	Total Carbon
		U.T.	‰ vs.PDB	‰ vs.SMOW	‰ vs.SMOW	bar	mmol/kg
124	n.d.	n.d.	-11,14	-5,56	-37	-1,98	4,90
125	n.d.	n.d.	-12,79	-6,09	-38	-2,04	4,30
126	n.d.	n.d.	-12,78	-6,92	-42	-1,77	5,81
127	n.d.	n.d.	-14,57	-5,52	-31	-1,92	4,10
128	n.d.	n.d.	-14,35	-5,36	-31	-2,06	4,10
129	n.d.	n.d.	-14,78	-6,44	-37	-1,65	4,51
130	n.d.	n.d.	-15,06	-7,14	-43	-1,56	7,10
131	n.d.	n.d.	-4,80	-8,53	-52	-2,15	5,71
132	0,7097	2,17	-6,27	-6,31	-39	-1,13	10,52
133	n.d.	n.d.	-13,94	-5,56	-33	-1,54	4,30
134	n.d.	n.d.	-9,94	-7,26	-43	-1,88	3,71
135	0,71048	1,87	-2,90	-5,40	-32	-1,27	4,90
136	n.d.	n.d.	-12,66	-6,41	-38	-1,51	3,30
137	n.d.	n.d.	-2,49	-5,89	-38	-1,90	4,90
138	n.d.	n.d.	-13,60	-5,99	-35	-1,85	4,71
139	n.d.	n.d.	-2,89	-5,93	-34	-1,28	8,20
140	n.d.	n.d.	-3,64	-5,82	-34	-1,37	7,20
141	n.d.	n.d.	-8,29	-6,47	-39	-1,52	8,20
142	n.d.	n.d.	-15,24	-5,46	-32	-1,85	7,20
143	n.d.	n.d.	-11,09	-6,09	-38	-1,58	5,61
144	n.d.	n.d.	-12,85	-6,89	-43	-1,71	4,20
145	n.d.	n.d.	-13,18	-6,98	-44	-1,84	5,70
146	0,70971	0,00	-0,60	-6,11	-37	-1,09	8,44
147	n.d.	n.d.	-0,17	-5,96	-37	-1,03	11,21
148	n.d.	n.d.	-13,53	-5,98	-36	-1,46	7,10
149	n.d.	n.d.	-14,30	-6,08	-36	-1,31	7,90
150	n.d.	n.d.	-13,60	-8,22	-50	-1,40	7,50
151	n.d.	n.d.	-16,76	-7,30	-44	-1,80	6,70
152	n.d.	n.d.	-15,80	-7,44	-45	-1,77	6,80
153	n.d.	n.d.	-11,10	-6,38	-39	-1,89	5,50
154	n.d.	n.d.	-11,24	-7,82	-49	-1,92	5,50
155	n.d.	n.d.	-13,71	-5,85	-33	-1,47	6,50
156	n.d.	n.d.	-13,55	-6,16	-35	-1,54	6,10
157	n.d.	n.d.	-1,88	-6,14	-35	-0,74	15,73
158	0,70951	0,10	2,38	-6,26	-36	-0,30	31,11
159	0,70953	0,27	-1,33	-6,26	-38	-0,35	27,49
160	n.d.	n.d.	-2,90	-6,09	-34	-0,38	29,71
161	n.d.	n.d.	-9,53	-7,82	-47	-1,82	6,00
162	n.d.	n.d.	-9,01	-7,67	-45	-1,81	5,30
163	n.d.	n.d.	-7,87	-5,88	-29	-1,14	10,01
164	n.d.	n.d.	1,49	n.d.	n.d.	-1,12	6,20

Campione	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Trizio	$\delta^{13}\text{C}_{\text{TDC}}$	$\delta^{18}\text{O}$	δD	log PCO₂	Total Carbon
		U.T.	‰ vs.PDB	‰ vs.SMOW	‰ vs.SMOW	bar	mmol/kg
Tor Marancia 2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Tor Marancia 3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 1	n.d.	n.d.	-12,40	n.d.	n.d.	-1,64	5,80
Villa Ada 2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	-1,66	7,05
Villa Ada 3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	-1,36	7,91
Villa Ada 4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	-1,87	5,25
Villa Ada 5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	-1,45	7,67

Tabella A4. Isotopi stabili, PCO₂ e Total Carbon nelle acque di sottosuolo dell'area urbana di Roma.

Campione	He	H₂	O₂	N₂	CH₄	CO₂	Radon
	cc/l	cc/l	cc/l	cc/l	cc/l	cc/l	Bq/l
1	1,61E-04	4,51E-05	9,02	25,63	2,44E-04	37,87	128
2	1,26E-04	1,09E-05	5,54	27,80	4,35E-04	3,58	10
3	1,07E-04	4,07E-04	4,44	27,72	1,63E+00	9,12	18
4	1,25E-04	2,04E-05	5,86	26,09	6,33E-03	26,61	38
5	1,69E-04	3,29E-06	7,65	19,24	4,66E-04	15,69	32
6	3,18E-04	2,97E-05	7,79	20,83	8,00E-05	14,36	3
7	1,05E-04	1,51E-05	3,40	20,09	5,23E-05	17,87	15
8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
9	1,46E-04	9,99E-03	3,36	21,89	7,12E-03	3,81	1
10	3,09E-04	1,82E-04	5,62	23,99	5,00E-05	5,11	8
11	1,23E-04	1,98E-04	4,64	23,54	5,00E-05	0,26	11
12	2,70E-04	2,19E-05	4,90	25,05	7,27E-03	42,56	115
13	2,68E-04	1,48E-05	3,48	23,50	6,79E-03	29,31	39
14	2,59E-04	1,62E-05	3,92	21,13	2,50E-03	16,34	31
15	1,29E-04	9,76E-05	6,72	23,94	5,29E-05	62,62	123
16	7,22E-05	3,41E-05	6,01	19,27	3,22E-05	106,01	139
17	8,68E-05	7,47E-05	5,93	20,33	5,00E-05	67,75	129
18	7,63E-05	3,53E-05	6,77	21,37	3,44E-05	106,74	68
19	1,10E-04	8,41E-05	6,48	21,87	4,85E-05	61,89	151
20	1,66E-04	1,94E-05	10,08	29,82	2,76E-04	3,51	211
21	1,17E-04	9,53E-05	7,97	28,02	5,00E-05	69,83	60
22	3,41E-04	1,18E-04	5,22	18,02	5,00E-05	243,43	33
23	4,13E-04	2,50E-05	6,25	19,82	2,70E-04	206,59	156
24	3,49E-04	8,21E-05	5,15	24,98	5,45E-04	79,60	106
25	1,13E-04	1,43E-05	8,22	20,83	2,04E-05	23,81	38
26	2,34E-04	2,39E-05	7,70	20,73	5,16E-05	38,92	100
27	8,70E-05	9,89E-06	7,62	21,66	7,86E-05	34,01	42
28	1,06E-04	6,96E-06	6,05	18,41	5,24E-05	141,71	46
29	1,24E-04	4,99E-06	8,43	20,39	5,00E-05	18,90	44
30	5,35E-05	3,88E-06	6,49	20,78	2,11E-04	45,04	63
31	8,90E-05	4,49E-06	6,02	20,71	9,39E-05	49,42	37
32	1,29E-04	2,76E-05	4,14	11,71	1,07E-04	259,59	128
33	1,42E-04	2,78E-05	5,49	20,86	1,74E-04	44,86	78
34	2,47E-04	1,81E-04	4,73	15,97	6,20E-04	371,06	105
35	1,87E-04	1,21E-05	4,57	17,10	6,02E-05	253,17	280
36	1,81E-04	1,19E-05	6,46	20,17	3,49E-04	203,48	43
37	1,41E-04	1,53E-05	6,76	22,87	4,18E-05	24,05	130
38	7,79E-05	4,65E-06	7,83	21,96	9,26E-05	31,38	50
39	8,66E-05	1,44E-05	7,10	20,12	1,09E-04	151,85	115
40	1,17E-04	1,74E-05	5,72	19,28	5,42E-05	162,34	106
41	1,43E-04	1,16E-05	6,07	27,49	3,01E-04	15,24	50

Campione	He	H₂	O₂	N₂	CH₄	CO₂	Radon
	cc/l	cc/l	cc/l	cc/l	cc/l	cc/l	Bq/l
42	1,05E-04	1,04E-05	7,53	23,94	7,17E-05	20,17	48
43	8,85E-05	1,12E-05	6,90	20,89	2,06E-05	15,67	27
44	1,41E-04	1,14E-05	3,62	21,22	4,42E-04	32,71	24
45	2,27E-04	1,10E-04	4,46	26,11	3,91E-04	42,86	114
46	9,90E-05	3,14E-05	4,85	21,91	5,00E-05	67,89	24
47	1,08E-04	7,65E-05	6,29	22,28	5,92E-04	16,25	6
48	6,77E-05	1,09E-04	3,89	27,08	1,37E-04	39,43	12
49	4,89E-05	3,88E-05	5,82	22,87	2,89E-04	37,16	44
50	1,12E-04	5,07E-05	5,52	20,19	1,87E-04	38,75	41
51	7,32E-05	2,80E-05	6,46	20,12	5,00E-05	36,23	7
52	8,52E-05	6,61E-05	3,97	25,02	3,25E-05	29,47	103
53	8,83E-05	3,12E-05	5,23	20,39	4,22E-05	42,75	37
54	2,56E-04	7,54E-05	5,76	22,40	2,15E-05	22,22	69
55	1,80E-04	2,00E-05	5,76	18,09	2,17E-05	174,73	94
56	7,96E-05	3,27E-05	4,17	22,46	2,54E-03	26,34	8
57	6,40E-05	3,03E-05	6,33	21,74	3,77E-03	9,47	4
58	1,34E-04	9,15E-05	8,31	21,62	1,09E-03	2,66	1
59	5,54E-05	8,32E-05	6,89	24,41	5,06E-03	23,47	3
60	4,68E-05	4,78E-05	4,93	24,66	2,57E-03	25,95	5
61	6,30E-05	6,64E-06	3,40	25,78	7,27E-03	35,21	51
62	1,40E-04	5,05E-05	8,64	23,37	2,37E-04	6,61	11
63	1,63E-04	2,42E-05	3,32	25,88	3,23E-05	24,59	47
64	2,47E-04	2,65E-05	4,06	23,73	4,73E-04	168,94	8
65	2,41E-04	2,68E-05	2,90	37,63	3,93E-04	71,80	17
66	1,76E-04	3,23E-05	6,81	22,52	7,65E-05	12,09	25
67	1,77E-04	1,25E-05	6,37	22,70	3,18E-05	17,45	7
68	1,70E-04	4,19E-05	4,98	22,51	3,19E-04	21,07	8
69	2,66E-04	7,39E-06	5,42	25,19	1,32E-04	22,48	8
70	1,02E-04	5,64E-05	4,17	24,17	3,23E-03	17,89	24
71	1,14E-04	4,90E-05	7,55	25,05	9,59E-05	22,87	33
72	2,89E-04	1,08E-04	6,77	20,39	3,38E-03	114,79	48
73	2,04E-04	6,39E-05	8,55	23,25	9,63E-05	94,04	121
74	2,01E-04	3,30E-05	6,36	18,81	1,07E-04	143,12	236
75	1,39E-04	3,95E-05	6,39	17,81	6,41E-04	87,57	94
76	1,44E-04	1,45E-05	5,91	23,25	3,54E-03	10,28	5
77	3,18E-04	9,13E-06	5,65	17,10	8,25E-05	42,21	126
78	2,44E-04	6,76E-05	6,45	18,77	6,95E-05	255,38	123
79	3,65E-04	1,10E-04	5,04	17,90	1,60E-04	111,13	17
80	1,52E-04	4,45E-05	3,81	18,98	5,00E-05	12,60	5
81	1,38E-04	2,82E-05	6,00	20,37	8,53E-05	25,02	95
82	1,51E-04	4,94E-05	5,33	21,77	1,55E-04	25,27	54

Campione	He	H₂	O₂	N₂	CH₄	CO₂	Radon
	cc/l	cc/l	cc/l	cc/l	cc/l	cc/l	Bq/l
83	1,74E-04	4,87E-05	3,93	20,10	1,25E-03	51,03	114
84	1,48E-04	4,31E-05	6,37	18,90	5,33E-05	18,54	62
85	1,19E-04	1,98E-05	4,94	17,80	1,78E-04	36,10	9
86	1,14E-04	2,05E-05	5,45	15,52	3,26E-05	93,93	129
87	1,51E-04	1,90E-05	6,20	20,43	1,15E-04	59,00	99
88	2,01E-04	2,44E-05	5,06	16,33	5,00E-05	228,57	91
89	1,45E-04	1,44E-03	8,45	23,51	1,03E-04	22,52	7
90	1,38E-04	3,71E-05	5,83	25,84	6,81E-04	37,64	8
91	1,54E-04	2,19E-05	6,02	25,06	1,06E-04	31,86	11
92	1,17E-04	1,65E-05	7,47	22,79	1,26E-03	8,38	2
93	2,59E-04	4,19E-05	9,35	32,27	2,32E+00	24,48	7
94	1,67E-04	4,53E-05	6,16	20,31	3,54E-04	213,56	45
95	7,95E-05	2,78E-05	6,38	21,21	1,06E-04	63,96	42
96	7,94E-05	4,40E-05	6,40	19,62	6,17E-05	73,91	177
97	1,12E-04	2,86E-05	7,49	21,54	9,34E-05	37,43	30
98	5,44E-05	6,20E-05	3,44	23,42	6,33E-01	39,55	68
99	2,79E-04	3,93E-05	10,42	34,92	9,70E-01	201,16	3
100	1,58E-04	4,20E-05	6,88	20,55	1,72E-03	32,55	114
101	3,00E-04	3,64E-04	14,90	47,87	4,52E+00	25,09	7
102	3,24E-04	1,01E-04	7,53	30,59	1,97E-04	10,26	24
103	1,65E-04	1,90E-05	8,95	27,49	1,24E-04	27,47	47
104	2,96E-04	1,07E-05	7,11	21,27	1,84E-04	196,15	123
105	2,01E-04	9,33E-06	8,41	22,12	1,66E-04	7,02	1
106	2,28E-04	4,08E-05	7,49	24,94	1,25E-04	19,68	4
107	2,10E-04	4,06E-05	5,29	23,76	1,12E-03	11,29	4
108	1,32E-04	1,49E-05	6,07	24,60	1,24E-04	19,28	57
109	1,78E-04	1,61E-05	9,31	28,69	5,00E-05	1,10	11
110	2,76E-04	1,03E-04	6,06	24,54	6,87E-05	27,81	92
111	1,52E-04	5,76E-05	7,12	24,73	1,73E-04	12,03	123
112	1,03E-04	6,31E-05	5,26	18,16	6,06E-05	31,26	29
113	1,76E-04	3,20E-05	7,64	21,06	6,23E-05	12,86	46
114	1,69E-04	3,12E-05	5,31	19,47	9,31E-05	21,38	6
115	1,28E-04	4,07E-05	6,34	20,56	1,68E-04	37,94	33
116	2,03E-04	9,67E-05	6,60	20,82	6,85E-05	16,02	17
117	1,86E-04	4,46E-05	3,43	20,13	1,97E-03	35,78	4
118	1,66E-04	1,23E-04	4,53	30,88	7,33E-04	15,19	16
119	3,35E-04	1,29E-04	9,85	28,89	2,39E-04	9,51	6
120	1,77E-04	6,27E-05	5,82	22,73	1,82E-03	20,21	35
121	1,64E-04	1,02E-04	6,28	25,89	0,00E+00	22,02	9
122	4,36E-04	1,10E-04	5,16	24,62	2,59E-04	134,15	8
123	1,05E-04	5,87E-05	6,64	16,97	1,86E-04	12,35	6

Campione	He	H₂	O₂	N₂	CH₄	CO₂	Radon
	cc/l	cc/l	cc/l	cc/l	cc/l	cc/l	Bq/l
Tor Marancia 3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 1	n.d.	n.d.	1,82	20,48	4,28E-04	27,28	n.d.
Villa Ada 2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Tabella A5. Gas disciolti nelle acque di sottosuolo dell'area urbana di Roma.

Campione	R/Ra	He/Ne	R/Ra_c	³He	log CO₂/³He	⁴He
				cc/l		cc/l
1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
9	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
10	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
11	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
12	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
13	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
14	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
15	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
16	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
17	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
18	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
19	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
20	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
21	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
22	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
23	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
24	1,23	0,700	-	n.d.	n.d.	n.d.
25	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
26	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
27	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
28	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
29	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
30	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
31	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
32	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
33	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
34	1,10	3,332	1,11	3,96E-10	11,97	3,56E-10
35	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
36	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
37	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
38	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
39	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
40	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
41	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Campione	R/Ra	He/Ne	R/Ra_c	³He	log CO₂/³He	⁴He
				cc/l		cc/l
42	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
43	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
44	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
45	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
46	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
47	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
48	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
49	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
50	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
51	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
52	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
53	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
54	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
55	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
56	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
57	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
58	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
59	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
60	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
61	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
62	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
63	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
64	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
65	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
66	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
67	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
68	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
69	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
70	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
71	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
72	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
73	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
74	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
75	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
76	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
77	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
78	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
79	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
80	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
81	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
82	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Campione	R/Ra	He/Ne	R/Ra_c	³He cc/l	log CO₂/³He	⁴He cc/l
83	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
84	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
85	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
86	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
87	0,89	0,468	-	n.d.	n.d.	n.d.
88	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
89	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
90	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
91	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
92	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
93	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
94	1,08	0,660	-	n.d.	n.d.	n.d.
95	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
96	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
97	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
98	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
99	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
100	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
101	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
102	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
103	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
104	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
105	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
106	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
107	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
108	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
109	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
110	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
111	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
112	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
113	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
114	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
115	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
116	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
117	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
118	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
119	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
120	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
121	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
122	1,00	1,523	1,00	3,17E-10	11,63	3,18E-10
123	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Campione	R/Ra	He/Ne	R/Ra_c	³He cc/l	log CO₂/³He	⁴He cc/l
124	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
125	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
126	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
127	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
128	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
129	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
130	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
131	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
132	1,05	0,462	-	n.d.	n.d.	n.d.
133	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
134	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
135	1,26	0,410	-	n.d.	n.d.	n.d.
136	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
137	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
138	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
139	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
140	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
141	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
142	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
143	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
144	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
145	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
146	1,06	2,921	1,06	7,4E-10	11,18	6,94E-10
147	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
148	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
149	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
151	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
152	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
153	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
154	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
155	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
156	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
157	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
158	0,77	6,609	0,76	6,3E-10	11,88	8,32E-10
159	0,52	14,071	0,51	1,40E-09	11,40	2,74E-09
160	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
161	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
162	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
163	0,74	0,934	-	n.d.	n.d.	n.d.
164	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Campione	R/Ra	He/Ne	R/Ra_c	³He	log CO₂/³He	⁴He
				cc/l		cc/l
165	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
166	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
167	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
168	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
169	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
170	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
171	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
172	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
173	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
174	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
175	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
176	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
177	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
178	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
179	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
180	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
181	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
182	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
183	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
184	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
185	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
186	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
187	0,52	1,681	0,42	1,5E-10	11,96	3,52E-10
188	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
189	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
190	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
191	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
192	0,62	20,157	0,61	1,70E-10	12,55	2,78E-10
Acqua S. Paolo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cinema Metropolitan	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Hotel Plaza	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Monopolio di Stato	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
RS 1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
RS 2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
RS 3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
RS 4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
RS 5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
RS 6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
pozzo parioli	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Tor Marancia 1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Tor Marancia 2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Campione	R/Ra	He/Ne	R/Ra_c	³He	log CO₂/³He	⁴He
				cc/l		cc/l
Tor Marancia 3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Villa Ada 5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Tabella A6. Elio e rapporti isotopici nelle acque di sottosuolo dell'area urbana di Roma.