

# Note illustrative

## La Carta delle cavità sotterranee di Roma 2026

### Scala 1:10.000





**Note Illustrative**  
**Carta delle cavità sotterranee di Roma 2026**  
*Scala 1:10.000*

**AUTORI/AUTHORS**

**NISIO S.<sup>1</sup>, CIOTOLI G.<sup>2</sup>, DELMONACO G.<sup>1</sup>,  
GENTILI F.<sup>3</sup>, MADONNA S.<sup>3</sup>, MORETTI P.<sup>1</sup>, PISTOCCHI L.<sup>1</sup>,  
RUGGIERO L.<sup>2</sup>, TRAVERSA F.<sup>1</sup>**

**EDITORI/EDITORS**

**NISIO S.<sup>1</sup>, MORETTI P.<sup>1</sup>, PISTOCCHI L.<sup>1</sup>**

*1 - Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia - ISPRA Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma, Italia;*

*2 - CNR - IGAG Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria Roma, Italia;*

*3 - Università degli Studi della Tuscia, Viterbo, Italia*

*1 - ISPRA – Italian Institute for Environmental Protection and Research, Department for the Geological Survey of Italy, Rome, Italy*

*2 - CNR – IGAG Institute of Environmental Geology and Geoengineering, Rome, Italy*

*3 - University of Tuscia, Viterbo, Italy*

*Direttore responsabile:* **PASQUALE GUIDACE**

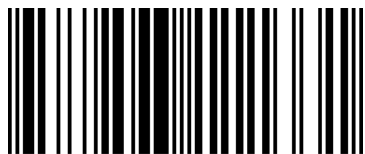
---

**DIPARTIMENTO PER IL SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA**

*Dirigente Tecnologo:* **Stefania NISIO**

*Aggiornamento della cartografia:* **Silvana FALCETTI, Stefano LO FARO, Paolo MORETTI**

*Revisione:* **Silvana FALCETTI, Stefano LO FARO**



9788893111331

DOI: [10.15161/oar.it/sd26j-b7e53](https://doi.org/10.15161/oar.it/sd26j-b7e53)



## PREFAZIONE

La presente Carta delle cavità sotterranee del territorio di Roma è il risultato di un processo di integrazione, sistematizzazione e validazione di dati provenienti da fonti eterogenee, acquisite nel corso di pluriennali attività di studio e ricerca. In particolare, il dataset è costituito da informazioni di tipo puntuale, lineare e poligonale, derivate sia da indagini dirette in sito condotte da ISPRA, sia da contributi messi a disposizione da soggetti privati, nonché – in misura prevalente – da dati provenienti da cartografie tematiche pregresse, archivi documentali e fonti bibliografiche, incluse quelle di carattere storico.

Le attività di raccolta ed elaborazione dei dati sono state condotte mediante un processo critico di analisi, confronto e verifica delle fonti disponibili. Tuttavia, nonostante le procedure di validazione adottate, permane un grado intrinseco di incertezza legato alla qualità e all'affidabilità delle fonti originarie, che in alcuni casi possono contenere imprecisioni, errori di rappresentazione o informazioni incomplete. Tali criticità risultano particolarmente rilevanti per i dati di origine storica o derivati da cartografie non realizzate secondo standard geodetici moderni.

I dati di più recente acquisizione, ottenuti mediante rilievi diretti e tecniche aggiornate di georeferenziazione e posizionamento, presentano invece un livello di accuratezza e affidabilità significativamente più elevato. Ciò consente di distinguere, all'interno del database, informazioni caratterizzate da diverso grado di precisione spaziale.

L'ISPRA – Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia è un ente pubblico di ricerca che svolge attività di studio, monitoraggio e analisi del territorio a scala nazionale e locale. Nell'ambito di tali competenze, l'Istituto ha prodotto e pubblicato diversi elaborati conoscitivi, tra cui la Carta delle Cavità Sotterranee di Roma (2017) e la Mappa di suscettibilità ai sinkhole antropogenici, nonché il presente aggiornamento, tutti sviluppati a scala territoriale.

Si evidenzia che i prodotti cartografici in oggetto sono stati realizzati a una scala non di dettaglio e sono finalizzati prevalentemente alla conoscenza del territorio e al supporto alle attività di pianificazione e gestione. Pertanto, le informazioni in essi contenute possono essere affette da differenti tipologie di incertezze, anche connesse ai processi di georeferenziazione, digitalizzazione e armonizzazione dei dati. Ne consegue che la localizzazione delle cavità sotterranee rappresentate potrebbe non essere puntualmente precisa e non è idonea a fornire indicazioni a scala catastale o riferite al singolo immobile.

Alla luce di quanto sopra, la presente Carta deve essere intesa come uno strumento dinamico e in continuo aggiornamento: essa sarà oggetto di periodiche revisioni, mediante l'implementazione di nuovi dati, l'acquisizione di ulteriori rilievi e il progressivo miglioramento dell'accuratezza posizionale delle informazioni, anche in relazione all'evoluzione delle tecnologie di rilievo e georeferenziazione.

## PREFACE

The present map of underground cavities within the territory of Rome is the result of a process of integration, systematization, and validation of data derived from heterogeneous sources, acquired over the course of long-term study and research activities. In particular, the dataset consists of point, linear, and polygonal information derived both from direct field surveys conducted by ISPRA, as well as from contributions provided by private stakeholders, and—predominantly—from data obtained from pre-existing thematic cartography, documentary archives, and bibliographic sources, including historical records.

Data collection and processing activities were carried out through a critical process of analysis, comparison, and verification of the available sources. Nevertheless, despite the validation procedures adopted, an inherent degree of uncertainty remains, related to the quality and reliability of the original sources, which in some cases may contain inaccuracies, representation errors, or incomplete information. These issues are particularly significant for data of historical origin or derived from cartographic products not developed according to modern geodetic standards.

More recently acquired data, obtained through direct surveys and updated georeferencing and positioning techniques, exhibit a significantly higher level of accuracy and reliability. This allows for the distinction, within the database, of information characterized by different levels of spatial precision.

The ISPRA – Department for the Geological Survey of Italy is a public research body engaged in activities of study, monitoring, and analysis of the territory at both national and local scales. Within this framework, the Institute has produced and published several knowledge-based outputs, including the Map of Underground Cavities of Rome (2017) and the Anthropogenic Sinkhole Susceptibility Map, as well as the present update, all developed at a territorial scale.

It should be noted that these cartographic products have been developed at a non-detailed scale and are primarily intended for territorial knowledge and to support planning and management activities. Therefore, the information contained therein may be affected by various types of uncertainty, also related to georeferencing, digitization, and data harmonization processes. Consequently, the location of the mapped underground cavities may not be spatially precise and is not suitable for providing information at cadastral scale or for individual properties.

In light of the above, this map should be considered a dynamic and continuously evolving tool. It will be subject to periodic updates through the integration of new data, the acquisition of additional surveys, and the progressive improvement of the positional accuracy of the information, also in relation to the advancement of surveying and georeferencing technologies.

## Note illustrative

### La Carta delle cavità sotterranee di Roma 2026

Nisio S.\* , Ciotoli G.\*\* , Delmonaco G.\* , Gentili F.\*\*\*, Madonna S.\*\*\* , Moretti P.\* , Pistocchi L.\* , Ruggiero L.\*\* , Traversa F.\*

\*ISPRA - Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia

\*\* CNR- IGAG Roma

\*\*\* Università della Tuscia di Viterbo

#### Riassunto

Il territorio della città di Roma è caratterizzato dalla presenza di un'estesa rete di cavità sotterranee di origine antropica, sviluppatasi nel corso di oltre duemila anni di sfruttamento del sottosuolo. Tali cavità sono principalmente legate alle attività estrattive nei depositi piroclastici pleistocenici del Distretto Vulcanico dei Colli Albani e, in misura minore, del Distretto dei Monti Sabatini, nonché alla realizzazione di catacombe, cunicoli idraulici e altre infrastrutture sotterranee. La presenza di questi vuoti rappresenta uno dei principali fattori predisponenti ai fenomeni di sprofondamento (sinkholes antropogenici) che interessano il contesto urbano romano.

E' stata aggiornata la cartografia delle cavità sotterranee della città di Roma mediante l'elaborazione di un database georeferenziato e la realizzazione di una mappa di densità delle cavità. Lo studio rappresenta un aggiornamento della carta realizzata da ISPRA nel 2017 in collaborazione con Roma Capitale e con le associazioni speleologiche Roma Sotterranea e Sotterranei di Roma. (Nisio et al., 2017). I dati utilizzati derivano dall'integrazione di fonti bibliografiche, archivi cartografici storici, database geognostici, cartografie archeologiche e indagini dirette sul campo.

Complessivamente sono stati raccolti circa

## Explanatory Notes

### Underground Cavity Map of Rome 2026

Nisio S.\* , Ciotoli G.\*\* , Delmonaco G.\* , Gentili F.\*\*\*, Madonna S.\*\*\* , Moretti P.\* , Pistocchi L.\* , Ruggiero L.\*\* , Traversa F.\*

\*ISPRA - Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia

\*\* CNR- IGAG Roma

\*\*\* Università della Tuscia di Viterbo

#### Abstract

The territory of the city of Rome is characterized by an extensive network of underground cavities of anthropogenic origin, developed over more than two thousand years of subsurface exploitation. These cavities are mainly related to quarrying activities within the Pleistocene pyroclastic deposits of the Colli Albani Volcanic District and, to a lesser extent, the Monti Sabatini District, as well as to the construction of catacombs, hydraulic tunnels, and other underground infrastructures. The presence of these voids represents one of the main predisposing factors for subsidence phenomena (anthropogenic sinkholes) affecting the urban area of Rome. The underground cavity mapping of the city of Rome has been updated through the development of a georeferenced database and the production of a cavity density map. This study represents an update of the map produced by ISPRA in 2017 in collaboration with Roma Capitale and the speleological associations Roma Sotterranea and Sotterranei di Roma (Nisio et al., 2017). The dataset derives from the integration of bibliographic sources, historical cartographic archives, geognostic databases, archaeological mapping, and direct field surveys.

Overall, approximately 5,600 point features, 1,500 linear and polygonal elements were collected, referring to different types of under-

5600 dati puntuali, circa 1500 elementi lineari e poligonali, relativi a diverse tipologie di cavità sotterranee (cave, catacombe, ipogei, cunicoli idraulici e infrastrutture sotterranee), riferiti a un'area di circa 350 km<sup>2</sup> del territorio urbano di Roma caratterizzata dalla presenza di sistemi ipogei. I dati sono stati organizzati in un database geospaziale e analizzati mediante tecniche GIS, utilizzando metodi di Kernel Density Estimation per la realizzazione di una mappa di densità delle cavità.

I risultati evidenziano una distribuzione spaziale fortemente eterogenea delle cavità sotterranee, con aree di maggiore concentrazione localizzate principalmente nei settori orientali e sud-orientali della città e nel centro storico. Le zone a maggiore densità di cavità risultano concentrate nei municipi I, II, IV, V e VIII, in corrispondenza delle principali aree storicamente interessate dallo sfruttamento delle pozzolane e dei tufi (Tufo Lionato) e dalla presenza di sistemi catacombali. Al contrario, i settori nord-occidentali e occidentali del territorio urbano risultano caratterizzati da una minore concentrazione di cavità, in relazione alla diversa natura litologica dei terreni affioranti e alla minore intensità delle attività estrattive storiche.

### **Introduzione**

La città di Roma insiste su una complessa rete di cavità sotterranee di origine antropica, la cui estensione complessiva risulta tuttora solo parzialmente conosciuta. Tali cavità sono il risultato delle attività di escavazione e sfruttamento del sottosuolo che si sono susseguite, con diversa intensità, per oltre duemila anni, dall'epoca romana fino alla metà del XX secolo (Fig. 1).

L'analisi e l'integrazione di numerosi dati disponibili — tra cui cavità intercettate durante sondaggi geognostici, antichi imbocchi di cava, bunker, catacombe e ipogei privati — hanno consentito di elaborare una rappresentazione cartografica aggiornata e più dettagliata della distribuzione delle cavità sotterranee nel terri-

ground cavities (quarries, catacombs, hypogea, hydraulic tunnels, and underground infrastructures). These data refer to an area of approximately 350 km<sup>2</sup> within the urban territory of Rome characterized by the presence of hypogean systems. The dataset was structured into a geospatial database and analyzed using GIS techniques, applying Kernel Density Estimation methods to produce a cavity density map.

The results highlight a markedly heterogeneous spatial distribution of underground cavities, with areas of higher concentration mainly located in the eastern and southeastern sectors of the city and within the historical center. The zones with the highest cavity density are concentrated in Municipalities I, II, IV, V, and VIII, corresponding to the main areas historically affected by pozzolana and tuff (Tufo Lionato) quarrying and by the presence of catacomb systems. In contrast, the northwestern and western sectors of the urban area show a lower cavity concentration, related to differences in the lithological characteristics of outcropping terrains and to the lower intensity of historical quarrying activities.

### **Introduction**

The city of Rome overlies a complex network of anthropogenic underground cavities whose overall extent is still only partially known. These cavities are the result of excavation and subsurface exploitation activities that have occurred, with varying intensity, for more than two thousand years, from the Roman period to the mid-20th century (Fig. 1).

The analysis and integration of numerous available datasets — including cavities intercepted during geognostic drilling, ancient quarry entrances, bunkers, catacombs, and private hypogea — have enabled the development of an updated and more detailed cartographic representation of the spatial distribution of underground cavities within the urban territory. The

torio urbano. La mappa di densità delle cavità, aggiornata al 2026, evidenzia come oltre 70 km<sup>2</sup> del territorio romano risultino interessati dalla presenza di vuoti sotterranei (60,6 km<sup>2</sup> risultano in aree ad elevata densità di cavità).

Lo sfruttamento del sottosuolo ha interessato in modo prevalente il settore orientale e sud-orientale della città, in relazione alla maggiore estensione dei depositi piroclastici affioranti, storicamente oggetto di intensa attività estrattiva per la produzione di materiali da costruzione.

La cartografia delle cavità sotterranee è tuttora in fase di implementazione e richiede aggiornamenti periodici finalizzati all'individuazione di nuovi sistemi ipogei e alla progressiva integrazione delle informazioni disponibili. Le planimetrie delle cavità riportate nella carta sono infatti caratterizzate da un certo grado di incertezza nel posizionamento, dovuto alla qualità e alla provenienza eterogenea delle fonti documentali; pertanto, la loro localizzazione deve essere con-

cavity density map, updated to 2026, shows that more than 70 km<sup>2</sup> of the Roman territory are affected by the presence of underground voids (an area of 60.6 km<sup>2</sup> is characterized by high cavity density).

Subsurface exploitation predominantly affected the eastern and southeastern sectors of the city, due to the wider extent of outcropping pyroclastic deposits that were historically subject to intense quarrying activities for the production of construction materials.

Underground cavity mapping is still ongoing and requires periodic updates aimed at identifying new hypogeal systems and progressively integrating available information. The cavity layouts shown in the map are characterized by a certain degree of positional uncertainty due to the heterogeneous quality and origin of documentary sources; therefore, their location should be considered indicative of areas potentially affected by underground voids.



*Figura 1 - Sezione geologica schematica del sottosuolo di Roma ed esempi di presenza di cave e catacombe./ Figure 1 - Schematic geological cross-section of the Rome subsurface and examples of quarry and catacomb occurrences.*

siderata indicativa di aree potenzialmente interessate dalla presenza di vuoti sotterranei.

Le aree urbane maggiormente interessate dalle attività estrattive storiche e, conseguentemente, dalla formazione di fenomeni di sinkhole, sono rappresentate dai quartieri Tuscolano, Prenestino e Centocelle (Municipio V), Appia Antica (Municipio VII) e Tiburtino (Municipio IV); seguono, con minore densità, i quartieri di San Giovanni–Labicano e il settore Flaminio-Cassia.

La presenza diffusa di cavità sotterranee ha determinato nel tempo il collasso degli strati più superficiali del terreno, con la formazione di voragini in superficie. Tali fenomeni rappresentano una fonte di crescente preoccupazione per le possibili ripercussioni sulla viabilità urbana e per i danni, talvolta ingenti, alle infrastrutture e al patrimonio edilizio, oltre che per il rischio per l'incolumità delle persone, sebbene gli episodi con feriti o vittime risultino fortunatamente rari.

Negli ultimi dieci anni, nel contesto urbano della città di Roma, si è osservato un incremento della frequenza di tali fenomeni, con un conseguente aumento del livello di preoccupazione per la popolazione e per le infrastrutture. I dissesti hanno interessato in particolare la rete viaria e i sottoservizi (rete idrica, elettrica, del gas e delle telecomunicazioni). Tale incremento può essere ricondotto sia alla crescente e diffusa urbanizzazione del territorio sia alle variazioni del regime pluviometrico registrate negli ultimi anni, caratterizzate dal susseguirsi di eventi meteorici particolarmente intensi. L'innescio dei fenomeni di collasso avviene infatti frequentemente in concomitanza con precipitazioni intense e/o in relazione alla rottura di condotte della rete idrica, che favoriscono processi di erosione e svuotamento progressivo dei livelli di copertura.

The urban areas most affected by historical quarrying activities and, consequently, by sinkhole formation include the Tuscolano, Prenestino, and Centocelle districts (Municipality V), Appia Antica (Municipality VII), and Tiburtino (Municipality IV). These are followed, with lower density, by the San Giovanni–Labicano districts and the Flaminio–Cassia sector.

The widespread presence of underground cavities has, over time, led to the collapse of near-surface soil layers, resulting in the formation of surface sinkholes. These phenomena represent a growing concern due to their potential impacts on urban mobility and the sometimes significant damage to infrastructure and the built environment, as well as the risk to public safety, although incidents involving injuries or fatalities remain fortunately rare.

Over the past decade, an increase in the frequency of these events has been observed within the urban area of Rome, resulting in a higher level of risk for both the population and infrastructure. Ground failures have particularly affected the road network and utility systems (water supply, electricity, gas, and telecommunications networks). This increase can be attributed both to the progressive and widespread urbanization of the territory and to changes in rainfall patterns recorded in recent years, characterized by the occurrence of particularly intense meteorological events. Collapse phenomena are frequently triggered by intense precipitation and/or by failures in the water supply network, which promote erosion processes and the progressive removal of overlying cover materials.

#### **Geological framework of the Roman area**

The city of Rome developed within the lower Tiber River valley, in correspondence with a major tectonic element separating two sectors characterized by different paleotectonic and neotectonic evolution (Molin et al., 1995; Moczso et al., 1995; Bersani et al., 2013; Nisio et al., 2020). In this area, the structures of the Um-

### **Inquadramento geologico dell'area romana**

La città di Roma si sviluppa nella bassa valle del Fiume Tevere, in corrispondenza di un importante elemento tettonico che separa due settori caratterizzati da differente evoluzione paleotettonica e neotettonica (Molin et al., 1995; Mozco et al., 1995; Bersani et al., 2013; Nisio et al., 2020). In quest'area convergono infatti le strutture dell'Appennino umbro-marchigiano e quelle della piattaforma laziale-abruzzese, separate da una fascia di transizione strutturale (Funicello & Rosa, 1995; Funicello et al., 1995; 2008a, B; Marra et al., 1995; Marra & Rosa, 1995).

L'area urbana di Roma è inoltre compresa tra due importanti distretti vulcanici quaternari, originatisi a partire da oltre 700 ka e caratterizzati da attività prevalentemente esplosiva con magmi di composizione alcalino-potassica: il Distretto vulcanico dei Colli Albani, a sud-est, e quello dei Monti Sabatini, a nord-ovest.

Fino a circa un milione di anni fa il settore romano era caratterizzato da un ambiente di sedimentazione marino, responsabile della formazione di diverse successioni sedimentarie depostesi durante più cicli principali nel Pliocene e nel Pleistocene inferiore. A tali cicli sono riferibili la Formazione di Monte Vaticano *Auct.*, la Formazione di Monte Mario *Auct.* e la Formazione di Monte delle Piche *Auct.* (Funicello et al., 1995, 2008 a, b; Funicello & Rosa, 1995).

I terreni più antichi affioranti nell'area urbana sono rappresentati dalle argille marine della Formazione di Monte Vaticano *Auct.* (Argille azzurre *Auct.*), riferibili al primo ciclo sedimentario pliocenico (Zancleano superiore – Gelasiano inferiore). Le testimonianze di questo ciclo marino affiorano principalmente nelle aree morfologicamente più elevate della città, tra Monte Mario, il colle Vaticano e le pendici del Gianicolo.

Il secondo ciclo sedimentario è rappresentato dalla Formazione di Monte Mario *Auct.*, riferita al Pleistocene inferiore (Santerniano p.p.). La

bria–Marche Apennines converge with those of the Lazio–Abruzzi carbonate platform, separated by a structural transition belt (Funicello & Rosa, 1995; Funicello et al., 1995, 2008 a,b; Marra et al., 1995; Marra & Rosa, 1995).

The urban area of Rome is also located between two major Quaternary volcanic districts, active since more than 700 ka and characterized by predominantly explosive activity with alkali-potassic magmas: the Colli Albani Volcanic District to the southeast and the Monti Sabatini Volcanic District to the northwest.

Until approximately one million years ago, the Roman sector was characterized by a marine depositional environment responsible for the formation of several sedimentary successions deposited during multiple major cycles in the Pliocene and Early Pleistocene. These cycles include the Monte Vaticano Formation *Auct.*, the Monte Mario Formation *Auct.*, and the Monte delle Piche Formation *Auct.* (Funicello et al., 1995; 2008 a,b; Funicello & Rosa, 1995).

The oldest outcropping deposits in the urban area consist of marine clays of the Monte Vaticano Formation *Auct.* (Argille Azzurre *Auct.*), referable to the first Pliocene sedimentary cycle (late Zanclean–early Gelasian). These marine deposits crop out mainly in the morphologically highest sectors of the city, including Monte Mario, Vatican Hill, and the slopes of the Gianicolo Hill.

The second sedimentary cycle is represented by the Monte Mario Formation *Auct.*, attributed to the Early Pleistocene (Santernian p.p.). The Monte delle Piche Formation *Auct.*, also assigned to the Early Pleistocene (Emilian p.p.), documents an infralittoral depositional facies mainly consisting of clayey and sandy-clayey deposits.

Subsequently, regional uplift at the end of the Early Pleistocene led to a change in paleogeographic conditions and the establishment of a continental environment. In this context, deltaic, fluvial, and marsh deposits accumulated,

Formazione di Monte delle Piche *Auct.*, anch'essa attribuita al Pleistocene inferiore (Emiliano p.p.), documenta invece una facies deposizionale di ambiente infralitorale, costituita prevalentemente da depositi argillosi e argilloso-sabbiosi. Successivamente, il sollevamento generalizzato della regione, avvenuto alla fine del Pleistocene inferiore, determinò un cambiamento delle condizioni paleogeografiche e l'instaurarsi di un ambiente continentale. In tale contesto si deposero sedimenti di facies deltizia, fluviale e palustre riconducibili alle diverse fasi evolutive dell'antico corso del Tevere (Paleotevere *Auctt.*), rappresentati principalmente dalla Formazione di Ponte Galeria *Auct.* e dalla Formazione del Fosso della Crescenza *Auct.*.

La Formazione di Ponte Galeria *Auct.* (Pleistocene inferiore – Pleistocene medio), costituita da conglomerati, sabbie e limi, rappresenta i depositi del Paleotevere depositi in ambiente deltizio.

La Formazione del Fosso della Crescenza *Auct.* (Pleistocene medio p.p.) è invece composta da ghiaie, sabbie e argille deposte in ambiente fluviale e fluvio-lacustre. Tali sedimenti testimoniano la fase evolutiva in cui il Paleotevere, a seguito del sollevamento tettonico della dorsale di Monte Mario, che fu costretto a deviare il proprio corso originario verso SSE, scorrendo entro una valle in subsidenza compresa tra la dorsale stessa e i rilievi dei Monti Sabini e Tiburtini.

A partire da circa 0,6 Ma ebbe inizio l'attività del vulcanismo laziale, distinta in due principali distretti: il Distretto vulcanico dei Monti Sabatini, a nord-ovest, e il Distretto vulcanico dei Colli Albani, a sud-est. L'attività vulcanica, protrattasi per gran parte del Pleistocene, determinò la messa in posto di ingenti volumi di materiali piroclastici, sia sotto forma di depositi di ricaduta sia di colate piroclastiche, che tendono a concentrarsi nelle depressioni preesistenti modificando profondamente la topografia e l'idrografia originarie.

L'attività vulcanica del Pleistocene medio e su-

related to the evolutionary phases of the ancient Tiber River (Paleo-Tiber *Auctt.*), mainly represented by the Ponte Galeria Formation *Auct.* and the Fosso della Crescenza Formation *Auct.*. The Ponte Galeria Formation *Auct.* (Early–Middle Pleistocene), composed of conglomerates, sands, and silts, represents Paleo-Tiber deposits laid down in a deltaic environment.

The Fosso della Crescenza Formation *Auct.* (Middle Pleistocene p.p.) consists of gravels, sands, and clays deposited in fluvial and fluvio-lacustrine environments. These sediments record the evolutionary phase during which the Paleo-Tiber, following tectonic uplift of the Monte Mario ridge, was forced to divert its original course toward the SSE, flowing within a subsiding valley between the ridge and the Sabini and Tiburtini Mountains.

Starting from approximately 0.6 Ma, Latium volcanism began, divided into two main districts: the Monti Sabatini Volcanic District (NW) and the Colli Albani Volcanic District (SE). Volcanic activity, which persisted for much of the Pleistocene, led to the emplacement of large volumes of pyroclastic materials, both as fallout deposits and pyroclastic flows, which preferentially accumulated in pre-existing depressions, profoundly modifying the original topography and drainage network.

Middle–Late Pleistocene volcanic activity, together with numerous eustatic sea-level oscillations, represents one of the main factors controlling the geological evolution of the Roman area.

Continental sedimentary successions—mainly composed of gravels, sands, and silts deposited in fluvial and fluvio-lacustrine environments (Santa Cecilia Formation *Auct.*, Valle Giulia Formation *Auct.*, Torino Formation *Auct.*)- are overlain and interbedded with numerous volcanic deposits belonging to the two districts mentioned above: Tor dei Cenci Unit, Palatino Unit, Casale del Cavaliere Unit, Vallerano Lavas, Pozzolane Rosse, Fosso Tre Rami Lavas,

periore, associata alle numerose oscillazioni eustatiche del livello marino, rappresenta uno dei principali fattori che hanno condizionato l'evoluzione geologica dell'area romana.

Alle successioni sedimentarie continentali, costituite prevalentemente da ghiaie, sabbie e limi di ambiente fluviale e fluvio-lacustre (Formazione di Santa Cecilia *Auct.*, Formazione di Valle Giulia *Auct.*, Formazione del Torrino *Auct.*), si sovrappongono e si intercalano numerosi depositi vulcanici appartenenti ai due distretti sopra citati: l'Unità di Tor dei Cenci, l'Unità del Palatino, l'Unità di Casale del Cavaliere, le Lave di Vallerano, le Pozzolane rosse, le Lave di Fosso Tre Rami, le Pozzolane nere, il Tufo lionato e le Pozzolanelle, riferibili alle fasi vulcaniche dei Colli Albani; l'Unità di Prima Porta, i Tufi stratificati varicolori di Sacrofano, il Tufo rosso a scorie nere Sabatino, i Tufi stratificati varicolori di La Storta e il Tufo giallo di Sacrofano, appartenenti invece al vulcanismo sabatino (Funicello et al., 2008).

Pozzolane Nere, Tufo Lionato, and Pozzolanelle (Colli Albani volcanism); Prima Porta Unit, Varicolored Stratified Tuffs of Sacrofano, Red Tuff with Black Scoria (Sabatini), Varicolored Stratified Tuffs of La Storta, and Yellow Tuff of Sacrofano (Sabatini volcanism) (Funicello et al., 2008).

Many of these volcanic lithologies were subject to intense quarrying activity for construction purposes, as discussed in the following sections (Table 1).

The earliest volcanic products identified in the historic center of Rome occur as reworked pyroclastics in the upper portion of the Fosso della Crescenza Formation *Auct.*. These deposits mainly consist of sands rich in pyroxene, sanidine, and biotite crystals, with minor pumice fragments.

Pyroclastic flow deposits are characterized by alternating layers with highly variable grain size and consolidation, ranging from moderately compact to lithoid, consisting of variably colo-

UNITÀ LITOSTRATIGRAFICA	LITOLOGIA PREVALENTE	CAVE %	CATACOMBE (%)	SUSCETTIBILITÀ ALLO SCAVO IPOGEO	NOTE INTERPRETATIVE
Depositi alluvionali recenti	Sabbie, limi e argille alluvionali	--	3	Molto bassa	Sedimenti incoerenti poco idonei allo scavo stabile; presenza di cavità molto limitata
Piroclastiti sabatine	Tufi stratificati, cineriti e piroclastiti alterate	60	85	Molto elevata	Litologie facilmente scavabili ma con sufficiente coesione; ampiamente utilizzate per catacombe e cave
Pozzolane rosse (Colli Albani)	Depositi piroclastici incoerenti o debolmente cementati	32	7	Elevata	Materiale largamente sfruttato per attività estrattiva (pozzolana)
Tufo litoide lionato	Tufo compatto a matrice cineritica	3	1	Media	Roccia più coerente e resistente; coltivazioni estrattive limitate
Depositi del Paleotevere (Paleotevere 2)	Ghiaie e sabbie fluviali	1	--	Molto bassa	Sedimenti sciolti con scarsa stabilità delle cavità
Unità di Valle Giulia	Sabbie e limi fluvio-lacustri	3	1	Bassa	Cavità limitate e spesso di ridotte dimensioni
Unità di Monte Mario	Argille marine	1	3	Molto bassa	Terreni plastici e poco idonei allo scavo ipogeo

Tabella 1 - Distribuzione percentuale delle cavità sotterranee nel territorio di Roma in relazione alle principali unità litostratigrafiche, con indicazione delle litologie prevalenti e della suscettibilità allo scavo ipogeo. I valori percentuali sono riferiti al totale delle cavità censite.

Molte di tali litologie vulcaniche sono state oggetto di intensa attività estrattiva per scopi edilizi, come verrà discusso nei paragrafi successivi (Tabella 1).

I primi prodotti vulcanici rinvenibili nel settore del centro storico di Roma si osservano sotto forma di piroclastiti rimaneggiate nella porzione superiore della Formazione del Fosso della Crescenza *Auct.*. Tali depositi sono costituiti prevalentemente da sabbie ricche in cristalli di pirosseno, sanidino e biotite, con presenza di piccole pomice.

Le colate piroclastiche sono invece caratterizzate da un'alternanza di livelli con granulometria e grado di consolidazione molto variabili, da mediamente consistenti a litoidi, costituiti da ceneri di colore variabile contenenti piccoli frammenti pomice e cristalli immersi in una matrice cineritica.

Nell'area urbana di Roma, al tetto delle vulcaniti, affiora localmente un orizzonte di limitato

red ash containing small pumice fragments and crystals embedded in a cineritic matrix.

Within the urban area of Rome, a locally outcropping, thin horizon of continental fluvio-lacustrine deposits overlies the volcanic units. These deposits consist of clays, sandy silts, and sands with local diatomite layers and are attributed to the Aurelia Formation *Auct.*.

In the geological framework of the Rome urban area, outcropping and sub-outcropping lithostratigraphic units can be simplistically grouped into five main lithological types: lava flows, alluvial deposits, sands and conglomerates, cineritic tuffs, and lithoid tuffs (Fig. 2).

These lithologies reflect the complex volcano-sedimentary evolution of the central-western sector of the Colli Albani Volcanic District, whose pyroclastic and lava products constitute a large part of the geological substratum of the Roman area.

The spatial distribution of underground cavities

LITHOSTRATIGRAPHIC UNIT	DOMINANT LITHOLOGY	QUARRIES %	CATACOMBE (%)	SUSCETTIBILITÀ ALLO SCAVO IPOGEO	NOTE INTERPRETATIVE
Recent alluvial deposits	Alluvial sands, silts, and clays	--	3	Very low	Unconsolidated sediments poorly suitable for stable excavation; cavities very limited
Sabatini pyroclastics	Stratified tuffs, cinerites, altered pyroclastics	60	85	Very high	Easily excavated lithologies with sufficient cohesion; widely used for catacombs and quarries
Pozzolane rosse (Colli Albani)	Unconsolidated or weakly cemented pyroclastic deposits	32	7	High	Material widely exploited for quarrying (pozzolana)
Tufo Lionato (lithoid tuff)	Compact tuff with cineritic matrix	3	1	Moderate	More coherent and resistant rock; limited quarrying activity
Paleo-Tiber deposits (Paleo-Tiber 2)	Fluvial gravels and sands	1	--	Very low	Loose sediments with poor cavity stability
Valle Giulia Unit	Fluvio-lacustrine sands and silts	3	1	Low	Limited cavities, often small in size
UMonte Mario Unit	Marine clays	1	3	Very low	Plastic soils poorly suitable for underground excavation

Table 1 - Percentage distribution of underground cavities in the territory of Rome according to the main lithostratigraphic units, including dominant lithologies and susceptibility to hypogeal excavation. Percentage values refer to the total number of surveyed cavities.

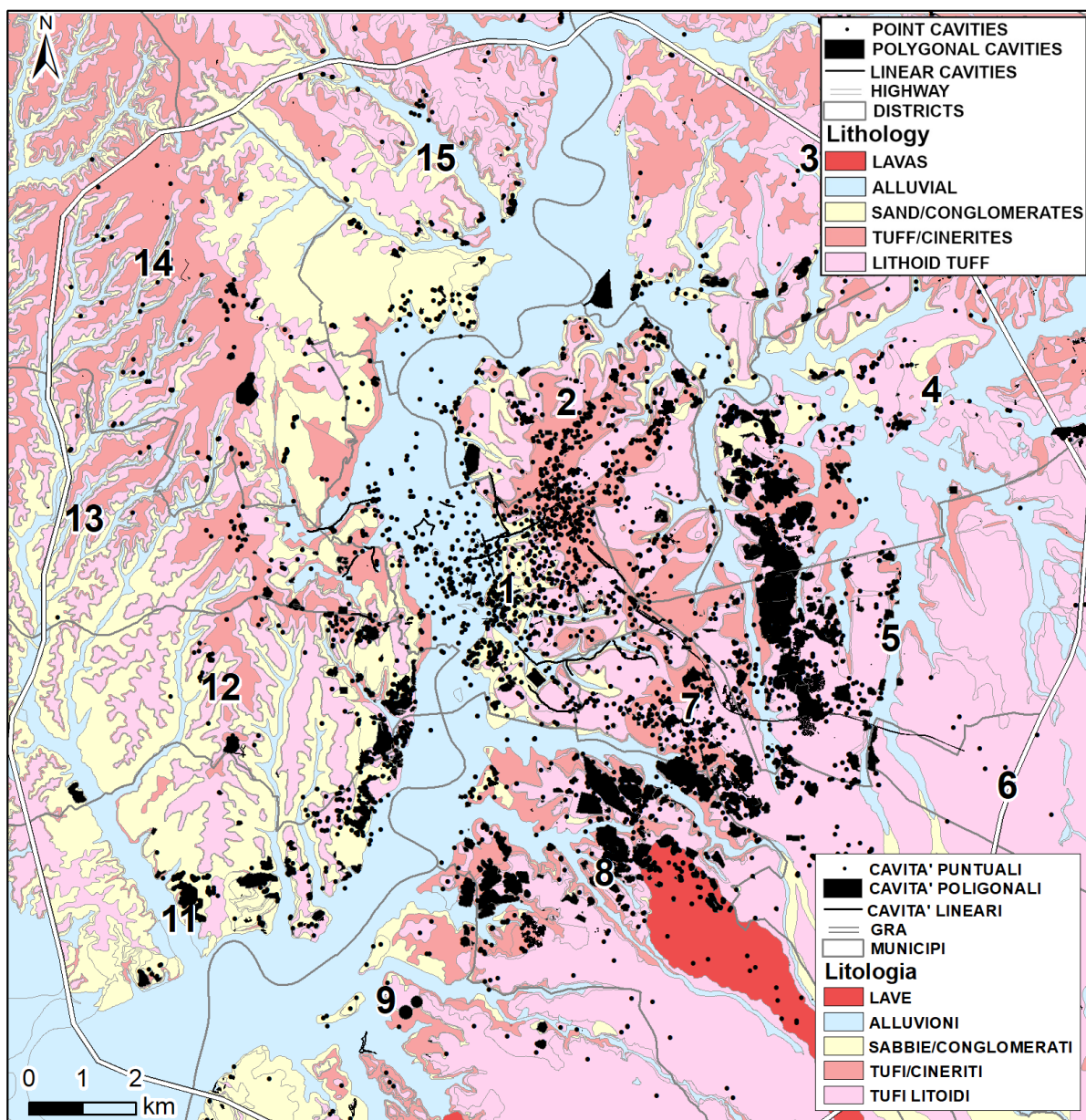


Figura 2 - Distribuzione delle cavità sotterranee (censimento in aree puntuali, lineari e poligonali) sulle principali litologie affioranti nell'area romana./ Figure 2 - Distribution of underground cavities (inventory mapped as point, linear, and polygonal features) across the main lithologies outcropping in the Rome area.

spessore costituito da depositi continentali fluvio-lacustri, composti da argille, limi sabbiosi e sabbie con locali livelli di diatomiti, attribuiti alla Formazione Aurelia Auct..

Nel contesto geologico dell'area urbana di Roma, le unità litostratigrafiche affioranti e sub-affioranti possono essere ricondotte, in ter-

shows a strong relationship with the lithological characteristics of the host materials. Most anthropogenic cavities are developed within cineritic tuffs and lithoid tuffs, pyroclastic lithologies characterized by favorable quarrying properties and geomechanical behavior suitable for hypogeal excavation. These formations, widely

mini semplificativi, a cinque principali tipologie litologiche: colate laviche, depositi alluvionali, sabbie e conglomerati, tufi cineritici e tufi litoidi (Fig. 2). Tali litologie riflettono la complessa evoluzione vulcano-sedimentaria del settore centro-occidentale del Distretto Vulcanico dei Colli Albani, i cui prodotti piroclastici e lavici costituiscono gran parte del substrato geologico dell'area romana.

L'analisi della distribuzione spaziale delle cavità sotterranee evidenzia una marcata relazione tra la loro localizzazione e la natura litologica dei terreni ospitanti. In particolare, la maggior parte delle cavità antropiche risulta sviluppata all'interno dei tufi cineritici e dei tufi litoidi, litologie piroclastiche caratterizzate da buone proprietà di estrazione e da un comportamento geomeccanico favorevole alla realizzazione di ambienti ipogei. Tali formazioni, largamente diffuse nel settore orientale del territorio urbano, sono state storicamente sfruttate come materiale da costruzione e come livelli idonei allo scavo di cave sotterranee.

La distribuzione areale delle cavità mostra inoltre una chiara concentrazione nel settore orientale e sud-orientale della città di Roma, dove affiorano con maggiore continuità i prodotti piroclastici del complesso vulcanico albano. In questi settori la presenza di potenti successioni di tufi cineritici e tufi litoidi ha favorito, nel corso dei secoli, lo sviluppo di estesi sistemi di cavità sotterranee legati principalmente ad attività estrattive storiche, determinando una significativa densità di vuoti ipogei nel sottosuolo urbano.

### **Caratteri geomorfologici**

L'evoluzione geologica del territorio dell'area romana ha inizialmente determinato la formazione di un paesaggio modellato dall'interazione tra processi tettonici e deposizionali attivi nel corso del Plio-Pleistocene. Tali processi hanno portato alla deposizione di successioni clastiche, sia marine sia continentali, e alla messa in posto

distribuiti in the eastern sector of the urban area, were historically exploited both as building materials and as suitable levels for underground quarry development.

### **Geomorphological setting**

The geological evolution of the Roman area initially led to the development of a landscape shaped by the interaction of tectonic and depositional processes active throughout the Plio-Pleistocene. These processes resulted in the deposition of clastic successions, both marine and continental, and the emplacement of extensive pyroclastic eruptive products associated with the activity of the Monti Sabatini and Colli Albani volcanic districts. The resulting morphological framework significantly influenced the distribution of lithologies suitable for hypogeal excavation and, consequently, the historical development of underground cavities.

Subsequently, with the progressive waning of constructive volcanic phases and following the climatic deterioration associated with the last glacial phase, approximately 20,000 years ago, erosional processes driven by climate-related exogenous forcing became the dominant landscape-shaping factor. The combined action of fluvial and gravitational processes progressively incised the volcanic plateau and pre-existing sedimentary surfaces, leading to the present-day geomorphological configuration of the territory and the identification of four main geomorphological domains: the Tiber River delta plain, the terraces of the ancient Tyrrhenian coastline, fluvial valleys, and hilly reliefs (Arnoldus Huyzenveld et al., 1997).

Among these, the hilly relief domain is of particular importance for the distribution of underground cavities, as it represents the geomorphological sector where the main lithologies historically subjected to quarrying activities are concentrated. Based on the lithological nature of outcropping deposits, these reliefs can be classified into three main types: volcanic, mixed,

di estesi prodotti eruttivi piroclastici associati all'attività dei distretti vulcanici dei Monti Sabatini e dei Colli Albani. L'assetto morfologico derivante da queste fasi evolutive ha condizionato in maniera significativa la distribuzione delle litologie suscettibili allo scavo ipogeo e, di conseguenza, lo sviluppo storico delle cavità sotterranee. Successivamente, con il progressivo esaurirsi delle fasi vulcaniche costruttive e a partire dal deterioramento climatico associato all'ultima fase glaciale, circa 20.000 anni fa, i processi erosivi controllati dalle forze esogene di natura climatica hanno assunto un ruolo predominante nel modellamento del paesaggio. L'azione combinata dei processi fluviali e gravitativi ha progressivamente inciso il plateau vulcanico e le superfici sedimentarie preesistenti, determinando l'attuale articolazione morfologica del territorio e l'individuazione di quattro principali ambiti geomorfologici: la piana deltizia del Fiume Tevere, i terrazzi dell'antica costa tirrenica, le valli fluviali e i rilievi collinari (Arnoldus Huyzendveld et al., 1997).

Tra questi, l'ambito dei rilievi collinari riveste particolare importanza ai fini della distribuzione delle cavità sotterranee, poiché rappresenta il settore morfologico in cui si concentrano le principali litologie oggetto di sfruttamento estrattivo nel corso dei secoli (Fig. 3). In base alla natura litologica dei depositi affioranti, tali rilievi possono essere distinti in tre tipologie principali: rilievi collinari di tipo vulcanico, misto e clastico.

Questi rilievi costituiscono porzioni residuali di una più ampia morfostruttura rappresentata da un esteso altopiano piroclastico, successivamente dissezionato dai processi di incisione del reticolo idrografico afferente alle principali aste fluviali del Tevere e dell'Aniene. L'evoluzione del reticolo idrografico ha determinato la formazione di morfologie tabulari di diversa estensione, raccordate ai fondovalle torrentizi mediante versanti e scarpate con acclività variabile. Tali morfologie caratterizzano ampi settori del terri-

and clastic hilly reliefs.

These reliefs represent residual portions of a broader morphostructural setting consisting of an extensive pyroclastic plateau subsequently dissected by incision processes associated with the hydrographic network draining into the main Tiber and Aniene river systems. The evolution of the drainage network led to the formation of tabular landforms of varying extent, connected to valley floors by slopes and scarps with variable gradients. These morphologies characterize wide sectors of the territory located on the left bank of the Tiber and along the slopes of the Aniene basin.

Mixed-type hilly reliefs, composed of pyroclastic deposits of the Sabatini volcanic district in their upper portions and underlain by fluvial or marine clastic sediments, form the extensive hilly areas located on the right bank of the metropolitan reach of the Tiber. In these settings, particularly during the early decades of the 20th century, numerous underground quarrying activities developed for the extraction of gravels and sands, leading to the formation of hypogeal cavity systems that are now partially abandoned.

Predominantly volcanic hilly reliefs consist of pyroclastic deposits emplaced by the Colli Albani Volcanic District and represent the historic morphologies of the left-bank sector of the Tiber, where the system of the Seven Hills of Rome developed (Quirinal, Viminal, Esquiline, Caelian, Capitoline, Palatine, and Aventine). The geotechnical characteristics of these deposits—easily workable yet sufficiently coherent to ensure good underground stability—favored the development of intense anthropogenic hypogeal activity since antiquity, including the construction of quarries, catacombs, and other underground systems (De Angelis d'Ossat, 1933, 1935, 1936, 1940; Ciotoli & Nisio, 2023).

Regarding clastic hilly reliefs, their lithological composition allows further subdivision into predominantly sandy-gravelly hills and predo-

torio situati sulla sinistra idrografica del Tevere e lungo i versanti dei bacini dell'Aniene.

I rilievi collinari di tipo misto, costituiti nella parte sommitale da depositi piroclastici del distretto vulcanico dei Sabatini e inferiormente da sedimenti clastici fluviali o marini, formano le vaste aree collinari poste sulla destra idrografica del tratto metropolitano del Tevere. In tali contesti, soprattutto nei primi decenni del XX secolo, si svilupparono numerose attività estrattive sotterranee finalizzate allo sfruttamento di ghiaie e sabbie, che hanno determinato la formazione di sistemi di cavità ipogee oggi in parte abbandonate.

I rilievi collinari di tipo prevalentemente vulcanico sono invece costituiti dalle piroclastiti deposte dal Distretto Vulcanico dei Colli Albani e rappresentano le morfologie storiche della porzione sinistra del Tevere, dove si sviluppa il sistema dei sette colli di Roma (Quirinale, Viminale, Esquilino, Celio, Campidoglio, Palatino e Aventino). Le caratteristiche geotecniche di tali depositi — facilmente sfruttabili ma sufficientemente coerenti da garantire una buona stabilità degli ambienti sotterranei — hanno favorito lo sviluppo di un'intensa attività antropica ipogea fin dall'antichità, con la realizzazione di cave, catacombe e altri sistemi sotterranei (De Angelis D'Ossat 1933, 1935, 1936, 1940; Ciotoli & Nisio, 2023).

Per quanto riguarda i rilievi collinari di tipo clastico, in relazione alla loro composizione litologica è possibile distinguere morfologie collinari prevalentemente sabbioso-ghiaiose e morfologie collinari prevalentemente argillose.

Le morfologie collinari sabbioso-ghiaiose caratterizzano i settori inferiori dei bacini idrografici del Rio Galeria e del Fosso della Magliana e sono state storicamente interessate da un intenso sfruttamento estrattivo per l'estrazione di sabbia e ghiaia destinate all'edilizia. Le attività estrattive, spesso condotte sia a cielo aperto sia in sotterraneo, hanno localmente determinato la presenza di vuoti artificiali nel sottosuolo.

minantly clayey hills.

Sandy-gravelly hilly morphologies characterize the lower sectors of the Rio Galeria and Fosso della Magliana drainage basins and were historically affected by intense quarrying activities aimed at extracting sands and gravels for construction purposes. Quarrying operations, often conducted both as open-pit and underground excavations, locally resulted in the formation of artificial subsurface voids.

Predominantly clayey hills consist of clayey levels belonging to the Monte Vaticano stratigraphic unit and are mainly represented by the structural high of the Monte Mario–Vatican–Gianicolo ridge, which reaches elevations of approximately 140 m a.s.l., gradually decreasing southward to about 60 m a.s.l. This meridian-oriented ridge is characterized by slopes incised by short but deep transverse valleys that formerly drained surface runoff and waters from small springs located at the base of the slopes.

Anthropogenic activity has also profoundly modified the morphological setting of this sector (Fig. 3). In addition to intense urbanization, the area was historically affected by numerous quarrying activities aimed at exploiting Pliocene clays for brick and ceramic production. Quarrying particularly affected the outcropping levels at Monte Mario and in the Valle dell'Inferno—whose toponym derives from the historical presence of numerous kilns—as well as the clayey reliefs of the Monti della Creta. Although these lithologies are generally poorly suited to the development of stable underground cavities, quarrying activities and human-induced morphological modifications locally contributed to changes in surface configuration and drainage patterns, indirectly influencing subsurface stability conditions.

#### **Underground cavities**

The underground cavities occurring within the Roman area are found predominantly in urban and peri-urban sectors located on the left bank

Le colline prevalentemente argillose sono invece costituite dai livelli argillosi appartenenti all'unità stratigrafica di Monte Vaticano e sono rappresentate principalmente dall'alto strutturale della dorsale Monte Mario–Vaticano–Gianni-

of the Tiber River. They mainly affect the pozzolanic and tuffaceous pyroclastic deposits of Pleistocene age belonging to the Colli Albani Volcanic District and, subordinately, on the right bank, the volcanic rocks of the Monti Saba-

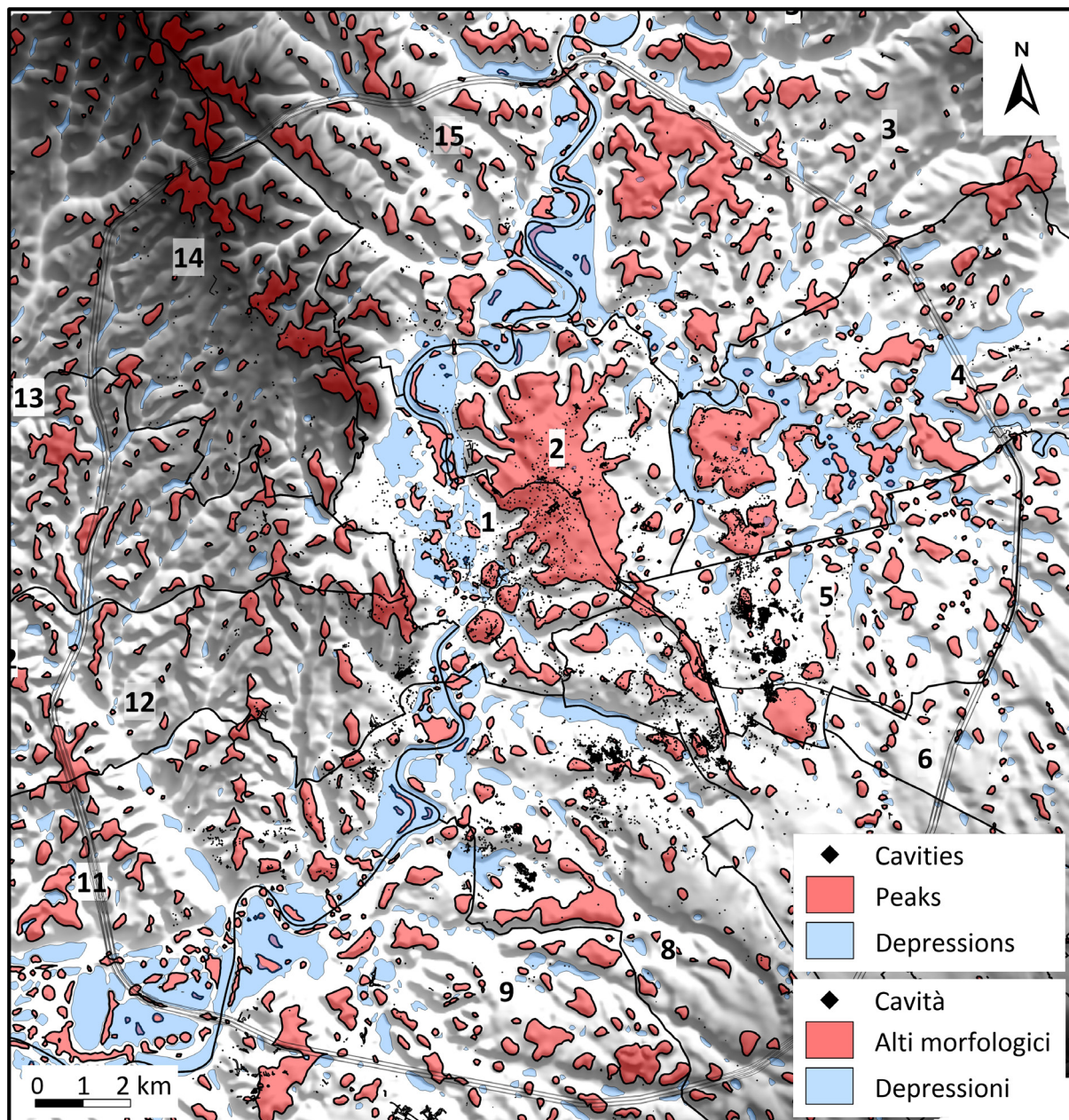
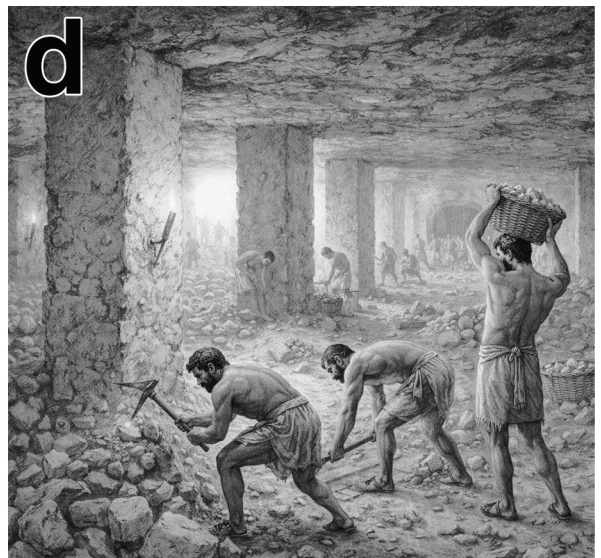
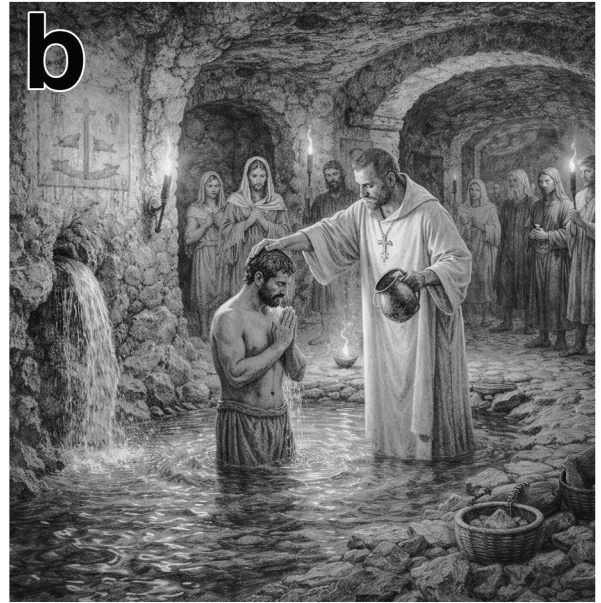


Figura 3 - Assetto morfologico dell'area Romana, sono evidenti rilievi collinari tabulari alti morfologici che si estendono ai lati della piana del fiume Tevere. Le cavità sotterranee si estendono per lo più alla base del plateau piroclastico. / Figure 3 - Morphological setting of the Roman area, showing prominent tabular hilly reliefs extending along both sides of the Tiber River plain. Underground cavities are developed mainly at the base of the pyroclastic plateau.

colo, che raggiunge quote di circa 140 m s.l.m., degradando progressivamente verso sud fino a circa 60 m s.l.m. Questa dorsale, orientata in direzione meridiana, è caratterizzata da versanti incisi da brevi ma profonde incisioni trasversali che in passato drenavano le acque superficiali e quelle provenienti da piccole emergenze sorgive

tini Volcanic District as well as some sandy and gravelly deposits (Ventriglia & Sciotti, 1970; Ventriglia, 1971, 2002; Crescenzi et al., 1995). The types of underground cavities present in the Roman subsurface include several functional and genetic categories: quarries for construction materials; catacombs; aqueducts and hydraulic



*Figura 4 - Utilizzo degli ambienti ipogei a Roma in antichità: a) ambienti ipogei ad uso idrico, cisterne; b) ambienti ipogei ad uso religioso; c) ambienti ipogei ad uso funerario, d) ambienti ipogei ad uso minerario./ Figure 4 - Use of hypogean environments in ancient Rome: (a) underground spaces for hydraulic use, cisterns; (b) underground spaces for religious use; (c) underground spaces for funerary use; (d) underground spaces for mining use.*

localizzate alla base dei versanti.

Anche in questo settore l'azione antropica ha inciso profondamente sull'assetto morfologico. Oltre all'intensa urbanizzazione, l'area è stata in passato interessata da numerose attività estrattive finalizzate allo sfruttamento delle argille plioceniche per la produzione di laterizi e manufatti ceramici. La coltivazione interessò in particolare i livelli affioranti presso Monte Mario e nella Valle dell'Inferno - il cui toponimo deriva dalla presenza storica di numerose fornaci — nonché i rilievi argillosi dei Monti della Creta. Sebbene tali litologie risultino generalmente poco idonee allo sviluppo di cavità sotterranee stabili, le attività estrattive e le trasformazioni morfologiche indotte dall'uomo hanno contribuito localmente alla modifica dell'assetto superficiale e del drenaggio, influenzando indirettamente anche le condizioni di stabilità del sottosuolo.

#### **Le cavità sotterranee**

Le cavità sotterranee presenti nel territorio dell'area romana si rinvennero prevalentemente nelle aree urbane e periurbane situate sulla riva sinistra del Tevere. Esse interessano principalmente i depositi piroclastici pozzolanacei e tufacei di età pleistocenica appartenenti al Distretto Vulcanico dei Colli Albani e, subordinatamente, in destra idrografica, le vulcaniti del Distretto Vulcanico dei Monti Sabatini nonché alcuni depositi sabbiosi e ghiaiosi (Ventriglia & Sciotti, 1970; Ventriglia, 1971, 2002; Crescenzi et al., 1995).

Le tipologie di cavità sotterranee presenti nel sottosuolo romano comprendono diverse categorie funzionali e genetiche: cave per materiali da costruzione, catacombe, acquedotti e opere idrauliche connesse all'approvvigionamento idrico, cunicoli idraulici destinati alla regimazione delle acque meteoriche e al drenaggio del reticolo idrografico, cunicoli di collegamento per il transito pedonale, infrastrutture fognarie, camminatoi, nonché ambienti sotterranei ad uso funerario, religioso e idraulico, gallerie ad

works related to water supply; hydraulic tunnels designed for stormwater regulation and drainage of the hydrographic network; connecting tunnels for pedestrian transit; sewer infrastructures; passageways; as well as underground spaces used for funerary, religious, and hydraulic purposes, and military galleries (Fig. 4)(Ventriglia & Sciotti, 1970; Ventriglia, 1971, 2002; Crescenzi et al., 1995; De Angelis d'Os-  
sat, 1936, 1940; Amirante et al., 2023).

Alongside these anthropogenic types, cavities of more properly natural or pseudo-natural origin also occur, generated by erosional processes induced by water infiltration and exfiltration related to the degradation or failure of modern sewer and water-supply networks.

Underground quarries associated with the exploitation of volcanic materials mainly involved the extraction of Pozzolane Rosse Auct. and, subordinately, Pozzolane Nere Auct. and Pozzolanelle Auct. Quarrying of sedimentary materials, less common, is instead related to sandy and gravelly deposits belonging to the Pleistocene Ponte Galeria Unit and Santa Cecilia Unit. These extractive activities are documented mainly in the southern part of the city, along the plateaus overlooking the Fosso della Magliana (Succhiarelli & Di Stefano, 2004) and, to a lesser extent, in some limited sectors of the plateau located on the right side of the Tiber alluvial valley.

As regards quarries of Archaic age, the main available information derives from studies and documentation dating back to the late 19th century (Lanciani, 1918; Frank, 1924; Lugli, 1957). With reference to the exploitation methods adopted for pyroclastic deposits, quarries were generally distinguished into intensive and systematic extraction quarries and convenience quarries.

Intensive and systematic extraction quarries were related to the continuous need to supply construction materials to the city. Their location was determined both by the quality of the mate-

uso bellico (Fig. 4) (Ventriglia & Sciotti, 1970; Ventriglia, 1971, 2002; Crescenzi et al., 1995; De Angelis D'Ossat, 1936, 1940; Amirante et al., 2023).

A tali tipologie antropiche si affiancano cavità di origine più propriamente naturale o pseudo-naturale, generate da processi erosivi indotti da infiltrazioni ed exfiltrazioni idriche legate al degrado o al dissesto delle moderne reti fognarie e acquedottistiche.

Le cave sotterranee relative allo sfruttamento dei materiali vulcanici hanno interessato principalmente le coltivazioni delle Pozzolane Rosse Auct. e, subordinatamente, quelle delle Pozzolane Nere Auct. e delle Pozzolanelle Auct.. Le coltivazioni relative ai materiali sedimentari, meno frequenti, sono invece riferibili ai depositi sabbiosi e ghiaiosi appartenenti alle formazioni pleistoceniche dell'Unità di Ponte Galeria e dell'Unità di Santa Cecilia. Tali attività estrattive sono documentate soprattutto nella porzione meridionale della città, lungo gli altopiani prospicienti il Fosso della Magliana (Succhiarelli & Di Stefano, 2004) e, in misura minore, in alcuni settori limitati degli altopiani situati in destra idrografica della valle alluvionale del Tevere.

Per quanto riguarda le cave di età arcaica, le principali informazioni disponibili derivano da studi e documentazioni risalenti alla fine del XIX secolo (Lanciani, 1918; Frank, 1924; Luigi, 1957).

In relazione alle modalità di sfruttamento dei depositi piroclastici, le cave venivano generalmente distinte in cave di estrazione intensiva e sistematica e cave di comodo.

Le cave di estrazione intensiva e sistematica erano connesse alla continua necessità di approvvigionamento di materiali da costruzione per la città. La loro ubicazione era determinata sia dalla qualità del materiale sia dalla relativa vicinanza al centro urbano. Tali cave erano generalmente localizzate nel suburbio, a una distanza di circa 2 km dal centro dell'antica Roma (ad esempio le cave di Villa Patrizi lungo la via No-

rial and by their relative proximity to the urban center. These quarries were generally located in the suburban belt, at a distance of approximately 2 km from the center of ancient Rome (for example, the Villa Patrizi quarries along Via Nomentana, the Villa Querini quarries along Via Tiburtina, and the area of the present-day Termini railway station). They consisted of galleries with average diameters of 3–4 m and heights of about 2.5–3 m, found at depths ranging from 3 to 8 m below ground level, with entrances located along hillslopes and workings that developed mainly horizontally.

Quarrying activity was strongly controlled by the presence and continuity of the tuff or pozzolana layer to be extracted. Excavation was carried out manually using picks and axes, whereas internal drainage of the galleries was ensured by water-collecting tunnels. Where excavation difficulties arose, or after exhaustion of the workable horizon, additional gallery levels were excavated, in some cases up to four superimposed levels, reaching maximum depths on the order of 20–22 m below ground level. Quarrying areas were also equipped with vertical shafts for ventilation and service purposes.

Convenience quarries, on the other hand, were smaller in size and shorter-lived, generally being linked to the construction of specific buildings or infrastructure works, such as individual structures or road sections.

In both systematic and convenience quarries, underground extraction was carried out using the room-and-pillar excavation method (fig. 5; De Angelis d'Ossat, 1940; Sciotti, 1984; Ventriglia, 1971), which remained substantially unchanged over time.

This method involved excavation of a main gallery, generally orthogonal to the base of the slope where the exploitable layer cropped out, from which secondary galleries branched off with a sub-rectangular pattern. Access to the galleries was provided either through direct entrances or by inclined adits, often ventilated by

mentana, di Villa Querini lungo la via Tiburtina e nell'area dell'attuale Stazione Termini).

Esse erano costituite da gallerie con larghezza media di 3-4 m e altezza di circa 2,5-3 m, rinvenute a profondità variabili tra 3 e 8 m dal piano campagna, con imbocchi situati lungo i versanti collinari e coltivazioni che si sviluppavano prevalentemente in senso orizzontale.

L'attività estrattiva era fortemente condizionata dalla presenza e dalla continuità del banco di tufo o pozzolana da coltivare. Lo scavo veniva eseguito manualmente mediante piccozze e asce, mentre il drenaggio interno delle gallerie era garantito da cunicoli di raccolta delle acque. In presenza di difficoltà di scavo o in seguito all'esaurimento dell'orizzonte coltivabile, venivano realizzati ulteriori livelli di galleria, talvolta fino a quattro piani sovrapposti, raggiungendo profondità massime dell'ordine di 20-22 m dal piano campagna. Le aree di coltivazione erano inoltre dotate di pozzi verticali di aerazione e servizio.

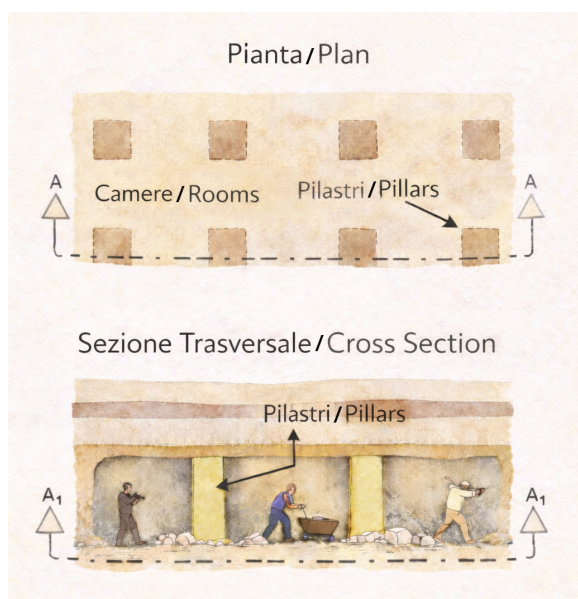


Figura 5 - Schema concettuale della realizzazione di cave attraverso il metodo di camere e pilastri./ Figure 5 - Conceptual scheme of quarry development using the room-and-pillar method.

vertical shafts.

During excavation advance, quadrangular support pillars were left between adjacent galleries, generally with side lengths ranging from 6 to 15 m. At the time of abandonment of quarrying areas, due to exhaustion of the pozzolanic layers, these pillars were often further reduced in order to recover additional material (an operation known as riquartatura).

Based on empirical observations of cavity stability, quarry workers tended to keep the dimensional ratios between galleries and pillars within specific limits, attempting to maintain the ratio between excavated volumes and residual volumes (void/solid ratio) below 40% (Fig. 6). However, subsequent riquartatura operations, together with degradation of cavity walls and roofs, erosional processes, and local collapses, progressively increased gallery volumes, often raising the excavation ratio above 50% and consequently reducing the overall safety factors of the hypogeal structures (Bernabini et al., 1966). The use of tuff quarries as places of worship and burial developed between the 1st and 3rd centuries AD. Within the territory of Rome, 86 areas affected by catacomb systems have been identified, representing the second most widespread type of underground cavity after quarries. The term "catacomb," now used generically to indicate underground necropolises, derives from a Greek term meaning "hollow" and originally referred to the quarry area along the Appia Antica near the Catacombs of San Sebastiano.

The use of quarry areas as necropolises was favored by a regulation in ancient Rome that prohibited burial of the dead within the city for hygienic and sanitary reasons. Quarry areas located in the suburban belt were therefore progressively reused for funerary purposes. Along the main consular roads, monumental tombs of patrician families were instead located; these adopted different funerary practices, generally based on cremation and storage of ashes in urns. At present, some catacomb complexes are open

Le cave di comodo presentavano invece dimensioni più ridotte e una durata limitata nel tempo, essendo generalmente connesse alla realizzazione di specifiche opere edilizie o infrastrutturali, come la costruzione di edifici o tratti stradali.

Sia nelle cave di estrazione sistematica sia in quelle di comodo, la coltivazione sotterranea veniva condotta secondo la tecnica di scavo “a camere e pilastri” (Fig. 5) (De Angelis D'Ossat, 1940; Sciotti, 1984; Ventriglia, 1971), rimasta sostanzialmente invariata nel tempo. Tale metodo prevedeva lo scavo di una galleria principale, generalmente ortogonale alla base del versante interessato dall'affioramento del livello da coltivare, dalla quale si diramavano gallerie secondarie con andamento sub-rettangolare. L'accesso alle gallerie avveniva attraverso imbocchi diretti oppure mediante discenderie inclinate, spesso ventilate da pozzi verticali.

Durante l'avanzamento dello scavo venivano lasciati pilastri di sostegno a sezione quadrangolare tra una galleria e l'altra, con lati generalmente compresi tra 6 e 15 m. Al momento dell'abbandono delle aree estrattive, a causa dell'esaurimento degli strati pozzolanacei, tali pilastri venivano spesso ulteriormente ridotti per recuperare ulteriore materiale (operazione nota come riquartatura).

Sulla base di osservazioni empiriche relative alla stabilità delle cavità, i cavaatori tendevano a mantenere entro determinati limiti i rapporti dimensionali tra gallerie e pilastri, cercando di mantenere il rapporto tra volumi di scavo e volumi residui (rapporto vuoti/pieni) inferiore al 40% (Fig. 6). Tuttavia, le successive operazioni di riquartatura, unite ai fenomeni di degradazione delle pareti e delle volte delle cavità, ai processi erosivi e agli sgrottamenti, hanno progressivamente aumentato il volume delle gallerie, portando spesso il rapporto di scavo oltre il 50% e determinando una conseguente riduzione dei coefficienti di sicurezza complessivi delle strutture ipogee (Bernabini et al., 1966).

L'utilizzo delle cave di tufo come luoghi di cul-

to the public and extend for several kilometers of underground galleries (for example, about 17 km for the Catacombs of San Callisto), sometimes arranged on four or five levels and characterized by numerous burial niches distributed along the gallery walls.

During the 4th century, a significant transformation of underground environments took place, with gallery enlargements and roof raising due to the progressive saturation of available space within the necropolises. In some cases, the hypogeal structures were reinforced to prevent roof collapse, and tunnels with very steep stairways, known as *introitus ad martyres*, were constructed to facilitate access to the funerary complexes. The numerous ceramic finds recovered from quarry areas also testify to the reuse of these spaces during the medieval period and later.

By contrast, quarries developed in conglomerate, gravel, and sand deposits in the southwestern part of the city were not used as necropolises, probably because of the smaller extent of the galleries and the low stability of the unconsolidated deposits. After abandonment of extraction activities, these cavities were sometimes reused as storage areas or agricultural spaces (for example, mushroom farms). In these cases as well, galleries were excavated using the room-and-pillar method, although they were generally smaller in size.

A further type of cavity is represented by those generated by erosional processes induced by failures in modern sewer and water-supply networks. These phenomena are related to wastewater or potable water exfiltration and to groundwater infiltration into sewer conduits (Giulianelli et al., 2004; Prigiobbe et al., 2005). The progressive loss of hydraulic tightness of pipes and joints may cause local failures that evolve into erosion of the surrounding ground. Where interaction occurs between sewer systems and subsurface water flows, the conduits may become preferential drainage pathways (parasitic

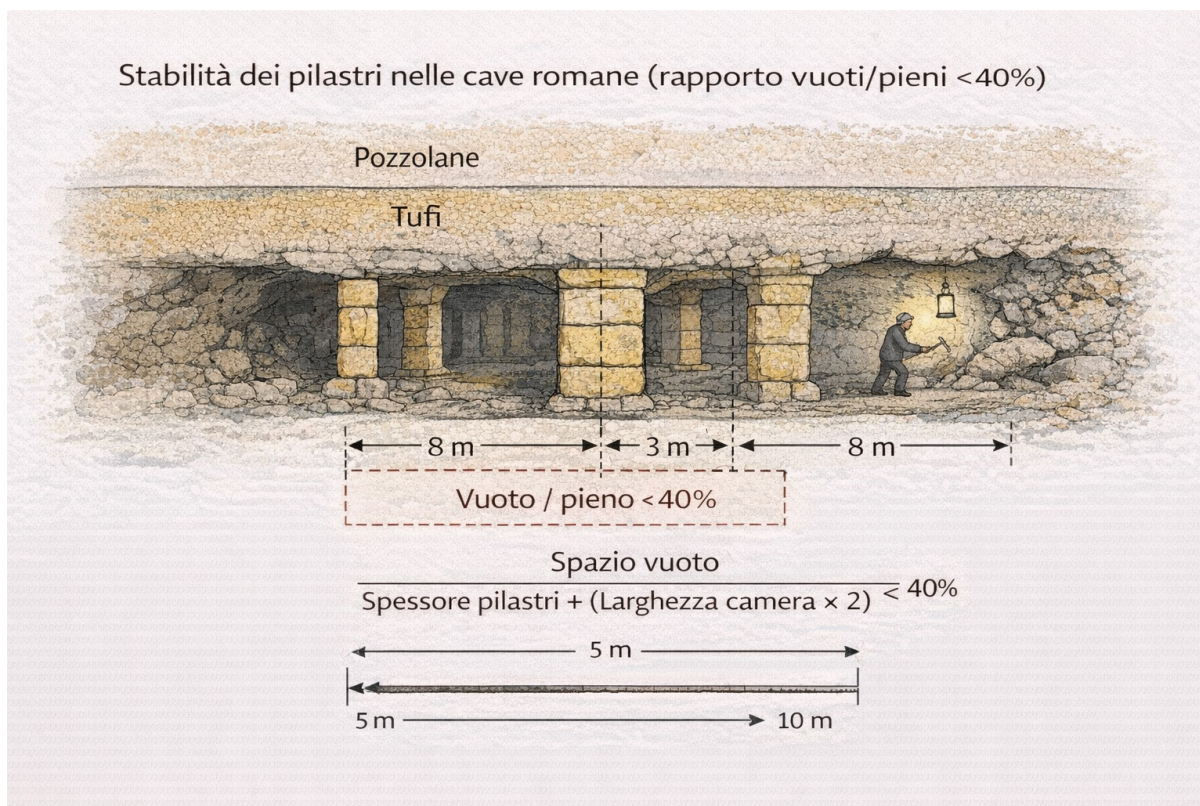


Figura 6 - Rapporto pieni/vuoti nelle cave romane realizzate con il metodo delle camere e pilastri.

to e sepoltura si sviluppò tra il I e il III secolo d.C. Nel territorio di Roma sono state censite 86 aree interessate da sistemi di catacombe, che rappresentano la seconda tipologia di cavità sotterranee per diffusione dopo le cave. Il termine “catacomba”, oggi utilizzato per indicare genericamente necropoli sotterranee, deriva da un termine greco che significa “cavo” e originariamente indicava la zona di cave dell’Appia Antica nei pressi delle catacombe di San Sebastiano.

L’utilizzo delle aree estrattive come necropoli fu favorito da una normativa dell’antica Roma che vietava la sepoltura dei defunti all’interno della città per motivi igienico-sanitari. Le aree di cava situate nel suburbio vennero quindi progressivamente riutilizzate per scopi funerari. Lungo le principali strade consolari erano invece disposti i sepolcri monumentali delle famiglie patrizie, che adottavano pratiche funerarie differenti, generalmente basate sulla cremazione e sulla con-

waters), favoring transport of eroded sediments into structural discontinuities of the pipelines (Giulianelli et al., 2004; Prigione et al., 2005). This process, often also associated with pressurized exfiltration from water-supply networks, may over time lead to the progressive formation and enlargement of underground cavities, eventually causing sudden surface collapses and the development of road sinkholes (Fig. 7).

Within the aims of the present study, knowledge of the spatial distribution of underground cavities represents a fundamental element for assessing susceptibility to subsidence phenomena (Basso et al., 2013; Ciotoli et al., 2015, 2016, in press; Ciotoli & Nisio, 2023). To this end, a systematic compilation of available information was carried out by integrating literature data and existing inventories (Ventriglia & Sciotti, 1970; Ventriglia, 1971; Sciotti, 1982, 1984 a,b, 1986; Crescenzi et al., 1995; Ventriglia, 2002;

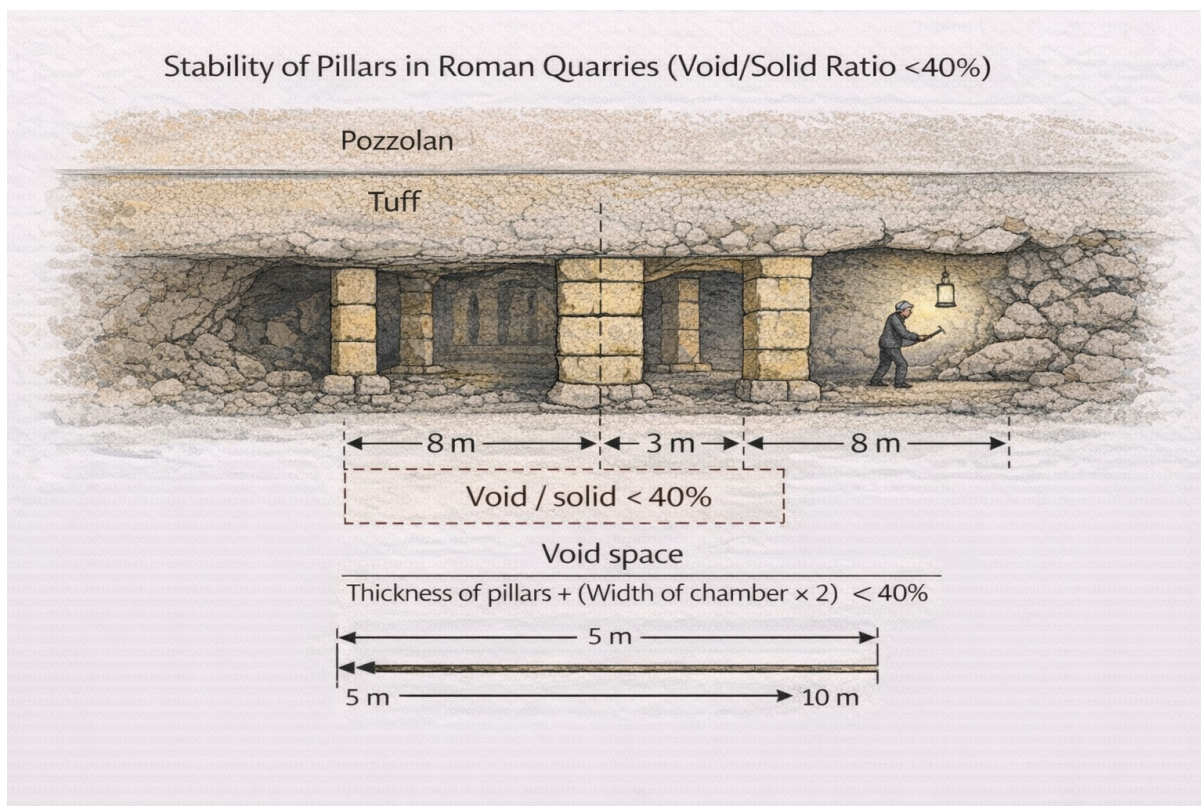


Figure 6 - Void-to-solid ratio in Roman quarries excavated using the room-and-pillar method.

servazione delle ceneri in urne.

Attualmente alcuni complessi catacombali sono aperti al pubblico e presentano uno sviluppo di diversi chilometri di gallerie sotterranee (ad esempio circa 17 kmq per le catacombe di San Callisto), articolate talvolta su quattro o cinque livelli e caratterizzate dalla presenza di numerosi loculi funerari disposti lungo le pareti delle gallerie.

Nel IV secolo si registra una significativa trasformazione degli ambienti sotterranei, con ampliamenti delle gallerie e rialzamenti delle volte dovuti alla progressiva saturazione degli spazi disponibili nelle necropoli. In alcuni casi le strutture ipogee vennero rinforzate per prevenire fenomeni di crollo delle volte e per facilitare l'accesso ai complessi funerari furono realizzati cunicoli con scale molto ripide, detti *introitus ad martyres*. I numerosi reperti ceramici rinvenuti nelle aree di cava testimoniano inoltre un

ISPRA, 2008).

These data were supplemented by information derived from inspections carried out by institutions responsible for cultural heritage protection, by the General Urban Planning Unit – P.R.G. of the Department of Urban Planning and Implementation of Roma Capitale, and by geognostic investigations related to newly executed boreholes and excavations. This body of information (Table 2) made it possible to construct a unified database of underground cavities, within which they were preliminarily classified into quarries, tunnels, and catacombs.

For the purpose of reconstructing the possible extent of hypogeal networks, the locations of ancient quarry entrances were also identified, although these are now often obliterated by building expansion and urbanization.

riutilizzo di tali ambienti anche in epoca medievale e successiva.

Le cave di conglomerati, ghiaia e sabbia localizzate nella porzione sud-occidentale della città non furono invece utilizzate come necropoli, probabilmente a causa della minore estensione delle gallerie e della scarsa stabilità dei depositi incoerenti. Dopo l'abbandono delle attività estrattive tali cavità furono talvolta riutilizzate come depositi o ambienti agricoli (ad esempio fungaie). Anche in questi casi le gallerie venivano realizzate con il metodo delle camere e pilastri, ma presentavano dimensioni generalmente più ridotte.

Un'ulteriore tipologia di cavità è rappresentata dai processi erosivi indotti da dissesti delle reti fognarie e acquedottistiche moderne. Tali fenomeni sono legati a processi di exfiltrazione di acque reflue o potabili e a infiltrazioni di acque di falda all'interno delle condotte fognarie (Giulianelli et al., 2004; Prigiobbe et al., 2005). La progressiva perdita di tenuta idraulica delle tubazioni e dei giunti può determinare dissesti locali che evolvono in fenomeni di erosione del terreno circostante. In presenza di interazione tra fognature e flussi idrici sotterranei, le condotte possono divenire vie preferenziali di drenaggio (acque parassite), favorendo il trasporto di sedimenti erosi verso l'interno delle lesioni strutturali delle condotte (Giulianelli et al., 2004; Prigiobbe et al., 2005). Questo processo, spesso associato anche a fenomeni di exfiltrazione in pressione dalle reti acquedottistiche, può portare nel tempo alla progressiva formazione e ampliamento di cavità sotterranee fino a determinare improvvisi collapsi superficiali e la formazione di voragini stradali (Fig. 7).

Nell'ambito delle finalità del presente lavoro, la conoscenza della distribuzione spaziale delle cavità sotterranee rappresenta un elemento fondamentale per la valutazione della suscettibilità ai fenomeni di sprofondamento (Basso et al., 2013; Ciotoli et al., 2015, 2016, 2026; Ciotoli

## Materials and methods

### Data collection and integration

The 2026 underground cavity map of the Rome territory was produced through the integration of data derived from different information sources, including scientific and technical literature, historical cartographic archives, institutional databases, and direct field investigations. The main objective of the study was to construct a georeferenced database of underground cavities through the aggregation and homogenization of heterogeneous information, subsequently organized and analyzed in a GIS environment.

In an initial phase, a systematic review of the available scientific literature relating to underground cavities and historical quarrying activities in the Roman territory was carried out. In particular, the main geological and speleological studies on the subsurface of Rome were used (Ventriglia & Sciotti, 1970; Ventriglia, 1971; Crescenzi et al., 1995; Ventriglia, 2002), which still represent the most comprehensive sources on the distribution of anthropogenic cavities in the urban subsurface.

These data were integrated with information derived from:

- geognostic databases (CNR and ISPRA);
- historical cartographic archives;
- archaeological maps (Carta dell'Agro Romano) (Comune di Roma, 2018);
- the SITAR database (Sistema Informativo Territoriale Archeologico di Roma);
- municipal technical archives;
- technical reports produced by professional consultancies;
- direct inspections and field surveys.

All collected data (Table 3) were organized in a geospatial database, in which each element was classified and coded according to cavity type and the nature of the information source.

Structuring of the geographic database

The data were organized in a GIS environment

& Nisio, 2023). A tal fine è stata condotta una raccolta sistematica delle informazioni disponibili, integrando dati di letteratura e censimenti esistenti (Ventriglia & Sciotti, 1970; Ventriglia, 1971; Sciotti, 1982, 1984 a, b, 1986; Crescenzi et al., 1995; Ventriglia, 2002; Ispra, 2008).

A tali informazioni sono stati aggiunti dati provenienti da ispezioni effettuate dagli enti preposti alla tutela dei beni culturali, dalla U.O. Pianificazione Urbanistica Generale – P.R.G. del Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica di Roma Capitale e da indagini geognostiche relative a sondaggi e scavi di nuova realizzazione. L'insieme di queste informazioni (tabella 2) ha consentito la costruzione di un database unificato delle cavità sotterranee, all'interno del quale esse sono state preliminarmente classificate in cave, cunicoli e catacombe.

Ai fini della ricostruzione della possibile estensione delle reti ipogee è stata inoltre effettuata la localizzazione degli antichi imbocchi di cava, spesso oggi obliterati dall'espansione edilizia e dall'urbanizzazione del territorio.

## Materiali e metodi

### Raccolta e integrazione dei dati

La realizzazione della carta delle cavità sotterranee del territorio di Roma 2026 è stata effettuata mediante l'integrazione di dati provenienti da diverse fonti informative, comprendenti letteratura scientifica e tecnica, archivi cartografici storici, database istituzionali e indagini dirette sul campo. L'obiettivo principale dello studio è stato quello di costruire un database georeferenziato delle cavità sotterranee, attraverso l'aggregazione e l'omogeneizzazione di informazioni eterogenee, successivamente organizzate e analizzate in ambiente GIS.

In una prima fase è stata condotta una revisione sistematica della letteratura scientifica disponibile relativa alle cavità sotterranee e alle attività estrattive storiche nel territorio romano. In

secondo a tre principali categorie geometriche:

- point features;
- linear features;
- polygonal features.

Questa classificazione rende possibile rappresentare, con diversi gradi di dettaglio, sia evidenze dirette di cavità sotterranee che elementi indirettamente collegati con lo sfruttamento del territorio.

### Point features

Point features rappresentano posizioni specifiche associate con la presenza confermata o potenziale di cavità sotterranee. Questa categoria include: evidenze dirette di cavità, elementi di interesse archeologico-funerario, idraulico e culturale, così come elementi di interesse storico e militare.

*Cavities intercepted by boreholes*: Punti dove sono state intercettate cavità sotterranee durante indagini geognostiche. I dati derivano principalmente dal database di CNR e dai rapporti tecnici ISPRA.

*Quarry entrances*: Posizioni di antiche entrate a cave sotterranee utilizzate per l'estrazione di tufo o pozzolana. I dati derivano da cartografia storica e documentazione archivistica.

*Quarries*: Dati relativi alle posizioni di antiche cave sotterranee utilizzate per l'estrazione di materiali vulcanici e ghiaie. I dati derivano principalmente da letteratura geologica, in particolare dagli studi di Ventriglia e Sciotti (1970), così come dai lavori dell'Istituto Geologico Italiano (Crescenzi et al., 1995).

Le cave sono state classificate in cave per materiali vulcanici e cave per materiali sedimentari (sabbie e ghiaie).

*Tunnels*: Posizioni di antiche entrate a tunnel sotterranei, principalmente tunnel idraulici e passaggi sotterranei.

*Catacombs*: Posizioni di catacombe cristiane o ebraiche per le quali non è disponibile il perimetro o un piano dettagliato.

particolare, sono stati utilizzati i principali studi geologici e speleologici relativi al sottosuolo di Roma (Ventriglia & Sciotti, 1970; Ventriglia, 1971; Crescenzi et al., 1995; Ventriglia, 2002), che rappresentano ancora oggi le fonti più complete sulla distribuzione delle cavità antropiche nel sottosuolo urbano.

Tali informazioni sono state integrate con dati provenienti da:

- database geognostici (CNR e ISPRA)
- archivi cartografici storici,
- cartografie archeologiche (Carta dell'Agro Romano) (Comune di Roma, 2018)
- database SITAR (Sistema Informativo Territoriale Archeologico di Roma)
- archivi tecnici comunali
- relazioni tecniche di studi professionali
- sopralluoghi diretti e indagini sul campo

Tutti i dati raccolti (tabella 3) sono stati organizzati in un database geospaziale, nel quale ciascun elemento è stato classificato e codificato in base alla tipologia di cavità e alla natura della fonte informativa.

### Strutturazione del database geografico

I dati sono stati organizzati in ambiente GIS secondo tre principali categorie geometriche:

- elementi puntuali
- elementi lineari
- elementi poligonali

Questa classificazione consente di rappresentare con diverso grado di dettaglio sia le evidenze dirette delle cavità sotterranee sia gli elementi indirettamente connessi allo sfruttamento ipogeo del territorio.

### Elementi puntuali

Gli elementi puntuali rappresentano localizzazioni specifiche associate alla presenza accertata o potenziale di cavità sotterranee. In questa categoria rientrano: evidenze puntuali di cavità, elementi di interesse archeologico-funerario, idraulico e culturale, nonché elementi di interesse storico e militare.

*Funerary hypogea and Mithraea:* Underground structures for which only the point location is known. The information derives from literature sources, the Roma Capitale cartographic portal, the Carta dell'Agro Romano, and databases of speleological associations.

*Air-raid shelters:* Underground structures used as air-raid shelters during the Second World War, often created by reusing pre-existing quarry environments. These data mainly derive from historical maps preserved in the Capitoline Archives.

*Military forts:* The structures of the nineteenth-century fortified belt were included in the map because underground tunnel and passage systems are present beneath them.

*Underground archaeological structures:* These include cisterns, sacred springs, columbaria, necropolises and burial areas. The data mainly derive from the Carta dell'Agro Romano and the SITAR database.

*Underground springs:* Locations of groundwater seepages observed during direct inspections within underground cavities or, secondarily, derived from bibliographic sources (Bersani et al., 2013, 2018; Nisio et al., 2020).

### Linear features

Linear features represent underground infrastructures with predominantly longitudinal development. This category mainly includes:

- hydraulic tunnels
- drainage galleries
- sections of ancient underground infrastructures

These elements are often associated with systems for the regulation of meteoric waters or with the hydraulic management of the territory. The information derives from direct observations by speleological associations, archaeological literature sources, and the SITAR database.

### Polygonal features

Polygonal features represent areas characteri-

*Cavità intercettate in sondaggio:* punti nei quali, durante indagini geognostiche, sono stati riscontrati vuoti sotterranei. I dati provengono principalmente dal database dei sondaggi del CNR e da dati ISPRA derivanti da relazioni tecniche.

*Ingressi di cava:* Localizzazione degli antichi imbocchi delle cave sotterranee utilizzate per l'estrazione di tufo o pozzolana. I dati sono stati ricavati da cartografia storica e da documentazione tecnica e d'archivio.

*Cave:* I dati relativi alle ubicazioni puntuali di antiche cave sotterranee per l'estrazione di piroclastiti e ghiaie derivano principalmente dalla letteratura geologica, in particolare dagli studi di Ventriglia e Sciotti (1970), nonché dai lavori del Servizio Geologico d'Italia (Crescenzi et al., 1995). Le cave sono state classificate distinguendo tra cave per materiali vulcanici e cave per materiali sedimentari (sabbie e ghiaie).

*Cunicoli:* Localizzazione degli accessi a cunicoli sotterranei, prevalentemente cunicoli idraulici e camminamenti.

*Catacombe:* Localizzazione puntuale di catacombe cristiane o ebraiche per le quali non è noto il perimetro o non è disponibile una planimetria di dettaglio.

*Ipogei funerari e mitrei:* Ambienti sotterranei dei quali è nota soltanto la localizzazione puntuale. Le informazioni provengono da studi di letteratura, dal portale cartografico di Roma Capitale, dalla Carta dell'Agro Romano e dai database di associazioni speleologiche.

*Rifugi antiaerei:* Strutture sotterranee utilizzate come rifugi antiaerei durante la Seconda Guerra Mondiale, spesso realizzate riutilizzando ambienti di cava preesistenti. I dati derivano principalmente dalle cartografie storiche conservate presso l'Archivio Capitolino.

*Forti militari:* Le strutture della cinta fortificata ottocentesca sono state inserite nella cartografia poiché al di sotto di esse sono presenti sistemi di cunicoli e camminamenti sotterranei.

*Strutture archeologiche ipogee:* Comprendono

zed by the presence of complex underground systems or by more detailed cartographic information.

*Plans of underground cavities:* These represent the most detailed level of information and include the geometry of underground quarries, Christian and Jewish catacombs, and pagan hypogea.

The plans may show multiple superimposed levels, represented on the map by lines of different thickness.

The plans mainly derive from literature sources and historical archives. Some maps of Christian catacombs were provided by the Pontifical Commission for Sacred Archaeology (Bisconti et al., 2018) and were subsequently georeferenced.

Additional data derive from municipal archives, technical reports, field surveys conducted by speleological associations (Roma Sotterranea and Sotterranei di Roma), and direct underground investigations carried out by ISPRA.

*Perimeter of areas with confirmed presence of underground cavities:* These include sectors of the territory where the presence of cavities has been verified through direct inspections or documented by reliable sources.

*Perimeter of areas with presumed presence of underground cavities:* These include areas historically affected by underground quarrying activities for which detailed planimetric documentation is not available or for which updated information on their current condition is lacking.

### GIS methodology

Data processing was carried out using Geographic Information Systems (GIS), which made it possible to integrate and analyze information from heterogeneous sources.

- The main processing phases included:
- digitization and georeferencing of historical cartography;
- creation of a geospatial database of under-

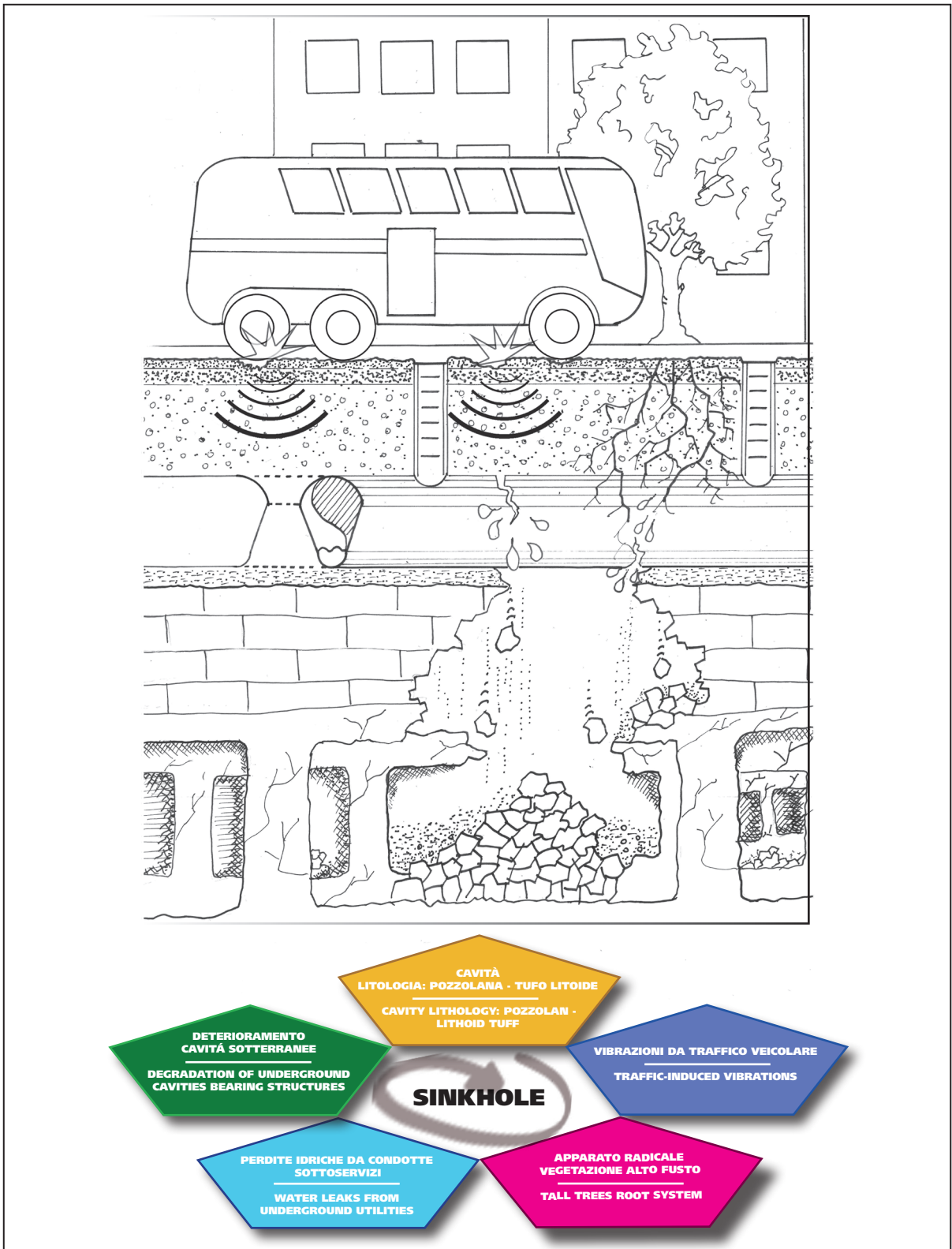


Figura 7 - Rappresentazione schematica dei fattori predisponenti e innescanti i sinkhole antropogenici./ Figure 7 - Sketch of sinkhole predisposing and triggering factors

cisterne, fonti sacre, colombari, necropoli e sepolcreti. I dati provengono prevalentemente dalla Carta dell'Agro Romano e dal database SITAR.

*Sorgenti sotterranee:* Localizzazioni di venute d'acqua osservate durante sopralluoghi diretti all'interno di cavità sotterranee o, in subordine, tratte da fonti bibliografiche (Bersani et al., 2013, 2018; Nisio et al., 2020).

### Elementi lineari

Gli elementi lineari rappresentano infrastrutture sotterranee con sviluppo prevalentemente longitudinale. In questa categoria rientrano principalmente:

- cunicoli idraulici
- gallerie di drenaggio
- tratti di antiche infrastrutture sotterranee

Questi elementi risultano spesso associati a sistemi di regimazione delle acque meteoriche o alla gestione idraulica del territorio. Le informazioni derivano da osservazioni dirette delle associazioni speleologiche, da fonti della letteratura archeologica e dal database SITAR.

### Elementi poligonali

Gli elementi poligonali rappresentano aree caratterizzate dalla presenza di sistemi ipogei complessi o da informazioni cartografiche di maggiore dettaglio.

*Planimetrie di cavità sotterranee:*

Rappresentano il livello informativo di maggiore dettaglio e comprendono la geometria di cave sotterranee, catacombe cristiane ed ebraiche e ipogei pagani. Le planimetrie possono presentare più livelli sovrapposti, rappresentati in carta mediante linee di differente spessore.

Le planimetrie derivano principalmente da dati di letteratura e da archivi storici. Alcune cartografie delle catacombe cristiane sono state fornite dalla Pontificia Commissione di Archeologia Sacra (Bisconti et al., 2018) e successivamente georeferenziate.

Ulteriori dati provengono da archivi comuna-

ground cavities;

- classification of cavities according to genetic and functional type;
- integration of data derived from boreholes and geognostic investigations;
- topological verification and data quality control;
- production of the underground cavity map and the cavity density map.

Spatial analyses were used to identify the areas with the highest concentration of cavities and to assess their relationship with the main lithostratigraphic units of the Roman territory.

The methodological process adopted in the study can be schematically summarized in the workflow shown in Fig. 8.

Assessment of cartographic uncertainty

Because much of the information used derives from historical sources or from documentation not originally georeferenced, the resulting map may contain a certain degree of uncertainty in cavity positioning.

The main sources of uncertainty are attributable to:

- georeferencing errors in historical cartography;
- imprecision in the location of cavities reported in the literature;
- absence of geographic coordinates in the original plans;
- morphological and urban changes that have occurred over time.

To reduce these uncertainties, georeferencing procedures based on topographic control points and recognizable cartographic elements (historical road networks, morphological landmarks, historic buildings) were adopted. However, the position of cavities shown in the map should be regarded as indicative of the presence of underground voids within a given area rather than of their exact geometric location.

### Cavity density

In order to identify the areas of the urban ter-

TIPOLOGIA DI CAVITÀ	SVILUPPO PLANIMETRICO E GEOMETRIA	PERIODO DI REALIZZAZIONE / UTILIZZO	LITOLOGIE INTERESSATE	RUOLO POTENZIALE NEI FENOMENI DI SINKHOLE
Cave per materiali vulcanici (pozzolane e tuffi)	Sviluppo prevalentemente ramificato o a rete; talvolta isolato; in alcuni casi organizzato su più livelli sovrapposti	Epoca romana con frequente riutilizzo medievale e moderno	Depositi piroclastici coerenti e incoerenti (pozzolane, tuffi)	Elevato: presenza di grandi vuoti sotterranei, talvolta con pilastri ridotti o degradati
Cave per materiali sedimentari (sabbie e ghiaie)	Sviluppo ramificato o a rete, generalmente con gallerie di dimensioni minori	Epoca romana e soprattutto contemporanea	Depositi sabbiosi e ghiaiosi pleistocenici	Medio-elevato: minore stabilità dei terreni incoerenti e possibilità di collassi localizzati
Catacombe	Sviluppo ramificato con gallerie disposte su più livelli	Epoca romana (I-IV sec. d.C.)	Depositi piroclastici (pozzolane e tuffi)	Elevato in presenza di vuoti superficiali o di degrado delle strutture
Acquedotti e opere idrauliche antiche	Sviluppo lineare o puntuale	Periodo etrusco e romano	Depositi piroclastici e subordinatamente sedimentari	Medio: cavità generalmente di dimensioni ridotte ma diffuse nel sottosuolo urbano
Cunicoli idraulici per drenaggio e regimazione delle acque	Sviluppo lineare, talvolta ramificato	Periodo etrusco e romano	Depositi piroclastici e sedimentari	Medio: possibile interazione con flussi idrici sotterranei
Infrastrutture fognarie storiche	Sviluppo lineare e localmente ramificato	Epoca romana	Depositi alluvionali e terreni di riporto; subordinatamente piroclastiti	Medio: possibile erosione dei terreni circostanti
Ambienti sotterranei ad uso funerario, religioso e idraulico (camere sepolcrali, colombari, cisterne, pozzi)	Sviluppo isolato o puntuale	Epoca romana	Depositi piroclastici e subordinatamente sedimentari	Basso-medio: cavità generalmente localizzate

*Tabella 2 - Principali tipologie di cavità sotterranee presenti nell'area romana e loro relazioni con i fenomeni di sprofondamento (sinkholes antropici).*

li, relazioni tecniche, rilievi in sito realizzati da associazioni speleologiche (Roma Sotterranea e Sotterranei di Roma) e da indagini dirette in sotterraneo effettuate da ISPRA.

*Perimetro di area con presenza accertata di cavità sotterranee:*

Comprende settori del territorio nei quali la presenza di cavità è stata verificata mediante sopralluoghi diretti o documentata da fonti attendibili.

*Perimetro di area con presenza presunta di cavità sotterranee:*

Comprende aree storicamente interessate da attività estrattive sotterranee per le quali non è

ritory most affected by the presence of underground cavities, a cavity density map was produced using spatial analysis techniques in a GIS environment.

The analysis was performed using as input dataset the set of point features representative of underground cavities, including quarries, quarry entrances, cavities intercepted in boreholes, hypogea, and other documented underground spaces. Linear and polygonal features were preliminarily converted into representative points (centroids) in order to standardize the analysis dataset.

A Kernel Density Estimation (KDE) procedu-

CAVITY TYPE	PLANIMETRIC DEVELOPMENT AND GEOMETRY	PERIOD OF CONSTRUCTION / USE	AFFECTED LITHOLOGIES	POTENTIAL ROLE IN SINKHOLE PHENOMENA
Quarries for volcanic materials (pozzolanas and tuffs)	Predominantly branching or network development; locally isolated; in some cases arranged on several superimposed levels	Roman period, with frequent medieval and modern reuse	Coherent and incoherent pyroclastic deposits (pozzolanas, tuffs)	High: presence of large underground voids, in some cases with reduced or degraded pillars)
Quarries for sedimentary materials (sands and gravels)	Branching or network development, generally with smaller galleries	Roman period and especially modern times	Pleistocene sandy and gravelly deposits	Moderate–high: lower stability of unconsolidated soils and possibility of localized collapses
Catacombs	Branching development with galleries arranged on multiple levels	Roman period (1st–4th century AD)	Pyroclastic deposits (pozzolanas and tuffs)	High where shallow voids or structural degradation occur
Ancient aqueducts and hydraulic works	Linear or point-like development	Etruscan and Roman period	Pyroclastic deposits and, subordinately, sedimentary deposits	Moderate: generally small cavities, but widespread in the urban subsurface
Hydraulic tunnels for drainage and water regulation	Linear and locally branching development	Etruscan and Roman period	Pyroclastic and sedimentary deposits	Moderate: possible interaction with subsurface water flows
Historical sewer infrastructures	Linear and locally branching development	Roman period	Alluvial deposits and anthropogenic fill; subordinately pyroclastics	Moderate: possible erosion of surrounding soils
Underground spaces for funerary, religious, and hydraulic use (burial chambers, columbaria, cisterns, wells)	Isolated or point-like development	Roman period	Pyroclastic deposits and, subordinately, sedimentary deposits	Low–moderate: generally localized cavities

*Table 2 - Main types of underground cavities occurring in the Roman area and their relationships with subsidence phenomena (anthropogenic sinkholes).*

disponibile una documentazione planimetrica dettagliata oppure non si dispone di informazioni aggiornate sul loro stato attuale.

### Metodologia GIS

L'elaborazione dei dati è stata effettuata mediante sistemi informativi geografici (GIS), che hanno consentito di integrare e analizzare informazioni provenienti da fonti eterogenee.

Le principali fasi di elaborazione hanno incluso:

- digitalizzazione e georeferenziazione della cartografia storica;
- creazione di un database geospaziale delle cavità sotterranee;
- classificazione delle cavità in base alla tipo-

re was then applied, a spatial analysis technique widely used to estimate the density distribution of point phenomena in geographic space. This method makes it possible to transform a discrete set of points into a continuous surface representing the spatial concentration of the analyzed features.

In the present study, density was calculated using a Gaussian kernel function, which assigns to each point a contribution that decreases with distance from the center of the analysis cell. The analysis was carried out on a raster grid with constant resolution and with a search radius (bandwidth) defined according to the territorial scale of the study and the average distribution

logia genetica e funzionale;

- integrazione dei dati provenienti da sondaggi e indagini geognostiche;
- verifica topologica e controllo di qualità dei dati;
- produzione della carta delle cavità sotterranee e della mappa di densità delle cavità.

Le analisi spaziali sono state utilizzate per individuare le aree con maggiore concentrazione di cavità e per valutare la loro relazione con le principali unità litostratigrafiche del territorio romano.

Il processo metodologico seguito nello studio può essere schematizzato nel workflow di Fig. 8.

### Valutazione dell'incertezza cartografica

Poiché molte delle informazioni utilizzate derivano da fonti storiche o da documentazione non originariamente georeferenziata, la cartografia prodotta può presentare un certo grado di incertezza nel posizionamento delle cavità.

Le principali fonti di incertezza sono riconducibili a:

- errori di georeferenziazione della cartografia storica;
- imprecisioni nella localizzazione delle cavità riportate nella letteratura;
- assenza di coordinate geografiche nelle planimetrie originali;
- trasformazioni morfologiche e urbanistiche intervenute nel tempo.

Per ridurre tali incertezze sono state adottate procedure di georeferenziazione basate su punti

TIPOLOGIA DI DATI	N. DI ELEMENTI IN CARTA
Dati puntuali	5,641
Dati lineari	86
Planimetrie di cavità estese	871
Perimetri certi di aree con cavità	321
Perimetri incerti di aree con cavità	319

Tabella 3 - Tipologia dei dati raccolti

of cavities.

The density value  $D$  for each grid cell was calculated according to the following relationship:

$$D(x) = \sum_{i=1}^n K(d_i/h)$$

where:

- $d_i$  represents the distance between point and the center of the cell;
- $h$  his the search radius (bandwidth);
- $K$  is the kernel function used to weight the influence of points as a function of distance.

The result of the analysis is a continuous surface representing the spatial density of underground cavities per unit area. The resulting map was subsequently classified into different density classes using statistical classification methods (e.g., natural breaks or quantiles), in order to highlight the areas characterized by a higher concentration of cavities.

The cavity density analysis was also compared with the distribution of the main lithostratigraphic units cropping out in the Roman territory in order to assess the relationship between lithology, historical quarrying activities, and development of hypogeal systems. This approach is preparatory to the identification of urban sectors characterized by high susceptibility to subsidence phenomena (anthropogenic sinkholes; Nisio, 2008, 2010; Nisio et al., 2007; Caramanna et al., 2008; Ciotoli & Nisio, 2023; Ciotoli et al., 2026; Corazza, 2004, 2010), in relation to the presence of underground cavities and the

DATA TYPE	N. OF MAPPED FEATURES
Point data	5,641
Linear data	86
Plans of large underground cavities	871
Confirmed boundaries of area with cavities	321
Uncertain boundaries of areas with cavities	319

Table 3 - Types of data collected

di controllo topografici e su elementi cartografici riconoscibili (viabilità storica, emergenze morfologiche, edifici storici). Tuttavia, la posizione delle cavità riportate nella carta deve essere considerata indicativa della presenza di vuoti sotterranei in una determinata area piuttosto che della loro esatta localizzazione geometrica.

### Densità di cavità

Al fine di individuare le aree del territorio urbano maggiormente interessate dalla presenza di cavità sotterranee, è stata realizzata una mappa di densità delle cavità mediante tecniche di analisi spaziale in ambiente GIS.

L'analisi è stata effettuata utilizzando come dataset di input l'insieme degli elementi puntuali rappresentativi delle cavità sotterranee, comprendenti cave, ingressi di cava, cavità intercettate in sondaggio, ipogei e altri ambienti sotterranei documentati. Gli elementi lineari e poligonali sono stati preliminarmente convertiti in punti rappresentativi (centroidi) al fine di uniformare il dataset di analisi.

Successivamente è stata applicata una procedura di Kernel Density Estimation (KDE), una tecnica di analisi spaziale ampiamente utilizzata per stimare la distribuzione della densità di fenomeni puntuali nello spazio geografico. Questo metodo consente di trasformare un insieme discreto di punti in una superficie continua che rappresenta la concentrazione spaziale degli elementi analizzati.

Nel presente studio la densità è stata calcolata utilizzando una funzione kernel gaussiana, che assegna a ciascun punto un contributo decrescente con la distanza dal centro della cella di analisi. L'analisi è stata eseguita con una griglia raster a risoluzione costante e con un raggio di ricerca (bandwidth) definito in funzione della scala territoriale dello studio e della distribuzione media delle cavità.

geomechanical characteristics of the host soils. A normalized density map was therefore produced (Fig. 9) with five classes according to the Jenks classification method:

- 0.05 = very low
- 0.3 = low
- 0.5 = moderate
- 0.9 = high
- 1.0 = very high

density, expressed as number of elements per  $\text{km}^2$  for each class, is as follows:

- 0–30
- 30–100
- 100–150
- 150–300
- 300–550

The classes occupy the following areas:

- Very low class =  $671.1 \text{ km}^2$
- Low class =  $39.7 \text{ km}^2$
- Moderate class =  $45.3 \text{ km}^2$
- High class =  $39.8 \text{ km}^2$
- Very high class =  $20.8 \text{ km}^2$

It therefore emerges that the total extent of areas with high and very high cavity density in Rome amounts to  $60.6 \text{ km}^2$ .

The density map thus represents a useful synthesis tool for analyzing the spatial distribution of underground cavities and for the preliminary identification of areas potentially more vulnerable to subsurface collapse phenomena.

### Results

The underground cavity map produced in the present study represents an update and expansion of the cartography prepared by ISPRA in 2017 (Nisio et al., 2017) in collaboration with Roma Capitale and the speleological associations Roma Sotterranea and Sotterranei di Roma. The integration of new documentary sources, literature data, and information derived from direct investigations made it possible to significantly increase the number of surveyed elements and improve the level of detail of the cartographic representation.

Overall, approximately 5,600 point data and

Il valore di densità per ciascuna cella della griglia è stato calcolato secondo la relazione:

$$D(x) = \sum_{i=1}^n K(d_i/h)$$

dove:

- $d_i$  rappresenta la distanza tra il punto e il centro della cella;
- $h$  è il raggio di ricerca (bandwidth);
- $K$  è la funzione kernel utilizzata per pesare l'influenza dei punti in funzione della distanza.

Il risultato dell'analisi è una superficie continua che rappresenta la densità spaziale delle cavità sotterranee per unità di superficie. La mappa risultante è stata successivamente classificata in diverse classi di densità mediante metodi di clas-

1,500 polygonal/linear elements were collected, referring to different types of underground cavities (quarries, catacombs, hydraulic tunnels, hypogea, and other underground spaces Fig. 10). These data concern a total area of approximately 60.6 km<sup>2</sup> within the urban territory of Rome, in which the presence of extensive underground cavity systems is documented.

Spatial analysis of the data made it possible to produce a density map of underground cavities, which reveals a markedly heterogeneous distribution of the phenomenon within the urban territory. The map highlights the presence of sectors characterized by a high concentration of underground cavities, largely corresponding to areas historically affected by quarrying activities within the pyroclastic deposits of the Colli Al-



Figura 8 - Work-flow metodologico

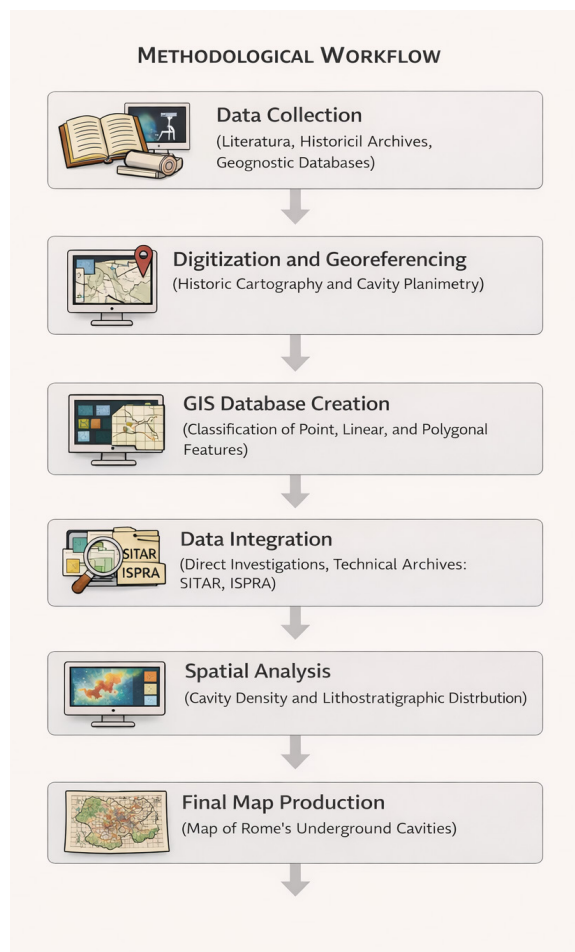


Figure 8 - Methodological Work-flow

sificazione statistica (ad esempio natural breaks o quantili), al fine di evidenziare le aree caratterizzate da maggiore concentrazione di cavità. L'analisi della densità delle cavità è stata inoltre confrontata con la distribuzione delle principali unità litostratigrafiche affioranti nel territorio romano, al fine di valutare la relazione tra litologia, attività estrattive storiche e sviluppo dei sistemi ipogei. Tale approccio è propedeutico all'individuazione dei settori urbani caratterizzati da elevata suscettibilità ai fenomeni di sprofondamento (sinkholes antropogenici, (Nisio, 2008, 2010; Nisio et al. 2007; Caramanna et al., 2008; Ciotoli & Nisio, 2023; Ciotoli et al., 2026; Corazza, 2004, 2010), in relazione alla presenza di cavità sotterranee e alle caratteristiche geomeccaniche dei terreni ospitanti. E' stata realizzata, dunque, la mappa di densità suddivisa in cinque classi (Fig. 9):

- 0.05= molto bassa,
- 0.3=bassa,
- 0.5=media,
- 0.9=alta,
- 1.0= molto alta,

La densità espressa in numero di elementi per km<sup>2</sup> per ogni classe è: 0-30; 30-100; 100-150; 150-300; 300-550.

Le classi occupano le aree seguenti:

- Classe molto bassa = 671.1 km<sup>2</sup>
- Classe bassa = 39.7 km<sup>2</sup>
- Classe media = 45.3 km<sup>2</sup>
- Classe alta = 39.8 km<sup>2</sup>
- Classe molto alta = 20.8 km<sup>2</sup>

Emerge, pertanto, che l'estensione delle aree a densità alta e molto alta a Roma è pari a 60,6 Km<sup>2</sup>.

La mappa di densità rappresenta pertanto uno strumento di sintesi utile per l'analisi della distribuzione spaziale delle cavità sotterranee e per l'individuazione preliminare delle aree potenzialmente più vulnerabili ai fenomeni di collasso del sottosuolo.

bani Volcanic District and, to a lesser extent, to areas affected by catacomb systems.

The areas with the highest density of underground cavities are concentrated mainly in the eastern and southeastern sectors of the city and in the historic center (Santoro & Federici, 1999, 2002; Toro & De Filippo, 1999; Mazza et al., 2008; Nisio, 2019; Ciotoli et al., 2013; Ciotoli & Nisio, 2018, 2021a,b, 2023; Nisio, 2019; Anappo & Nisio, 2021; Bersani & Nisio, 2021a,b). In particular, the main high-density areas are located: in the historic center (Municipio I), particularly in the sector between Via XX Settembre and the beginning of Via Salaria; in Municipio II, along Via Nomentana, in the area of Villa Torlonia and the Catacombs of Sant'Agnese; in Municipio IV, along Via Tiburtina, in the Portonaccio area; in Municipio V, in the sector between Via Prenestina and Via Casilina, historically affected by quarrying activities in pozzolanic deposits; in Municipio VIII, within the Appia Antica Regional Park, where numerous Christian and Jewish catacomb complexes and areas of underground extraction of Tufo Lionato and Pozzolanelle are concentrated; in Municipio XI, near Via Portuense and the Trullo area; in Municipio XII, in the hilly area of Monteverde (Fig. 11), corresponding to the Catacombs of Ponziano.

By contrast, the northwestern and western sectors of the municipal territory are characterized by a lower concentration of underground cavities. This distribution is mainly related both to the different outcropping lithologies, which are less suitable for the development of extensive hypogeal cavities, and to the lower intensity of historical quarrying activities in these areas.

Overall, the density map shows that the distribution of underground cavities in the Roman territory is closely correlated with the presence of easily workable pyroclastic deposits and with the location of the main Roman-period mining and funerary areas.

## Risultati

La carta delle cavità sotterranee realizzata nel presente studio rappresenta un aggiornamento e un ampliamento della cartografia prodotta da ISPRA nel 2017 (Nisio et al., 2017) in collaborazione con Roma Capitale e con le associazioni speleologiche Roma Sotterranea e Sotterranei di Roma. L'integrazione di nuove fonti documentarie, dati di letteratura e informazioni derivanti da indagini dirette ha consentito di incrementare significativamente il numero di elementi censiti e di migliorare il livello di dettaglio della rappresentazione cartografica.

Complessivamente sono stati raccolti circa 5600 dati puntuali e più di 1500 elementi poligonali/lineari, riferiti a differenti tipologie di cavità sotterranee (cave, catacombe, cunicoli idraulici, ipogei e altri ambienti sotterranei) (Fig.10). Tali dati riguardano un'area complessiva di circa 60,6 km<sup>2</sup> del territorio urbano di Roma, all'interno della quale è documentata la presenza di estesi sistemi di cavità sotterranee.

L'analisi spaziale dei dati ha consentito di elaborare una mappa di densità delle cavità sotterranee, dalla quale emerge una distribuzione fortemente eterogenea del fenomeno all'interno del territorio urbano. La mappa evidenzia infatti la presenza di settori caratterizzati da elevata concentrazione di cavità sotterranee, in gran parte riconducibili alle aree storicamente interessate da attività estrattive nei depositi piroclastici del Distretto Vulcanico dei Colli Albani e, in misura minore, alle zone interessate dalla presenza di sistemi catacombali.

Le aree a maggiore densità di cavità sotterranee risultano concentrate principalmente nei settori orientali e sud-orientali della città e nel centro storico (Santoro & Federici, 1999, 2002; Toro & De Filippo, 1999; Mazza et al., 2008; Nisio, 2019; Ciotoli et al., 2013; Ciotoli & Nisio, 2018, 2021 a,b, 2023; Nisio, 2019; Anappo & Nisio, 2021; Bersani & Nisio, 2021 a,b). In particolare, le principali aree ad elevata densità sono localizzate: nel Centro storico (Municipi

## Discussion

The spatial distribution of underground cavities highlighted by the density map shows a clear relationship with the geological and geomorphological framework of the Roman territory, as well as with the history of anthropogenic activities that affected the city's subsurface. In particular, the concentration of cavities in the eastern and southeastern sectors of the urban area is closely correlated with the presence of the Pleistocene pyroclastic deposits of the Colli Albani Volcanic District, consisting mainly of pozzolanas, tuffs, and unconsolidated or weakly cemented pyroclastics. These lithologies display geotechnical characteristics favorable to underground excavation, being easily workable while at the same time sufficiently coherent to allow the construction of relatively stable gallery systems. This factor favored, since antiquity, the development of intense quarrying activity aimed at producing construction materials, leading to the formation of extensive hypogeal networks.

The areas characterized by higher cavity density coincide with the main sectors historically affected by mining of pozzolanic and tuffaceous deposits, as well as with the areas in which the main catacomb complexes of the city developed. In particular, the zones between Via Prenestina, Via Casilina, Via Tiburtina, and Via Nomentana represent some of the main Roman-period quarrying districts, where mining activity produced underground gallery systems often arranged on several levels. Similarly, the Appia Antica sector constitutes an area of particular concentration of underground cavities, due both to the presence of important Christian and Jewish catacomb complexes and to the exploitation of pyroclastic deposits of the Colli Albani Volcanic District.

The historic center of the city also shows high cavity-density values, attributable to the presence of numerous hypogea, hydraulic tunnels, funerary spaces, and remains of ancient quarrying activities. In these areas, the superposition of different types of cavities, excavated in different periods

pio I), in particolare nel settore compreso tra Via XX Settembre e l'inizio di Via Salaria; nel Municipio II, lungo la Via Nomentana, nell'area di Villa Torlonia e delle Catacombe di Sant'Agnese; nel Municipio IV, lungo la Via Tiburtina, nell'area di Portonaccio; nel Municipio V, nel

and for different purposes, led to the formation of a particularly complex and stratified underground system.

By contrast, the northwestern and western sectors of the Roman territory are characterized by a lower density of underground cavities. This di-

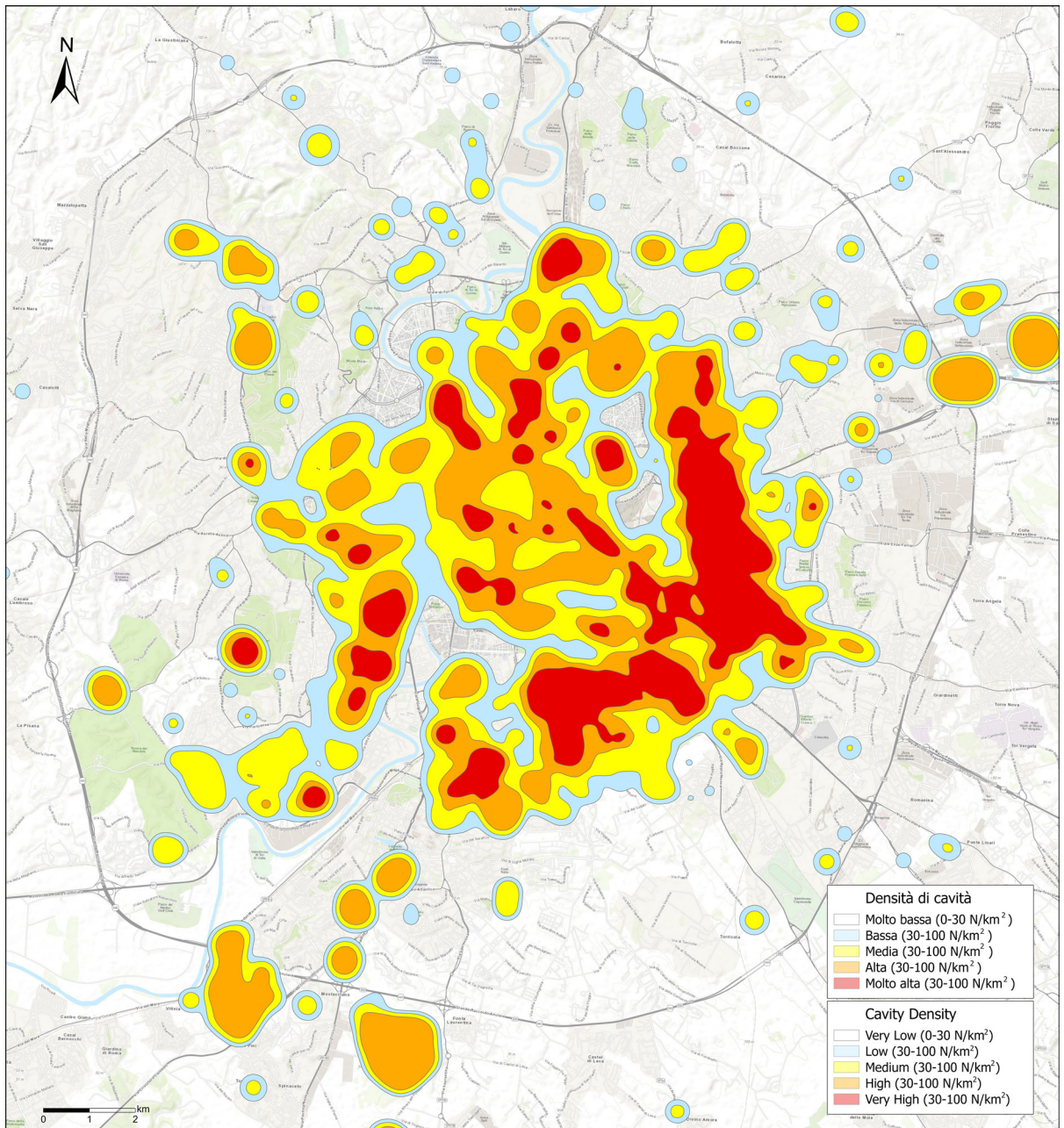


Figura 9 - Distribuzione delle cavità a Roma e relative classi di densità, le classi di densità alta e molto alta coprono un'estensione maggiore di 60 kmq. / Figure 9 - Distribution of underground cavities in Rome and related density classes; the high- and very high-density classes cover an area exceeding 60 km<sup>2</sup>.

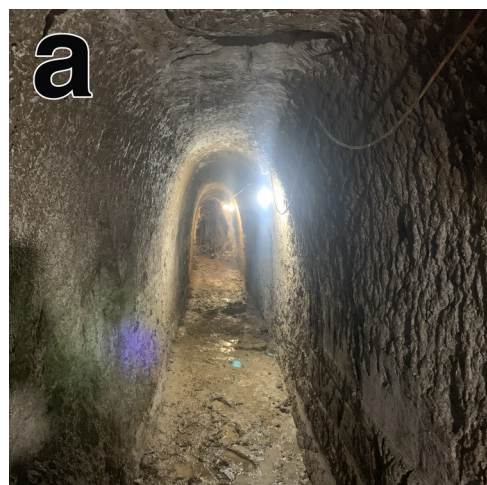
settore compreso tra Via Prenestina e Via Casilina, storicamente interessato da attività estrattive nei depositi pozzolanacei; nel Municipio VIII, all'interno del Parco Regionale dell'Appia Antica, dove si concentrano numerosi complessi catacombali cristiani ed ebraici e aree di coltivazione sotterranea del tufo lionato e delle pozzanelle; Municipio XI presso la via Portuense e il Trullo; nel Municipio XII, nell'area collinare di Monteverde (Fig. 11), in corrispondenza delle Catacombe di Ponziano.

Al contrario, i settori nord-occidentali e occidentali del territorio comunale risultano caratterizzati da una minore concentrazione di cavità sotterranee. Tale distribuzione è principalmente legata sia alla diversa litologia affiorante, meno idonea allo sviluppo di cavità ipogee estese, sia alla minore intensità delle attività estrattive storiche in tali aree.

Nel complesso, la carta di densità evidenzia come la distribuzione delle cavità sotterranee nel territorio romano sia strettamente correlata alla presenza di depositi piroclastici facilmente sfruttabili e alla localizzazione delle principali aree di sfruttamento minerario e funerario di epoca romana.

### Discussione

La distribuzione spaziale delle cavità sotterranee evidenziata dalla mappa di densità mostra una chiara relazione con l'assetto geologico e geomorfologico del territorio romano, nonché con la storia delle attività antropiche che hanno interessato il sottosuolo della città. In particolare, la concentrazione delle cavità nei settori orientali e sud-orientali dell'area urbana risulta strettamente correlata alla presenza dei depositi piroclastici pleistocenici del Distretto Vulcanico dei Colli Albani, costituiti prevalentemente da pozzolane, tufi e piroclastiti incoerenti o debolmente cementate. Tali litologie presentano caratteristiche geotecniche favorevoli allo scavo sotterraneo, risultando facilmente sfruttabili ma al tempo stesso sufficientemente coerenti da consentire la realiz-



*Figura 10 - Esempi di ambienti ipogei: a) cunicolo idraulico, b) rifugio antiaereo; c) ipogeo di culto mitreo. / Figure 10 - Examples of underground environments: (a) hydraulic tunnel; (b) air-raid shelter; (c) Mithraic hypogeum.*

zazione di sistemi di gallerie relativamente stabili. Questo fattore ha favorito, sin dall'antichità, lo sviluppo di un'intensa attività estrattiva finalizzata alla produzione di materiali da costruzione, determinando la formazione di estese reti ipogee. Le aree caratterizzate da maggiore densità di cavità coincidono infatti con i principali settori storicamente interessati dallo sfruttamento minerario dei depositi pozzolanacei e tufacei, nonché con le aree in cui si sviluppano i principali complessi catacombali della città. In particolare, le zone comprese tra le vie Prenestina, Casilina, Tiburtina e Nomentana rappresentano alcuni dei principali distretti estrattivi di epoca romana, nei quali l'attività mineraria ha prodotto sistemi di gallerie sotterranee spesso articolati su più livelli. Analogamente, il settore dell'Appia Antica costituisce un'area di particolare concentrazione di cavità sotterranee, dovuta sia alla presenza di importanti complessi catacombali cristiani ed ebraici sia allo sfruttamento delle piroclastiti del Distretto Vulcanico dei Colli Albani.

Il centro storico della città presenta anch'esso valori elevati di densità di cavità, riconducibili alla presenza di numerosi ipogei, cunicoli idraulici, ambienti funerari e resti di antiche attività estrattive. In queste aree la sovrapposizione di differenti tipologie di cavità, realizzate in epoche diverse e per finalità differenti, ha determinato la formazione di un sistema sotterraneo particolarmente complesso e stratificato.

Al contrario, i settori nord-occidentali e occidentali del territorio romano risultano caratterizzati da una minore densità di cavità sotterranee. Tale distribuzione appare principalmente legata alla diversa natura litologica dei terreni affioranti, costituiti in larga parte da depositi argillosi o sabbiosi appartenenti alle successioni sedimentarie marine e fluviali plio-pleistoceniche. Queste litologie risultano generalmente meno idonee allo sviluppo di sistemi ipogei estesi, sia per la minore stabilità delle cavità scavate nei sedimenti incoerenti sia per la minore convenienza economica delle attività estrattive.

distribution appears mainly related to the different lithological nature of the outcropping deposits, which consist largely of clayey or sandy deposits belonging to Plio-Pleistocene marine and fluvial sedimentary successions. These lithologies are generally less suitable for the development of extensive hypogeal systems, both because of the lower stability of cavities excavated in unconsolidated sediments and because of the lower economic convenience of quarrying activities.

The distribution of underground cavities is also particularly significant in relation to the subsidence phenomena affecting the city of Rome. The presence of extensive systems of anthropogenic voids in the subsurface represents one of the main predisposing factors for the formation of urban sinkholes (Meloni & Nisio, 2013; Basso et al., 2013; Tufano et al., 2022; Ciotoli et al., 2015). In many cases, surface collapses are triggered by degradation processes affecting pre-existing cavities, aggravated by water infiltration associated with intense rainfall or leakage from modern infrastructure networks such as aqueducts and sewers. The interaction among anthropogenic underground cavities, geomechanical characteristics of the ground, and urban hydrological dynamics therefore constitutes one of the main controlling factors of subsurface instability phenomena in the urban context of Rome.

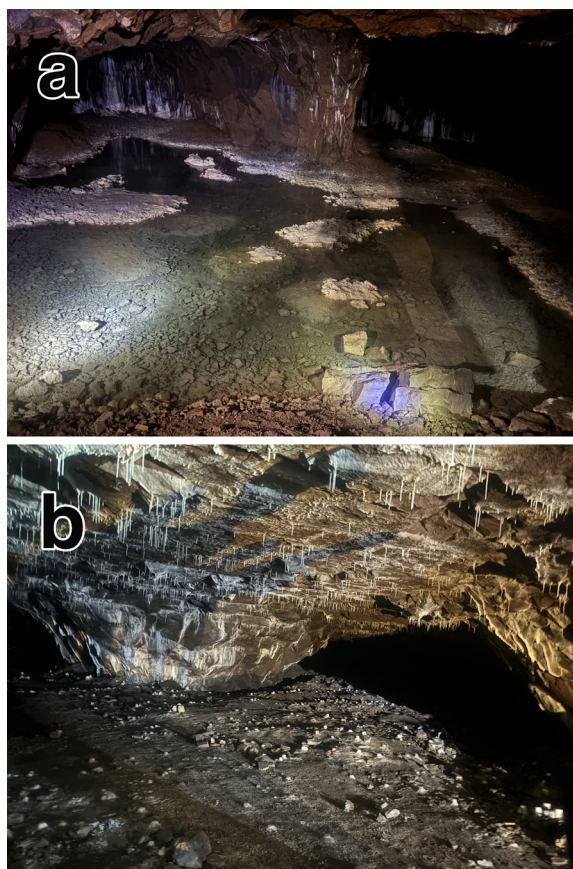
Within this framework, the underground cavity density map represents a useful tool for identifying the areas most susceptible to subsidence phenomena and may provide a knowledge base for land-use planning and geological risk management in urban areas (Di Salvo et al., 2018, 2024; Fiore & Lanzini, 2007; Ciotoli et al., 2011, 2015, 2026). Integration of historical data, cavity mapping, and spatial analysis makes it possible to improve understanding of the distribution of underground voids and to identify those sectors of the urban territory where the probability of interaction between anthropogenic cavities and subsurface collapse processes is highest.

Table 4 summarizes the relationships among the

La distribuzione delle cavità sotterranee assume inoltre particolare rilevanza nel contesto dei fenomeni di sprofondamento che interessano la città di Roma. La presenza di estesi sistemi di vuoti antropici nel sottosuolo rappresenta infatti uno dei principali fattori predisponenti alla formazione di sinkhole urbani (Meloni & Nisio, 2013; Basso et al., 2013; Tufano et al., 2022, Ciotoli et al., 2015, 2026). In molti casi i collassi superficiali risultano innescati da processi di degrado delle cavità preesistenti, aggravati dall'azione di infiltrazioni idriche provenienti da precipitazioni intense o da perdite delle reti infrastrutturali moderne, quali acquedotti e fognature. L'interazione tra cavità sotterranee antropiche, caratteristiche geomeccaniche dei terreni e dinamiche idrologiche urbane costituisce pertanto uno dei principali fattori di controllo dei fenomeni di instabilità del sottosuolo nel contesto urbano romano.

In questo quadro, la mappa di densità delle cavità sotterranee rappresenta uno strumento utile e propedeutico per l'individuazione delle aree maggiormente suscettibili ai fenomeni di sprofondamento e può costituire una base conoscitiva per la pianificazione territoriale e per la gestione del rischio geologico nelle aree urbane (Di Salvo et al., 2018, 2024; Fiore & Lanzini, 2007; Ciotoli et al., 2011, 2015). L'integrazione tra dati storici, cartografia delle cavità e analisi spaziali consente infatti di migliorare la comprensione della distribuzione dei vuoti sotterranei e di individuare i settori del territorio urbano in cui risulta più elevata la probabilità di interazione tra cavità antropiche e processi di collasso del sottosuolo.

La Tabella 4 sintetizza le relazioni tra le principali unità litostratigrafiche affioranti nel territorio romano, le tipologie di cavità sotterranee associate e la relativa suscettibilità ai fenomeni di sprofondamento. L'analisi evidenzia come la distribuzione delle cavità sotterranee sia strettamente condizionata dalle caratteristiche litologiche e geomeccaniche dei terreni, nonché dalla storia delle attività antropiche che hanno interessato il sottosuolo della città.



*Figura 11 - Cave di tufo presso Monteverde: a) stillicidi di acque percolanti; b) lago sotterraneo di Monteverde./ Figure 11 - Tuff quarries in Monteverde area: (a) dripping water from percolation; (b) the Monteverde underground lake.*

main lithostratigraphic units cropping out in the Roman territory, the associated types of underground cavities, and their relative susceptibility to subsidence phenomena. The analysis shows that the distribution of underground cavities is strongly controlled by the lithological and geomechanical characteristics of the ground, as well as by the history of anthropogenic activities affecting the city's subsurface.

In particular, lithostratigraphic units composed of pyroclastic deposits, such as pozzolanas and tuffs belonging to the Colli Albani and Monti Sabatini volcanic districts, are those most affected by the presence of underground cavities. These lithologies, characterized by good workability

In particolare, le unità litostratigrafiche costituite da depositi piroclastici, quali le pozzolane e i tufi appartenenti al Distretto Vulcanico dei Colli Albani e dei Monti Sabatini, risultano essere quelle maggiormente interessate dalla presenza di cavità sotterranee. Tali litologie, caratterizzate da una buona lavorabilità e da una sufficiente stabilità degli ambienti ipogei, hanno favorito nel corso dei secoli lo sviluppo di estese attività estrattive per la produzione di materiali da costruzione, nonché la realizzazione di catacombe, ipogei funerari e cunicoli idraulici. Di conseguenza, le aree di affioramento di queste unità presentano i livelli più elevati di suscettibilità ai fenomeni di sprofondamento (Ciotoli et al., 2026), soprattutto nelle aree in cui i sistemi di gallerie risultano più articolati o interessati da processi di degrado strutturale.

Le unità caratterizzate da depositi sabbiosi e ghiaiosi pleistocenici, come quelle appartenenti alle formazioni di Ponte Galeria e di Santa Cecilia, mostrano una presenza più limitata di cavità sotterranee, generalmente legata a attività estrattive più recenti per lo sfruttamento di sabbie e ghiaie. In questi contesti, la propensione ai fenomeni di collasso è legata principalmente alla minore stabilità dei depositi incoerenti e alla possibile evoluzione di cavità per erosione o cedimento dei terreni.

Al contrario, le unità costituite da depositi argillosi, come la Formazione di Monte Vaticano *Auct.*, risultano poco interessate dalla presenza di cavità sotterranee estese, a causa delle caratteristiche geotecniche dei terreni che rendono difficoltosa e instabile la realizzazione di ambienti ipogei. In questi contesti la suscettibilità ai fenomeni di sprofondamento risulta generalmente più bassa. La tabella evidenzia inoltre il ruolo dei terreni di riporto e dei depositi alluvionali recenti, nei quali possono svilupparsi cavità di origine secondaria legate a processi erosivi (non evidenziati nella carta) indotti da infiltrazioni idriche provenienti da infrastrutture urbane, quali reti fognarie e acquedotti. In tali casi i fenomeni di sprofondamento

and sufficient stability of hypogeal environments, favored the development over the centuries of extensive quarrying activities for the production of construction materials, as well as the excavation of catacombs, funerary hypogea, and hydraulic tunnels. Consequently, the outcrop areas of these lithological units show the highest levels of susceptibility to subsidence phenomena (Ciotoli et al., 2026), particularly in zones where the tunnel systems are more complex or affected by structural degradation processes.

Units characterized by Pleistocene sandy and gravelly deposits, such as those belonging to the Ponte Galeria and Santa Cecilia formations *Auct.*, show a more limited presence of underground cavities, generally related to more recent extraction activities for sand and gravel. In these settings, susceptibility to collapse phenomena is mainly related to the lower stability of unconsolidated deposits and to the possible evolution of cavities through erosion or ground settlement.

Conversely, units composed of clayey deposits, such as the Monte Vaticano Formation *Auct.*, are only marginally affected by extensive underground cavities because of the geotechnical characteristics of the ground, which make the construction of hypogeal environments difficult and unstable. In these contexts, susceptibility to subsidence phenomena is generally lower.

The table also highlights the role of anthropogenic fill and recent alluvial deposits, in which secondary cavities may develop as a result of erosional processes induced by water infiltration from urban infrastructures such as sewer and aqueduct networks. In such cases, subsidence phenomena are often associated with progressive erosion of the ground surrounding the conduits, with the formation of voids that may evolve into surface collapses.

Overall, Table 4 highlights the relationship between sinkhole phenomena in the Roman territory and geological factors (lithology and geomechanical characteristics of the soils), anthropogenic factors (mining activities and underground

UNITÀ LITOSTRATIGRAFICA	LITOLOGIA PREVALENTE	TIPOLOGIA PRINCIPALE DI CAVITÀ	SVILUPPO DELLE CAVITÀ	PERIODO STORICO DI REALIZZAZIONE	SUSCETTIBILITÀ AI SINKHOLE
Piroclastiti sabatine	Tufi stratificati e piroclastiti alterate	Catacombe, cunicoli idraulici, cave	Ramificato e localmente su più livelli	Romano	Elevata
Pozzolane rosse (Colli Albani)	Depositi piroclastici incoerenti o debolmente cementati	Cave per materiali da costruzione	Ramificato o a rete, talvolta multilivello	Romano con riuso medievale	Molto elevata
Pozzolane nere e pozzolanelle	Depositi piroclastici incoerenti	Cave estrattive	Ramificato o a rete	Romano e medievale	Elevata
Tufo litoide lionato	Tufo compatto	Cave sotterranee e ambienti funerari	Gallerie isolate o ramificate	Romano	Media
Depositi sabbiosi e ghiaiosi (Unità di Ponte Galeria, S. Cecilia)	Sabbie e ghiaie fluviali	Cave per sabbia e ghiaia	Ramificato ma con gallerie di dimensioni ridotte	Romano e contemporaneo	Medio-elevata
Depositi alluvionali recenti	Sabbie, limi e argille alluvionali	Infrastrutture fognarie e cunicoli	Lineare o ramificato	Romano e moderno	Media
Terreni di riporto urbano	Materiali eterogenei antropici	Cavità indotte da erosione	Puntuale ed evolutivo	Contemporaneo	Molto elevata
Depositi argillosi (Unità di Monte Vaticano)	Argille marine	Cavità limitate (pozzi, piccoli ambienti)	Isolato o puntuale	Romano	Bassa

*Tabella 4 - Relazione tra unità litostratigrafiche, tipologie di cavità sotterranee e suscettibilità ai fenomeni di sprofondamento nel territorio urbano di Roma.*

risultano spesso associati alla progressiva erosione dei terreni circostanti le condotte, con formazione di vuoti che possono evolvere in collassi superficiali.

Nel complesso, la Tabella 4 mette in evidenza la relazione tra i fenomeni di sinkhole nel territorio romano e i fattori geologici (litologia e caratteristiche geomeccaniche dei terreni), i fattori antropici (attività estrattive e infrastrutture sotterranee) e i processi idrologici, fornendo un quadro interpretativo utile per comprendere la distribuzione spaziale dei fenomeni di instabilità del sottosuolo nel contesto urbano.

### Conclusioni

Il presente lavoro ha consentito di aggiornare e ampliare significativamente il quadro conoscitivo relativo alla distribuzione delle cavità sotterranee nel territorio urbano di Roma. Attraverso

infrastructures), and hydrological processes, providing an interpretative framework useful for understanding the spatial distribution of subsurface instability phenomena in the urban context.

### Conclusions

The present study made it possible to significantly update and expand the knowledge framework concerning the distribution of underground cavities within the urban territory of Rome. Through the integration of data derived from scientific literature, historical cartographic archives, institutional databases, archaeological mapping, and direct investigations, a georeferenced database of underground cavities was constructed, allowing the production of a new underground cavity map and a density map of hypogeal systems occurring in the urban subsurface.

The analysis led to the collection of approxima-

LITOSTRATIGRAFIC UNIT	DOMINANT LITHOLOGY	TIPOLOGIA PRINCIPALE DI CAVITÀ	CAVITY DEVELOPMENT	HISTORICAL PERIOD OF CONSTRUCTION	SUSCEPTIBILITY TO SINKHOLES
Sabatini pyroclastics	Stratified tuffs and altered pyroclastics	Catacombs, hydraulic tunnels, quarries	Branching and locally on multiple levels	Roman	High
Pozzolane rosse (Colli Albani)	Unconsolidated or weakly cemented pyroclastic deposits	Quarries for construction materials	Branching or network pattern, locally multilevel	Roman with medieval reuse	Very high
Pozzolane nere and pozzolanelle	Unconsolidated pyroclastic deposits	Extraction quarries	Branching or network pattern	Roman and medieval	High
Tufo Lionato (lithoid tuff)	Compact tuff	Underground quarries and funerary spaces	Isolated or branching galleries	Roman	Moderate
Sandy and gravelly deposits (Ponte Galeria Unit, Santa Cecilia Unit)	Fluvial sands and gravels	Sand and gravel quarries	Branching, but with smaller galleries	Roman and modern/contemporary	Moderate–high
Recent alluvial deposits	Alluvial sands, silts, and clays	Sewer infrastructures and tunnels	Linear or branching	Roman and modern	Moderate
Urban anthropogenic fill	Heterogeneous anthropogenic materials	Erosion-induced cavities	Point-like and evolving	Contemporary	Vary high
Clayey deposits (Monte Vaticano Unit)	Marine clays	Limited cavities (wells, small chambers)	Isolated or point-like	Roman	Low

*Table 4 - Relationship among lithostratigraphic units, types of underground cavities, and susceptibility to subsidence phenomena in the urban territory of Rome.*

l'integrazione di dati provenienti da letteratura scientifica, archivi cartografici storici, database istituzionali, cartografie archeologiche e indagini dirette, è stato costruito un database georeferenziato delle cavità sotterranee che ha permesso la realizzazione di una nuova carta delle cavità e di una mappa di densità dei sistemi ipogei presenti nel sottosuolo urbano.

L'analisi ha portato alla raccolta di circa 5600 elementi puntuali e 1500 elementi poligonali/lineari, riferiti a differenti tipologie di cavità sotterranee (cave, catacombe, ipogei, cunicoli idraulici e altre infrastrutture sotterranee), distribuiti su un'area di più di 350 km<sup>2</sup> in cui si evidenzia una densità di cavità sotterranee alta e molto alta, del territorio comunale caratterizzata dalla presenza di sistemi ipogei. L'elaborazione dei dati mediante tecniche GIS e analisi di densità ha evidenziato

tely 5,600 point features and 1,500 polygonal elements referring to different types of underground cavities (quarries, catacombs, hypogea, hydraulic tunnels, and other underground infrastructures), distributed over an area of approximately 350 km<sup>2</sup> of the municipal territory characterized by high to very high underground cavity density and by the presence of hypogeal systems. Data processing by means of GIS techniques and density analysis highlighted a markedly heterogeneous spatial distribution of underground cavities.

The results show that the areas with the highest concentration of cavities are located mainly in the eastern and southeastern sectors of the city and in the historic center, corresponding to zones historically affected by quarrying activities within the pyroclastic deposits of the Colli Albani Volcanic District and by the presence of catacomb systems.

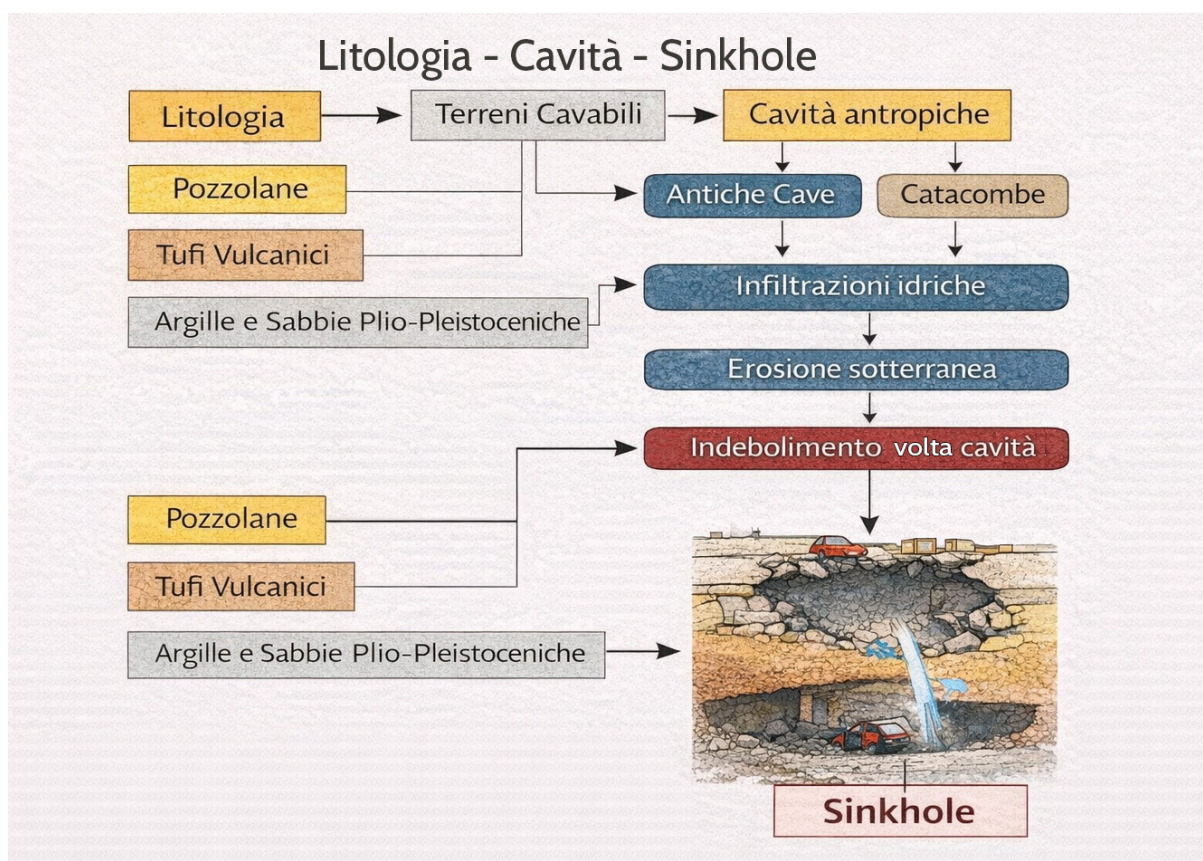


Figura 12 - Mappa concettuale “litologia - cavità - sinkhole”

una distribuzione spaziale fortemente eterogenea delle cavità sotterranee.

I risultati mostrano come le aree a maggiore concentrazione di cavità si localizzino principalmente nei settori orientali e sud-orientali della città e nel centro storico, in corrispondenza delle zone storicamente interessate dalle attività estrattive nei depositi piroclastici del Distretto Vulcanico dei Colli Albani e dalla presenza di sistemi catacombali. Al contrario, i settori nord-occidentali e occidentali del territorio romano presentano una minore densità di cavità sotterranee, principalmente in relazione alla diversa natura litologica dei terreni affioranti e alla minore intensità delle attività estrattive storiche.

La cartografia prodotta rappresenta uno strumento di sintesi utile per la comprensione della distribuzione dei vuoti sotterranei nel sottosuolo romano e costituisce una base conosciti-

By contrast, the northwestern and western sectors of the Roman territory display a lower density of underground cavities, mainly in relation to the different lithological nature of the outcropping deposits and to the lower intensity of historical quarrying activities.

The resulting cartography represents a useful synthesis tool for understanding the distribution of underground voids in the Roman subsurface and provides an important knowledge base for the preliminary assessment of susceptibility to subsidence phenomena (anthropogenic sinkholes; Fig. 12).

In particular, the integration of historical information, geological data, and spatial analyses makes it possible to identify sectors of the urban territory where the presence of underground cavities represents one of the key factors in determining hazard and potential risk for subsurface stability

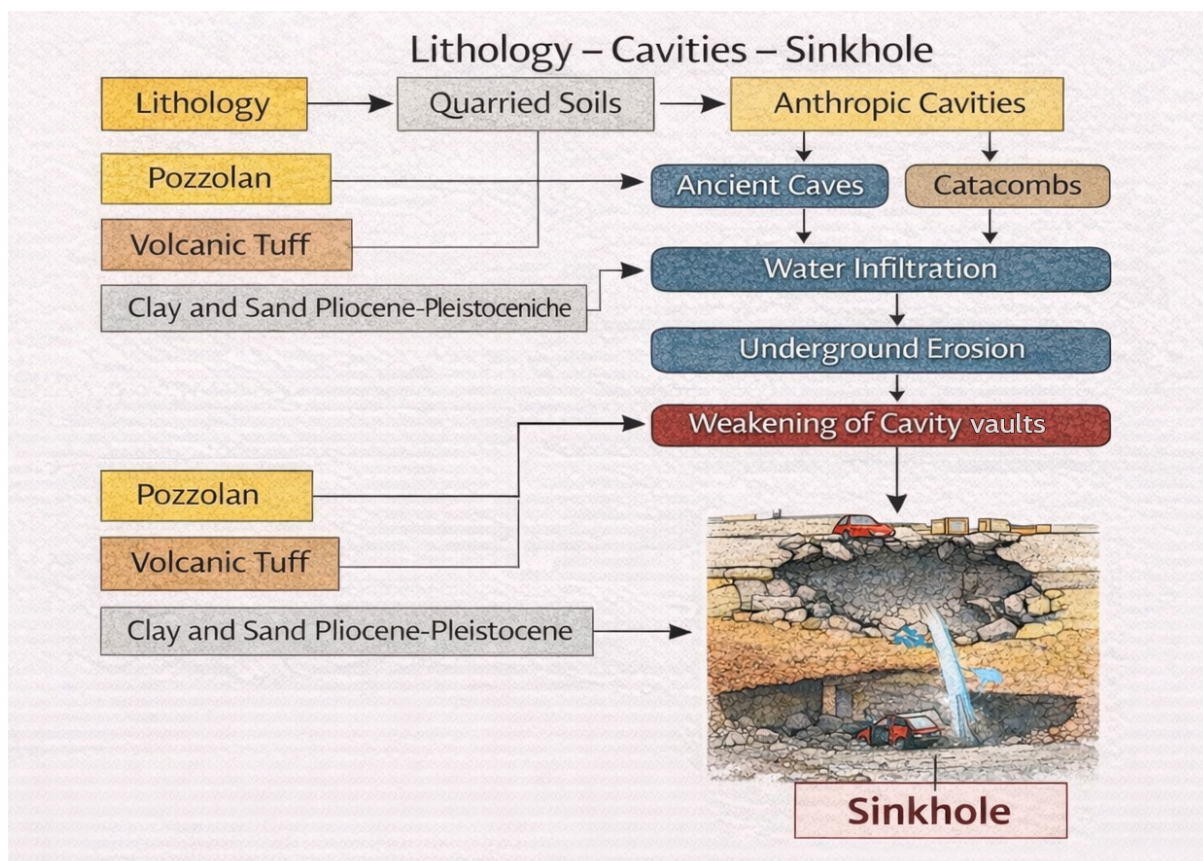


Figure 12 - Conceptual “lithology - cavity - sinkhole” map.

va importante per la valutazione preliminare e propedeutica della suscettibilità ai fenomeni di sprofondamento (sinkholes antropici, Fig. 12). In particolare, l’integrazione tra informazioni storiche, dati geologici e analisi spaziali consente di individuare i settori del territorio urbano nei quali la presenza di cavità sotterranee rappresenta uno dei fattori per la determinazione della pericolosità e del rischio potenziale per la stabilità del sottosuolo e per la sicurezza delle infrastrutture urbane.

Tuttavia, lo studio presenta alcuni limiti metodologici, principalmente legati alla natura eterogenea e alla qualità delle fonti informative disponibili. Una parte significativa dei dati utilizzati deriva infatti da documentazione storica o da studi precedenti nei quali la localizzazione delle cavità non era originariamente georeferenziata. Di conseguenza, il posizionamento spaziale di

and for the safety of urban infrastructures.

However, the study has some methodological limitations, mainly related to the heterogeneous nature and quality of the available information sources. A significant proportion of the data used derives from historical documentation or from previous studies in which cavity locations were not originally georeferenced. Consequently, the spatial positioning of some cavities represented on the map may be affected by a certain degree of uncertainty. Moreover, for many areas historically affected by quarrying activities, neither detailed plans of underground galleries nor updated information on the state of preservation or possible remediation of the cavities are available.

A further limitation concerns the possible underestimation of the actual extent of underground cavities, since numerous hypogeal systems are now obliterated by urbanization or remain undoc-

alcune cavità rappresentate nella carta può essere affetto da un certo grado di incertezza. Inoltre, per molte aree storicamente interessate da attività estrattive non sono disponibili planimetrie dettagliate delle gallerie sotterranee né informazioni aggiornate sullo stato di conservazione o sull'eventuale bonifica delle cavità.

Un ulteriore limite riguarda la possibile sottostima della reale estensione delle cavità sotterranee, poiché numerosi sistemi ipogei risultano oggi obliterati dall'urbanizzazione o non documentati nelle fonti disponibili. Pertanto, la carta realizzata deve essere interpretata come una rappresentazione aggiornata ma non esaustiva della distribuzione delle cavità sotterranee nel territorio romano. Alla luce di queste considerazioni, ulteriori sviluppi della ricerca potrebbero includere l'integrazione sistematica di nuovi dati provenienti da indagini geognostiche, rilievi speleologici e tecniche geofisiche applicate allo studio del sottosuolo urbano. L'aggiornamento continuo del database delle cavità sotterranee e il suo utilizzo nell'ambito degli strumenti di pianificazione territoriale rappresentano elementi fondamentali per migliorare la conoscenza del sottosuolo della città e per supportare le attività di prevenzione e gestione della suscettibilità, della pericolosità e del rischio geologico nelle aree urbane.

#### **Ringraziamenti**

Si desiderano ringraziare le Associazioni speleologiche Roma Sotterranea e Sotterranei di Roma per il contributo durante le operazioni di rilievo in sotterraneo e il Dott. Maurizio Lanzini Sigea Lazio per il contributo nella ricerca.

documented in the available sources. Therefore, the map produced should be interpreted as an updated, though not exhaustive, representation of the distribution of underground cavities within the Roman territory.

In light of these considerations, further research developments could include the systematic integration of new data derived from geognostic investigations, speleological surveys, and geophysical techniques applied to the study of the urban subsurface. Continuous updating of the underground cavity database and its use within land-use planning tools represent fundamental elements for improving knowledge of the city's subsurface and for supporting geological risk prevention and management activities in urban areas.

#### **Acknowledgements**

The authors wish to thank the speleological associations Roma Sotterranea and Sotterranei di Roma, Dr. Maurizio Lanzini Sigea Lazio, for their contribution during underground survey operations.

## BIBLIOGRAFIA/REFERENCES

- AMIRANTE D., BERSANI P. & NISIO S. (2023) - *Città abbandonate in epoche remote e cavità sotterranee: il caso di Veio e confronti con l'antica città di Troia*. Mem. Descr. della Carta Geol. d'It., **110**: 5-16.
- ANAPPO A. & NISIO S. (2021) - *La storia e le cavità sotterranee nei Monti del Trullo (Roma)*. Mem. Descr. della Carta Geol. d'It., **108**: 299-308.
- BASSO N., CIOTOLI G., FINOIA M.G., GUARINO P.M., MIRAGLINO P. & NISIO S. (2013)- *Suscettibilità ai fenomeni di sinkholes antropogenici nel territorio di Napoli*. Mem. Descr. della Carta Geol. d'It., **93**: 73-104.
- BERNABINI M., ESU F., MARTINETTI S. & RIBACCHI R. (1966) - *On the stability of the pillars in a underground quarry worked through soft pyroclastic rocks*, Proc. I Int. Cong. Rock Mech., pag. 285-291.
- BERSANI P. & NISIO S. (2021 a) - *Ipogei e i luoghi di culto nascosti sotto la Via Nomentana*. Mem. Descr. della Carta Geol. d'Italia., **108**: 309-318.
- BERSANI P. & NISIO S. (2021 b) - *La Via Nomentana: luoghi di culto ipogei e acque sotterranee*. Geologia Ambientale, suppl. **1**/2021 Sigea 239-244.
- BERSANI P., NISIO S. & PIZZINO L. (2013) - *Presenza di acque mineralizzate ed emissioni gassose nell'area compresa tra Roma e il litorale sud: dati storici e nuovi contributi*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **93**, 409-438.
- BERSANI P., NISIO S. & PIZZINO L. (2018) - *La presenza di acque nelle cavità sotterranee di Roma*. SIGEA - Soc. It. di Geol. Amb., Geologia dell'Ambiente **4**/2018. Sigea
- BISCONTI F., CIOTOLI G., FERRI G., FIORE R., LANZINI M., NISIO S., PAOLUCCI R., ROMA M., STRANIERI I., SUCCHIARELLI C. & ALLEVI M. (2018) - *Primo contributo alla realizzazione della carta delle cavità sotterranee di Roma*. SIGEA - Soc. It. di Geol. Amb., Geologia dell'Ambiente **4**/2018, 15-22.
- CAPELLI G., MAZZA R. & TAVIANI S. (2008) - *Acque sotterranee nella città di Roma*. Mem. Descr. della Carta Geol. d'It., **80**: 221-245. ISSN: 0536-0242.
- CARAMANNA G., CIOTOLI G. & NISIO S. (2008) - *A review of natural sinkhole phenomena in Italian plain areas*. Natural Hazards, **45**(2): 145-172. DOI: 10.1007/s11069-007-9165-7.
- CIOTOLI G., CORAZZA A., FINOIA M.G., NISIO S. & SUCCHIARELLI C. (2013) - *Gli sprofondamenti antropogenici nell'aria urbana di Roma*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It. **93**: 143-182.
- CIOTOLI G., DI LORETO E., FINOIA M.G., LIPERI L., MELONI F., NISIO S. & SERICOLA A. (2016) - *Sinkhole susceptibility, Lazio region, central Italy*. Journal of Maps, **12**(2): 287-294. DOI: 10.1080/17445647.2015.1014939.
- CIOTOLI G. & NISIO S. (2018) - *Roma, vaste aree di cavità sotterranee scomparse. il caso della catacomba di san felice sulla via Portuense*. SIGEA - Soc. It. di Geol. Amb., Geologia dell'Ambiente **4**/2018: 37-45.
- CIOTOLI G. & NISIO S. (2021) - *Le cavità sotterranee lungo la Portuense e il cimitero scomparso di San Felice*. Mem. Descr. della Carta Geol. d'It., **108**.
- CIOTOLI G. & NISIO S. (2021) - *La Via Campana-Portuense e le cavità sotterranee*. Geologia Ambientale, suppl. **1**/2021 Sigea 64-69.
- CIOTOLI G. & NISIO S. (2023) - *Roma città sotterranea: storia di coltivazioni e pericolosità al dissesto*. Mem. Descr. della Carta Geol. d'It., **110**: 145-168.
- CIOTOLI G., NISIO S. & SERAFINI R. (2015) - *Analisi della suscettibilità ai sinkholes antropogenici nel centro urbano di Roma*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **99**: 167-188.
- CIOTOLI G., RUGGIERO L., MORI F., ANNUNZIATELLIS A., DI SALVO C., FINOIA M. G., VARONE C., MOSCATELLI M. & NISIO S. (2026) - *Assessment of anthropogenic sinkhole risk in the metropolitan area of Rome (Italy)*. Engineering geology, **368** (2026), 108740, 1-19. DOI: 10.1016/j.enggeo.2025.108740.
- CIOTOLI G., STIGLIANO F., MARCONI F., MOSCATELLI M., MANCINI M. & CAVINATO G.P. (2011) - *Mapping the Anthropogenic Backfill of the Historical Center of Rome (Italy) by Using Intrinsic Random Functions of Order k (IRF-k)*, Computational Science and Its Applications ICCSA 2011, International Conference Santander, Spain, June 20-23, 2011 Proceedings, Part I, B. MURGANTE, O. GERVAZI A. IGLESIAS, D. TANIAR, B.O. APDUHAN (Eds.), © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011, DOI 10.1007/978-3-642-21928-3.
- COMUNE DI ROMA (1988) - *Carta storica archeologica monumentale e paesistica del suburbio e dell'Agro Romano*.

- Ripartizione X Antichità e Belle Arti, Ufficio Carta dell'Agro (1988) scala 1:10.000, 38 fogli, Roma.
- CORAZZA A. (2004) - *Il rischio di fenomeni di sprofondamento in Italia: le attività del Dipartimento della Protezione Civile. Atti 1° Seminario "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio"*, Roma 20-21 Maggio 2004, 319-330.
- CORAZZA A. (2010) - *Individuazione di movimenti precursori di sprofondamenti nell'area urbana di Roma attraverso l'utilizzo dell'interferometria differenziale. Atti 2° Workshop internazionale: I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato. Roma 3-4 dicembre 2009. ISPRA, 685-702.*
- CRESCENZI R., PIRO M. & VALLESI L. (1995) - *Le cavità sotterranee a Roma - In: La geologia di Roma: il centro storico. Mem. Descr. Carta Geol. d'It, 50: 249-278.*
- DE ANGELIS D'OSSAT (1933) - *La geologia e le catacombe romane. Catacombe via Tiburtina, Nomentana, Salaria Vecchia, Salaria nuova e Flaminia. Mem. P. Acc. Nuovi Lincei, 14-16, Roma.*
- DE ANGELIS D'OSSAT G. (1935)- *La geologia e le catacombe romane II. Catacombe sulle vie Cornelia e Aurelia. Mem. P. Acc. Nuovi Lincei, 17, Roma.*
- DE ANGELIS D'OSSAT G. (1936) - *Sepolcro degli Scipioni. Boll. Comm. Arch. Com. 64, Roma.*
- DE ANGELIS D'OSSAT G. (1940) - *La stabilità delle cave e cavità sotterranee. Materia prima d'Italia, 5, Roma.*
- DE ANGELIS D'OSSAT G. (1943) - *La geologia e le catacombe romane. Catacombe via Latina e Via Labicana. P. Com. per lo Studio delle Catacombe, Città del Vaticano. Piac (Ed.), 312 pp., Roma.*
- DE ANGELIS D'OSSAT G. (1945-46) - *Studi di geologia applicata alle catacombe romane. Boll. Serv. Geol. d'It., 70, Roma*
- DI SALVO C., PENNICA F., CIOTOLI G. & CAVINATO G.P. (2018) - *A GIS-based procedure for preliminary mapping of pluvial flood risk at metropolitan scale. Environmental Modelling Software, 107: 64-84. DOI: 10.1016/j.envsoft.2018.05.020.*
- DI SALVO C., CIOTOLI G., MANCINI M., NISIO S. & STIGLIANO F. (2024) - *Analysis of Geological Multi-Hazards in an Urban District. Geosciences, 14(2): 27, DOI:10.3390/geosciences14020027*
- FIGLIARELLI A. & LANZINI M. (2007) - *Problematiche di valutazione del rischio di crollo di cavità sotterranee. Geologi & Territorio, 4-2006/1-2007: 35-45.*
- FRANK T. (1924) - *Roman buildings of the Republic. Roma, 1924.*
- FUNICIELLO R., MARRA F. & ROSA C. (1995) - *I caratteri geologico-stratigrafici. in L'ecosistema Roma: ambiente e territorio, 29-39.*
- FUNICIELLO F. & ROSA C. (1995) - *L'area romana e lo sviluppo delle ricerche geologiche. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., L: 23-30.*
- FUNICIELLO R., PRATURLON A. & GIORDANO G. (a cura di) (2008 a) - *La geologia di Roma. Dal centro storico alla periferia. Mem. descr. della Soc. Geol. d'It., 80.*
- FUNICIELLO R., GIORDANO G. & MATTEI M. (2008 b) - *Carta Geologica del Comune di Roma. Mem. Descr. Carta Geol d'It., 80.*
- GIULIANELLI M., PRIGIOBBE V. & SUCCHIARELLI C. (2004) - *Nuovi metodi per quantificare infiltrazioni ed exfiltrazioni nelle fognature urbane. Geologia dell'Ambiente n. 4: 21- 26, Roma.*
- LANCIANI R. (1918) - *Delle scoperte di antichità avvenute nelle fondazioni degli edifici per le. F. S. nella ex Villa Patrizi. Agosto- settembre-ottobre, 1918.*
- LUGLI G. (1957) - *La tecnica edilizia romana: con particolare riguardo a Roma e Lazio. Vol. 1 Johnson Reprint Corporation, 1957.*
- MARRA F. , CARBONI M.G. , DI BELLA L. , FACCENNA C., FUNICIELLO R. & ROSA C. (1995) - *Il substrato pleistocenico nell'area romana. Boll. Soc. Geol. It. 114: 195-214.*
- MARRA F. & ROSA C. (1995) - *Stratigrafia e assetto geologico-strutturale dell'area romana. Mem. Descr. Carta geol. d'It. 50: 49-118.*
- MAZZA R., CAPELLI G. & LANZINI M. (2008) - *Rischio di crollo di cavità nel territorio del VI Municipio del Comune di Roma.- La geologia di Roma dal Centro Storico alla periferia. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., 80 (2): 149-170.*

- MELONI F. & NISIO S. (2013) - *Catalogo dei sinkholes antropogenici del Lazio ed organizzazione delle attività future*. Mem. Descr. della Carta Geol. d'It., **99**: 345-354.
- MOLIN D., CASTENETTO S., DI LORETO E., GUIDOBONI E., LIPERI L., NARCISI B., PACIELLO A., RIGUZZI F., ROSSI A., TERTULLIANI A. & TRAINA G. (1995) - *Sismicità di Roma*. In: La geologia di Roma: il Centro Storico. Mem. Descr. della Carta Geol. d'It. **50**: 331-408.
- MOZCO P., ROVELLI A., LABAK P. & MALAGNINI L. (1995) - *Seismic response of the geologic structure underlying the Roman Colosseum and 2-D resonance of a sediment valley*. Ann. di Geof., **XXXVIII**, 5-6, 939-956.
- NISIO S. (2008) - *I fenomeni naturali di sinkhole nelle aree di pianura italiane*. Mem. Descr. della Carta Geol. d'It. **85**, 475pp.
- NISIO S. (2010) - *Fenomeni di sprofondamento in alcuni centri urbani*. Atti 2° Workshop internazionale: I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato. Roma 3-4 dicembre 2009. ISPRA, 845-864.
- NISIO S. (2019) - *La Carta delle cavità Antropogeniche di Roma Capitale*. Quaderno Ordine degli ingegneri di Roma, pp. 20-31.
- NISIO S., ALLEVI A., CIOTOLI G., FERRI G., FIORE R., PASCUCCI R., STRANIERI I. & SUCCHIARELLI C. (2017) - *Carta delle Cavità sotterranee di Roma*. ISPRA ISBN 978-88-9311-127-0
- NISIO S., CARAMANNA G. & CIOTOLI G. (2007) - *Sinkholes in Italy: first results on the inventory and analysis*. In: PARISE M., GUNN J. (eds.), *Natural and anthropogenic hazards in karst: Recognition, Analysis and Mitigation*. Geological Society, London, Special Publications, **279**: 23-45. DOI:10.1144/SP279.4
- NISIO S., CIOTOLI G., FERRI F., MORETTI P., PUZZILLI L.M., RUGGIERO L., RUSCITO V. & CARLUCCI G. (2021) - *Primo contributo allo studio delle cavità sotterranee nascoste sotto il Parco di Centocelle nell'area urbana di Roma*. Mem. Descr. della Carta Geol. d'It., **108**: 353-362.
- NISIO S., MADONNA S., GENTILI F., ROMAGNOLI G., SCARDOZZI G., RUGGIERO L. & PLACIDI M. (2025) - *Le cavità sotterranee presenti nei piccoli centri e nelle città d'arte del Lazio: un patrimonio da esplorare e da valorizzare per mitigare i rischi geologici*. Geologia Tecnica e Ambientale Sigea, 374-386.
- NISIO S., PIZZINO L. & BERSANI P. (2020) - *Sorgenti storiche, aree termali e acque ricche in CO<sub>2</sub> quali indicatori dell'assetto strutturale della città di Roma*. Mem. Descr. della Carta Geol. d'It., **107**: 167-184.
- O'SULLIVAN D. & UNWIN J.D. (2003) - *Geographic information analysis*, published by JOHN WILEY and SONS, 436 pp.
- PRIGIOBBE V., SUCCHIARELLI C. & GIULIANELLI M. (2005) - *Valutazione dello stato strutturale d i reti fognarie urbane mediante quantificazione delle exfiltrazioni ed infiltrazioni*. Atti dei Convegni Lincei (Convegno Ecosistema Roma, Roma, 14-16 aprile 2004), pag. 345-358, Bardi Editore, Roma.
- ROGERSON P.A. (2010) - *Statistical Methods for Geography: A Student's Guide* SAGE Publications, 368 pp., ISBN 0761962875
- SANTORO V.M. & FEDERICI V. (1999) - *Studi e indagini di un sistema di cavità sul Colle Aventino (Roma)*. Atti del Convegno "Le cavità sotterranee nell'area urbana di Roma e nella Provincia. Problemi di pericolosità e gestione", Provincia di Roma e Società Italiana di Geologia Ambientale, pag. 39-72, Roma.
- SANTORO V. M. & FEDERICI V. (2002) - *Studio del sistema di cavità nella zona di via Giosafat, sul colle Aventino a Roma: valutazione del rischio potenziale e scelta degli interventi di consolidamento per il ripristino della viabilità*. Atti del XXI Convegno Nazionale di Geotecnica, A.G.I., L'Aquila, pag. 595-602.
- TORO B. & DI FILIPPO M. (1999) - *Individuazione di cavità nel sottosuolo con metodi gravimetrici. Il caso di via Buie d'Istria*. Atti del Convegno "Le cavità sotterranee nell'area urbana di Roma e nella Provincia. Problemi di pericolosità e gestione", Provincia di Roma e Società Italiana di Geologia Ambientale, pag. 73-82, Roma.
- SILVERMAN B.W. (1986) - *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Chapman, Hall, London. DOI: 10.1007/978-1-4899-3324-9.
- SCIOTTI M. (1982) - *Engineering Geological Problems Due to Old Underground Quarries in the Urban Area of Rome*. Proc. IV Int. Congress I:A:E.G.; New Delhi.
- SCIOTTI M. (1984 a) - *Il problema del recupero delle zone interessate da vecchie catacombe in sotterraneo nell' area urbana*

*di antichi centri abitati. Quarry and Construction.*

SCIOTTI M. (1984 b) - *Situazioni di rischio, naturali ed indotte, in alcuni centri abitati dell'Italia Centrale; criteri di intervento.* II Congr. Naz. Ass. I.R.CO., «La città difficile», Ferrara.

SCIOTTI M. (1986) - *Alcune osservazioni sulla situazione strati grafica di un'area franosa a Roma.* A.G. L -XVI Convegno Nazionale di Geotecnica, 14-16 Bologna.

SUCCHIARELLI C. & DI STEFANO V. (2004) - *Rilevamento di sinkholes di origine antropica e interventi urbanistici nel territorio di Monte delle piche (Roma sud-ovest).* Atti Conv. “Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio. Roma 20-21 maggio 2004”; 677-696.

TUFANO R., GUERRIERO L., CORONA M.A., BAUSILIO G., DI MARTIRE D., NISIO S. & CALCATERRA D. (2022) - *Anthropogenic sinkholes of the city of Naples, Italy: An update.* Natural Hazard, **112**: 2577-2608. DOI: 10.1007/s11069-022-05279.

VENTRIGLIA U. (1971) - *La geologia della città di Roma.* Bardi Ed.

VENTRIGLIA U. (2002) - *Geologia del territorio del Comune di Roma.* Editore Cerbone, Napoli.

VENTRIGLIA U. & SCIOTTI M. (1970) - *Cavità sotterranee - Carta geologica della città di Roma.* LAC, Firenze.