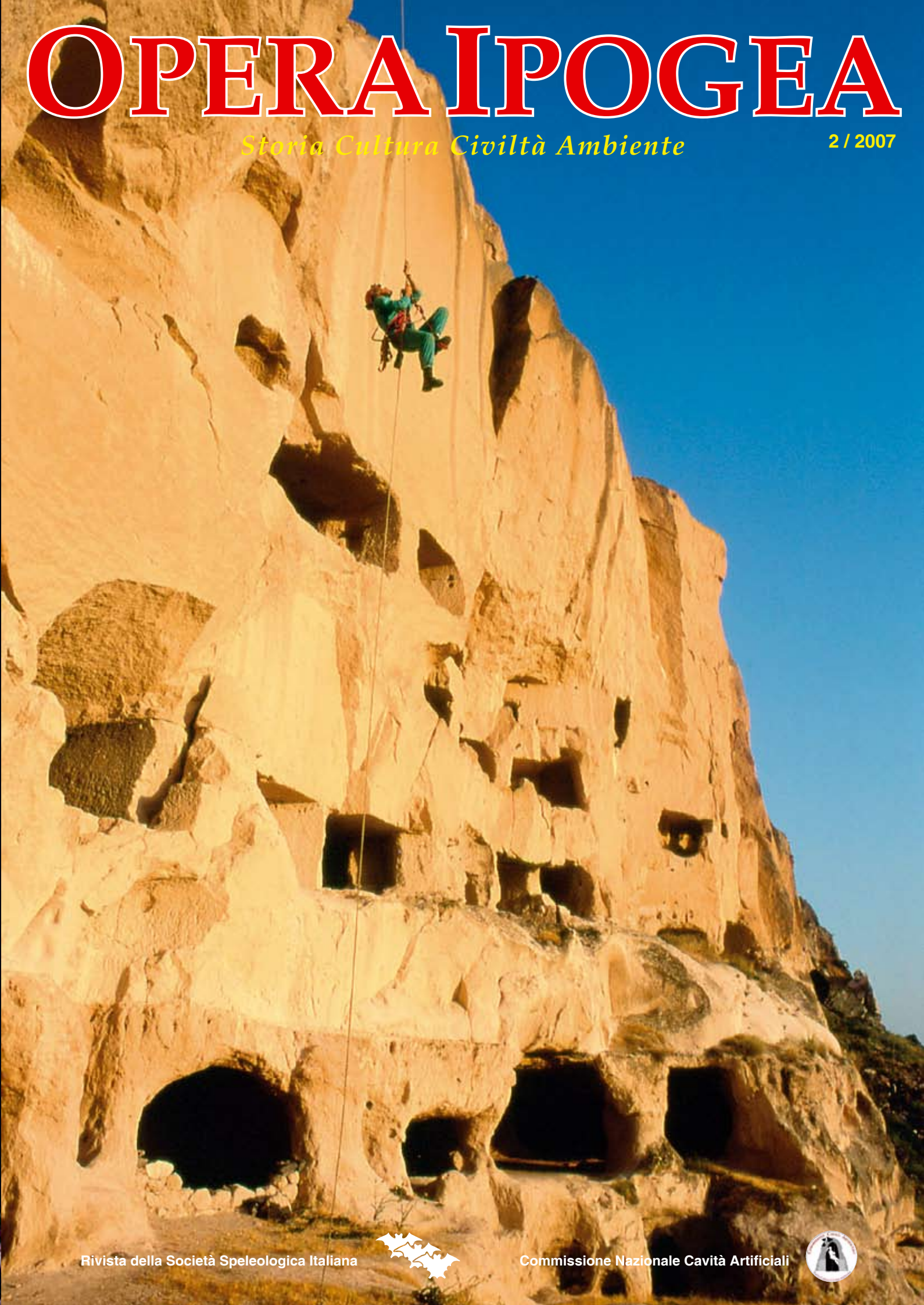


# OPERA IPOGEA

*Storia Cultura Civiltà Ambiente*

2 / 2007



# *L'influenza dei fattori geologici e geomorfologici sulla realizzazione di cavità artificiali*

Sossio Del Prete<sup>1</sup> e Mario Parise<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federazione Speleologica Campana - Gruppo Speleologico Natura Esplora

<sup>2</sup> Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, CNR Bari

## **Riassunto**

*La realizzazione e la distribuzione di ipogei artificiali in una regione può avere origini antiche e strettamente correlate alla natura geologica dei terreni affioranti e al contesto geomorfologico. Diversi sono i fattori geologici (litologici, litotecnici, idrogeologici, morfologici, endogeni) che possono influenzare la realizzazione di una cavità artificiale o più in generale, di un insediamento sotterraneo. Questi fattori singolarmente o in concomitanza fra loro possono assumere maggiore o minore importanza in funzione dell'uso previsto per la cavità artificiale e del beneficio che se ne intende trarre.*

**Parole chiave:** *cavità artificiale, geologia, geomorfologia, rischio, patrimonio culturale.*

## **Abstract**

*The habit of man to excavate artificial cavities began a very long time ago. Man's efforts were initially moved by the need to have a safe place to live, to control the surrounding territory, to collect and transport water, to exploit the natural resources. For all these purposes, he had to face a number of geological and morphological constraints that, depending on site characteristics, guided, favoured or complicated the excavation. Therefore, all the phases in the "life" of an artificial cavity, from the original idea, to the planning and realization, up to its later evolution and possible conservation, depend in some ways on geology and morphology. Lithology of hosting rock is the first aspect to consider: the rock mass must allow hand excavation but, at the same time, it should present physical-mechanical characteristics such to support the newly-formed cavity. The geological and structural setting, including the main fault lines and the discontinuity systems in the rock mass, have to be particularly taken into account. Choice of the site where to locate an artificial cavity is also dictated by morphology, the morphological factors being, in turn, strictly related to territory management and control. When safety reasons were considered to be the main priority, for instance, those sites that apparently were extremely difficult to excavate and to settle in were chosen. Morphology is also strictly related to slope instability. Several rock settlements situated at the borders of deep valleys and ravines are directly involved in mass movements, due to natural evolution of the slopes and to open cracks produced by the tensional release in the unsupported rock mass. Inside the artificial cavities, in turn, problems of instability may be observed. Locally, these may become so significant to compromise the overall stability of the structure. Slope instability processes deserve a greater attention from cavers and scientists, since their effects might be extremely dangerous for people visiting and working in artificial cavities, and for the cultural heritage therein contained as well. Availability of water resources is a further factor that controlled during historical times the choice of sites for settlements and towns. As a consequence, the hydrogeology plays a crucial role for artificial cavities, and particularly for those works intended to collect and transport water to settlers and inhabitants. Aqueducts, tunnels, fountains are, for the reasons above, very important to study in the context of the geological and hydrogeological setting, considering at the same time the social and historical aspects of the community that designed and realized them. The present contribution is a first attempt in categorizing the aforementioned factors that play a role in the realization of artificial cavities. The topic is very wide, covering several inter-related disciplines and field of research, and should deserve to be treated with much greater detail and thoroughness. Nevertheless, our hope is to stimulate with this article the cavers and the interested scientists in carrying out studies about the crucial role that geology and morphology have in the development of artificial cavities.*

**Key words:** *artificial cavities, geology, morphology, hazard, cultural heritage.*

## Introduzione

La cultura del costruire “in negativo” ha avuto un ampio sviluppo nei millenni ed un’ampia diffusione geografica accomunando culture e popoli anche molto differenti fra loro.

La realizzazione di strutture sotterranee attraverso l’escavazione manuale del substrato roccioso ha portato alla realizzazione di opere sotterranee di varia tipologia e destinazione d’uso.

Le principali motivazioni che hanno indotto culture, anche molto differenti fra loro, a sviluppare tecniche e tecnologie per costruire in negativo, sono molteplici: da quelle

di natura bellica, sia di offesa che di difesa, a quelle religiose, economiche, sociali, etc. In tutti questi casi, però, l’effettivo sviluppo di vere e proprie “città sotterranee” è stato fortemente condizionato e controllato da fattori geografici, climatici e geologici. Fra questi, l’assetto geologico e morfologico hanno sovente svolto un ruolo determinante, se non condizionante, nello sviluppo delle opere in sotterraneo.

Nell’ambito dell’assetto geologico, a sua volta, diversi sono i fattori che possono influenzare la realizzazione di una Cavità Artificiale o più in generale, di un insediamento sotterraneo (Tab. 1). Essi pos-

sono assumere maggiore o minore importanza in funzione dell’uso previsto per la cavità artificiale e del beneficio che da questa si intende trarre.

In generale, si può affermare che laddove esistano estesi affioramenti tufacei prevalgono cave sotterranee per l’estrazione di pietre da costruzione, insediamenti trogloditi o opere di culto; l’ubicazione e lo sviluppo di miniere per l’estrazione di rocce metallifere è altresì condizionato dalla giacitura e dalla potenza della vena mineralizzata nel sottosuolo, oltre che dalle tecnologie industriali disponibili (es. estrazione di Alluminio da Bauxite).

Fattori geologici	Litotecnici	Litologici	Natura rocciosa (rocce sedimentarie, ignee, metamorfiche e relative caratteristiche mineralogiche).  Struttura geologica (faglie e intersezioni di faglie o piani di taglio in genere, piani di stratificazione, di sistosità, pieghe, mineralizzazioni, etc.).
		Geotecnici	Proprietà fisiche e meccaniche dei materiali (angolo di attrito, resistenza a compressione e taglio, porosità, permeabilità, peso di volume, grado di alterazione, composizione mineralogica, storia geologica, assetto geomeccanico, etc.), terreni o rocce rigonfianti, scalzamento di grandi cunei di roccia, fenomeni di decompressione e deformazione dell’ammasso.
	Idrogeologici s.l.		Circolazione idrica sotterranea, assetto idrografico superficiale (es. bacini lacustri e conche endoreiche), emergenze sorgive, acque acide.
	Morfologici		Degradazione meteorica (disgregazione fisica e alterazione chimica) e relative morfologie prodotte (forme dei versanti, piramidi di terra, pinnacoli, <i>butte</i> , <i>mesa</i> , <i>plateau</i> , etc.).
	Endogeni		Risalite di fluidi endogeni o presenza di sacche gassose esplosive o tossiche, alte temperature, movimenti bradisismici.

Tabella 1 - Schema riassuntivo dei fattori geologici che incidono sulla realizzazione, l’esplorazione e la conservazione di una cavità artificiale.



Fig. 1 - Panoramica della struttura ad archi dei Ponti della Valle e del colle di Longano lungo i cui fianchi si sviluppa il tracciato ipogeo (evidenziato dal tratteggio) dell'acquedotto Carolino (foto: S. Del Prete).

Nel caso, invece, della realizzazione di acquedotti (Ashby, 1935; Bodon et al., 1994) o di camminamenti militari (AA.VV., 2005; Gherlizza & Radacich, 2005), le eventuali difficoltà associate allo scavo in rocce sicuramente meno "tenere" (es. calcari) assume un ruolo secondario rispetto all'obiettivo prefissato (ovvero portare l'acqua al centro abitato o posizionare e realizzare postazioni di controllo in posizione strategica). In questi casi sono per lo più fattori morfologici legati alle forme del paesaggio a condizionare percorsi e sviluppi delle opere da realizzare; nel caso degli acquedotti a pelo libero spesso dell'ordine di vari chilometri (Fig. 1). È da evidenziare, tuttavia, che le difficoltà di scavo associate alle caratteristiche litotecniche delle rocce attraversate, sono almeno in parte compensate dalla realizzazione, in genere, di cavità dalla sezione trasversale ridotta sebbene di notevole sviluppo spaziale.

Analogamente, nel caso delle vie di transito, è la necessità di "superare" l'ostacolo morfologico per abbreviare i tempi di percorrenza tra due luoghi ad essere il fattore portante per la realizzazione di gallerie stradali o cunicoli di transito. Opere queste che, nell'antichità, hanno avuto negli etruschi e nei romani i loro più illustri artefici e



Fig. 2 - Ingresso della Grotta di Seiano tra Napoli e Pozzuoli. La larghezza della sezione non supera i 2 metri (foto: N. Damiano).

che, al pari degli acquedotti, sono caratterizzate da sezioni trasversali non più ampie di un paio di metri. Queste però sono molto più alte e comunque al massimo appena sufficienti al transito di una fila di carri e cavalli (Fig. 2).

Anche per i motivi brevemente su esposti, si osserva come di frequente siano i grandi vuoti sotterranei, in particolare cisterne e grandi cave di tufo generalmente costituite da ambienti piuttosto ampi, quelle che nel tempo meglio si sono prestate a variazioni di uso. Sono divenute ad esempio, al termine della attività estrattiva nel caso delle cave, sede di opifici, rifugi da bombardamenti, depositi sotterranei, cimiteri, etc.

### Fattori geolitologici e litotecnici

Un ruolo di primo piano lo assumono le caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso in termini di capacità di autosostegno delle volte (a sua volta funzione anche della sezione di scavo), di resistenza a compressione e di grado di fratturazione. Questi tre fattori, nel complesso, influenzano il coefficiente di sicurezza sulle tensioni in volta e riguardano direttamente l'agibilità o fruibilità di una cavità sotterranea nel tempo.

In questo contesto le rocce tufacee associate al vulcanismo quaternario della fascia tirrenica toscano-laziale-campana, hanno avuto una primaria importanza nella distribuzione e nello sviluppo spaziale degli insediamenti antropici nell'antichità. Questi territori, infatti, sono occupati da depositi vulcanici costituiti da limitati spandimenti lavici ma, soprattutto, da estese coltri di formazioni piroclastiche sia sciolte (pozzolane) che litoidi (tufi e piperni). Essi, pur essendo depositi geomeccanicamente classificabili come rocce tenere (*weak rock*), sono materiali da costruzione dotati di buone proprietà fisico-meccaniche, facilmente lavorabili e ottimi isolanti termici (AA.VV., 1967). Inoltre, in considerazione delle elevate volumetrie di materiale disponibile a profondità facilmente raggiungibili, essi sono



Fig. 3 - Miniere di bauxite, Cusano Mutri (Monti del Matese - Campania). La stratigrafia in affioramento mette ben in evidenza il livello mineralizzato in corrispondenza del quale si apre l'ingresso della miniera (foto: F. Allocca, archivio S. Del Prete).

risultati i più diffusi e comuni materiali da costruzione sin dall'epoca greco-romana (Zevi, 1994; Albertini et al., 1997; Piciocchi & Piciocchi, 2005), come testimoniano i numerosi monumenti esistenti.

Viceversa, tra le rocce sedimentarie nelle quali sono state realizzate numerose e importanti opere in sotterraneo di vario genere, un ruolo di primo piano lo rivestono le calcareniti Plio-Pleistoceniche: calcareniti in genere fini, organogene, con frammenti di Briozoi, Echinoidi, Crostacei e Molluschi,

variamente cementate e porose. Note impropriamente come tufi calcarei, anch'esse hanno rappresentato, come i tufi vulcanici prima descritti, materiali di eccellenza per l'edilizia poiché facilmente lavorabili, dotati di buone caratteristiche fisico-meccaniche, tuttavia facilmente scavabili e sufficientemente porosi (Cotecchia et al., 1985; Cherubini et al., 1993a, 1993b).

Alcuni litotipi presentano allo stesso tempo facilità di scavo e capacità di autosostegno delle volte,



Fig. 4 - Miniere di cinabro della valle del Siele (Toscana). Passaggio litologico tra rocce litoidi dotate di buone caratteristiche di autosostegno (calcari marnosi in primo piano privi del rivestimento) e argilloscisti fortemente spingenti (sullo sfondo), che invece necessitano della realizzazione di rivestimenti delle pareti per mantenere accessibile la galleria mineraria (foto: S. Del Prete).



Fig. 5 - Quadrine di sostegno della volta nelle miniere di bauxite di Cusano Mutri (Monti del Matese - Campania) realizzate in corrispondenza di una frattura carsificata intercettata dallo scavo (foto: B. Bocchino). È evidente lo stillicidio associato al drenaggio preferenziale delle acque di infiltrazione attraverso la frattura stessa.

e meglio di altri si prestano quindi allo scavo di cavità sotterranee. La presenza di materiali come tufi vulcanici, arenarie o calcareniti, combinata all'assetto morfologico, con pareti sub-verticali che garantivano un adeguato posizionamento strategico degli insediamenti, con finalità di controllo del territorio e di difesa degli insediamenti stessi, hanno costituito i primi elementi per la scelta dei luoghi in cui realizzare opere sotterranee.

Le miniere si discostano in parte da quanto precedentemente affermato. In questo caso, l'elemento geologico fondamentale è l'assetto stratigrafico-strutturale, che determina la presenza in una determinata direzione del filone minerario, della vena o del livello litologico da sfruttare (Fig. 3).

La miniera sotterranea seguirà nel suo andamento tale direzione principale. Questo principio appare esasperato soprattutto nel caso delle miniere preistoriche dove, anche per i limiti tecnologici, le miniere scavate in rocce compatte sono caratterizzate da gallerie molto strette. Le miniere di selce della Defensola (5.500-2.500 a.C.) nel Gargano (Galiberti, 2005; Tarrantini, 2007) sono caratterizzate da escavazioni sub orizzontali di 2 o 3 strati calcarei per un'altezza delle gallerie non superiore ai 60 cm e sufficienti a procedere all'escavazione per l'estrazione dei

noduli di selce. Analogamente, la miniera di rame di Monte Loreto (3.500-3.100 a.C.), è caratterizzata dalla coltivazione di un filone di rame all'interno di una frattura beante ampia tra 0,4 e 1 m (Bixio et al., 1999).

Dal punto di vista della stabilità, laddove l'opera, nel suo sviluppo, incontra materiali diversi, con differenti caratteristiche meccaniche, si pongono problematiche connesse al sostegno delle pareti e delle volte (Bieniawski, 1979), e può accadere che sorga la necessità di rivestimenti di tipo diverso (Fig. 4). Ciò avviene anche nell'ambito di un'unica litologia, a causa della presenza di venute d'acqua, tramite fratture drenanti, o di zone a maggiore frequenza di discontinuità (Fig. 5).

#### **Fattori idrogeologici e idraulici**

Altro fattore fondamentale, almeno per quanto riguarda insediamenti o nuclei abitativi, è poi rappresentato dalla disponibilità di acqua. Questo è un aspetto di primaria importanza anche dal punto di vista igienico sanitario che ha portato alla realizzazione di importanti opere di canalizzazione con sviluppi chilometrici. Tali opere, una volta giunte nei pressi dell'abitato, convogliavano le loro

acque in una rete capillare di cunicoli sotterranei e cisterne approvvigionate anche dalla presenza di locali sorgenti. Poiché nell'antichità gli acquedotti erano esclusivamente a pelo libero, la scelta delle sorgenti da captare, e conseguentemente del percorso dell'opera di canalizzazione, era fortemente condizionata dal dislivello relativo esistente tra l'emergenza del fronte sorgivo e quella del recapito finale (Castellani, 1999). Ciò affinché si potesse garantire il giusto carico idraulico per l'alimentazione delle fontane pubbliche ed eventualmente private.

È noto, a tal proposito, come almeno fino alla fine del XVII secolo, durante il vicereame spagnolo, la realizzazione di insediamenti abitativi nei quartieri alti napoletani potesse usufruire soltanto dell'acqua dei pozzi perché, tra le numerose altre motivazioni, gli antichi acquedotti esistenti non potevano garantire un carico idraulico sufficiente all'alimentazione di queste zone (Fiengo, 1990).

L'assetto idrogeologico sotterraneo svolge un ruolo di primissimo piano sia in fase realizzativa sia per la stabilità e la conservazione nel tempo di un'opera in sotterraneo (Delle Rose et al., 2006).

La circolazione delle acque sotterranee rappresenta un importante fattore di condizionamento sia in fase realizzativa sia, in secondo momento, dal punto di vista della funzionalità e fruibilità dell'opera. Essa è funzione della permeabilità sia primaria che, più spesso, secondaria di ciascuna formazione rocciosa. Infatti, proprio nel caso di rocce litoidi, la presenza di fratture drenanti o tamponanti intercettate lungo la direzione di scavo può creare seri problemi di allagamento o, in casi estremi, di inagibilità dell'opera (Fig. 6).

In altri casi l'approfondimento del piano di coltivazione delle miniere può arrivare ad intercettare la falda di base con l'evidente necessità di provvedere all'eventuale suo abbassamento mediante pompaggio, qualora risulti economicamente conveniente, o di abbandonare i lavori e quindi i potenziali ulteriori sviluppi dell'opera in sotterraneo. Se la potenzialità del giacimento è

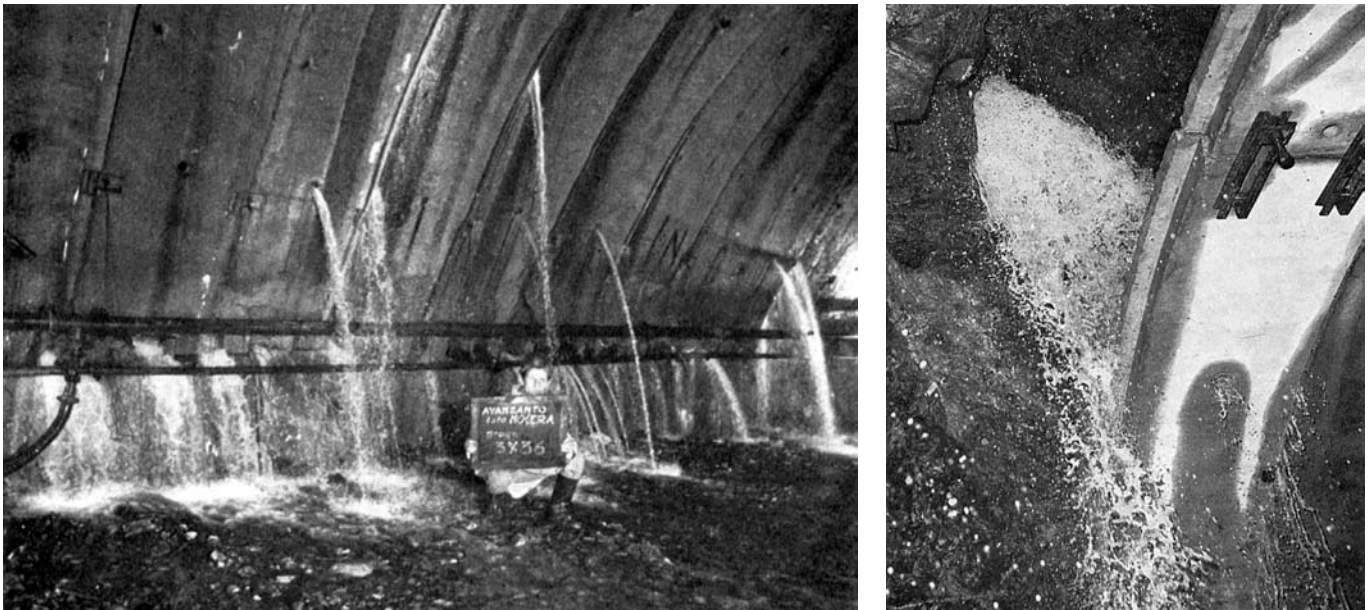


Fig. 6 - Venute d'acqua durante le fasi di avanzamento della galleria ferroviaria S. Lucia nel tratto Nocera - Salerno (da Celico et al., 1977).

tale da far propendere per l'abbassamento della piezometrica, ne deriva che alla fine dei lavori di coltivazione le opere in sotterraneo eventualmente realizzate saranno completamente sommerse (Fig. 7). Tra le opere di tipo idraulico, la cui genesi è strettamente correlata a condizionamenti di tipo sia morfologico che idrogeologico, un ruolo di primo piano è rivestito dalle opere di regimazione del livello di laghi e di bonifica di aree paludose.

La possibilità per l'uomo di recuperare più o meno grandi estensioni di territori talora malsani e paludosi per l'assenza o l'insufficienza di un adeguato drenaggio delle acque di accumulo per via superficiale o sotterranea, fin dall'antichità ha rappresentato un elemento determinante per la progettazione e la realizzazione di emissari (Fig. 8) come quello del lago di Nemi (Castellani & Caloi, 2000; Castellani et al., 2003) di Albano (Castellani & Dragoni, 1989) o della conca del Fucino (Burri, 1987; 2005).

L'insieme dei fattori geologico-strutturali che determinano la distribuzione delle emergenze sorge nonch  la loro portata, dipendente dal bacino di alimentazione sotterraneo, e la loro qualit  sono alla base di qualsiasi ipotesi di captazione e trasporto delle acque per mezzo di un acquedotto.

Se non provviste di un adeguato rivestimento delle pareti e del

fondo, queste opere, a seguito dell'abbandono nell'arco dei millenni possono subire evidenti fenomeni di rimodellamento ed ampliamento soprattutto ad opera dell'azione erosiva delle acque "incanalate". Questi fenomeni sono da ricondurre alla ricerca, da parte dell'acqua, di un naturale "profilo di base", mediante l'innescio di vere e proprie reincisioni del fondo (Bertucci et al., 1995; Cappa, 1999) delle ca-

nalizzazioni le cui sezioni originali restano abbandonate sul soffitto (Fig. 9). Si tratta di situazioni speleogenetiche davvero particolari in cui si pu  osservare la formazione di una cavitt  "naturale" in rocce anche non carsificabili (ad es. tuffi o cineriti) la cui genesi, prevalentemente per erosione meccanica,   indotta dalla preesistenza di una cavitt  artificiale (nello specifico un'opera idraulica) abbandonata.

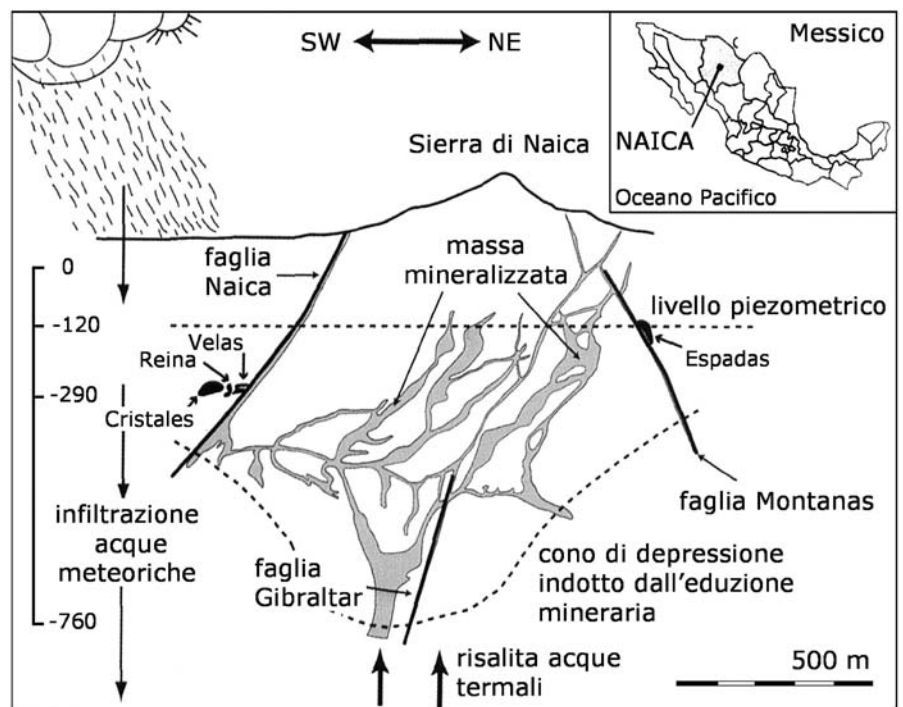


Fig. 7 - Miniere di Naica: l'abbassamento indotto della falda permette lo sfruttamento della massa mineralizzata con la conseguente realizzazione di gallerie minerarie a profondit  sempre maggiori (da Forti, 2006, modificato da Lang, 1995). Nel momento in cui termineranno i lavori estrattivi e la falda ritorner  al suo livello piezometrico normale, le gallerie realizzate verranno gradualmente sommerse.

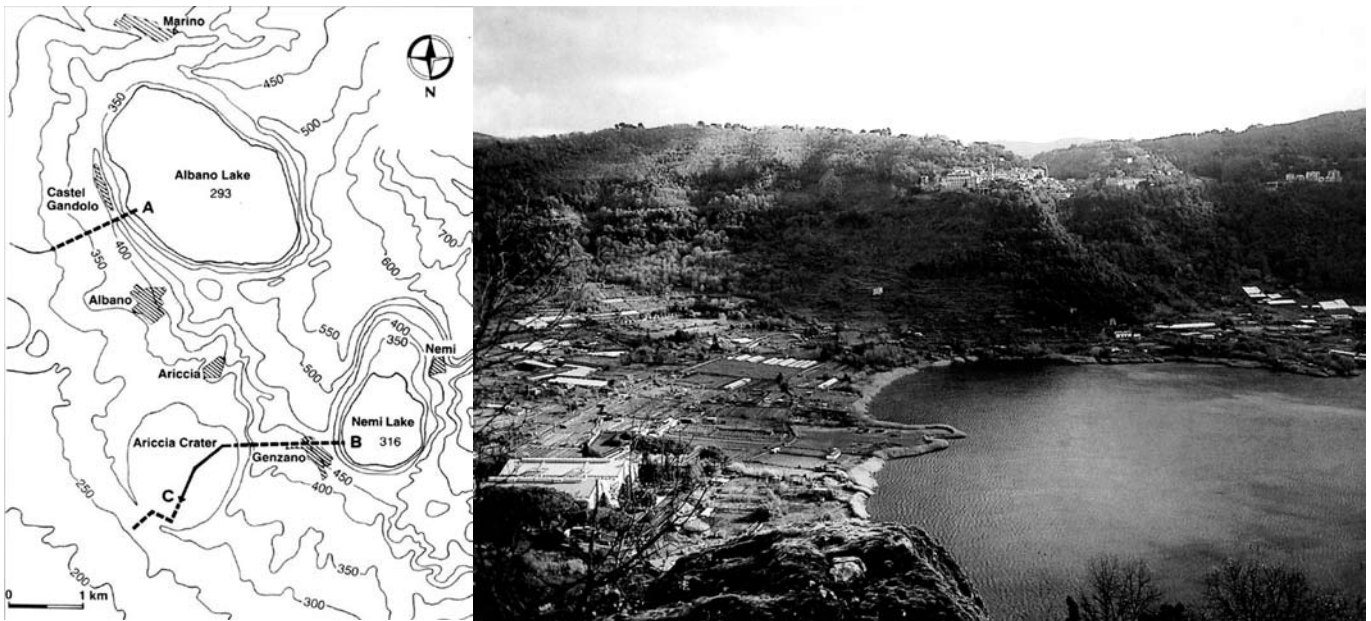


Fig. 8 - Schema topografico delle conche endoreiche di origine vulcanica dei Colli Albani nel Lazio con il tracciato dei relativi emissari (da Castellani e Dragoni, 1989). A destra una panoramica del Lago di Nemi (foto: C. Germani).

### Fattori morfologici

I processi di erosione e di degradazione alla base del modellamento del paesaggio possono esercitare un ruolo primario non solo sulle possibili tipologie di strutture rupestri e sotterranee realizzabili ma anche sulla loro possibilità di preservarsi nel tempo. Piramidi di terra, *butte*,



Fig. 9 - Valle di Meskendir (Cappadocia). L'azione di erosione millenaria in un cunicolo di drenaggio scavato dall'uomo ha comportato una profonda reincisione dell'opera idraulica la cui sezione originaria è in parte rimasta sospesa sulla volta della cavità (Foto G. Bologna). Nel caso specifico il rimodellamento della sezione è dovuto anche a processi di esfoliazione per gelivazione.

*mesa*, *plateau* e versanti in genere, in quanto morfologie prodotte dall'azione della degradazione meteorica (disgregazione fisica e alterazione chimica), della gravità (es. frane) e dall'erosione associata, ad esempio, al deflusso delle acque, sono esse stesse destinate nel tempo ad essere obliterate.

Gli stessi processi, pertanto, che hanno generato morfologie particolarmente adatte alla realizzazione di insediamenti sotterranei s.l. (Succhiarelli, 2002), nel tempo possono comportare anche la perdita, talora in tempi rapidissimi, come nel caso delle frane (Fig. 10), del patrimonio ipogeo in esse realizzato. Possono anche dare origine a delle forme di accumulo che meglio della morfologia originaria si predispongono allo sviluppo di tipologie di architettura rupestre.



L'arretramento per fenomeni di crollo di una falesia tufacea, ad esempio, può inizialmente portare a giorno i vani sotterranei in essa realizzati (Fig. 11), ma l'ulteriore evoluzione del processo può causare la totale perdita del patrimonio ipogeo. Tuttavia, fenomeni franosi da crollo che producano massi tufacei anche di ragguardevoli dimensioni (fino ad alcune migliaia di metri cubi) possono dare spunto alla realizzazione di un altro particolare tipo di insediamento rupestre, piuttosto singolare. Nell'isola d'Ischia i ciclopici massi di Tufo Verde crollati dalle creste tufacee del Monte Epomeo sono stati scavati al loro interno per realizzare vari tipi di strutture rupestri tra cui abitazioni distribuite anche su più piani (D'Arbitrio & Ziviello, 1991; Cappa & Cappa, 1991; Mele & Del Prete, 1998). I massi sono

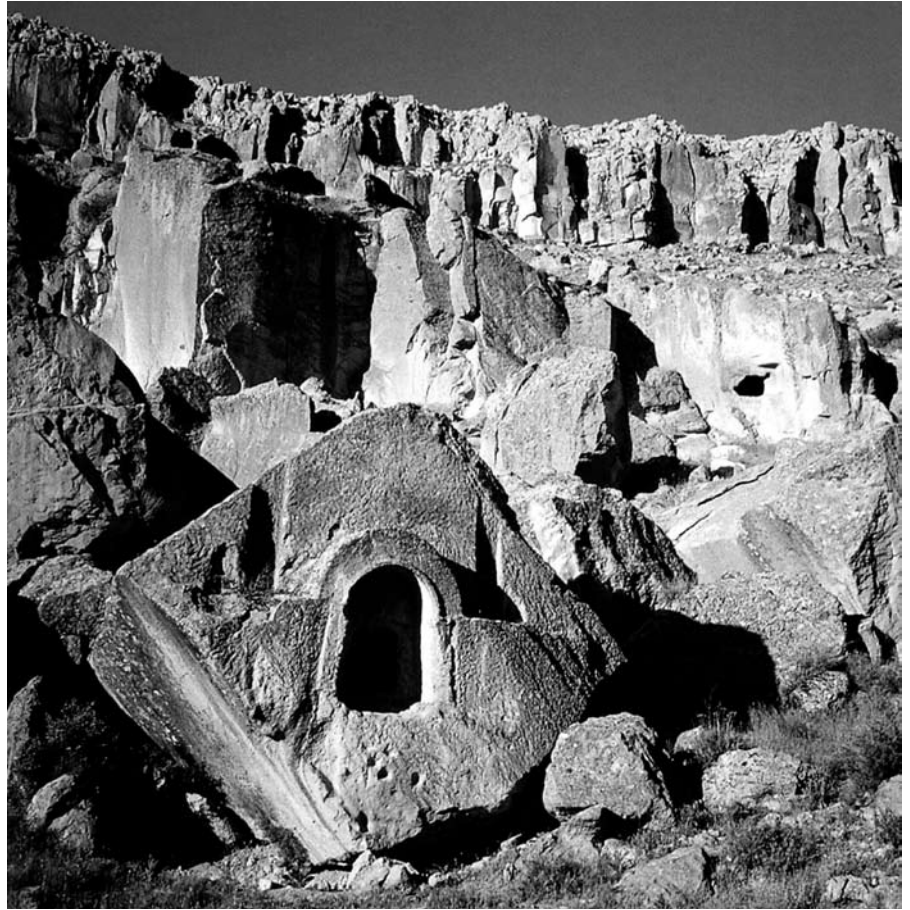


Fig. 10 - Il villaggio rupestre di Zelve è stato abbandonato soltanto nel 1950 a causa del pericolo di crolli (foto: R. Bixio - Centro Studi Sotterranei). Le foto (Bixio et al., 2002) propongono lo stesso scorcio: nel 1985 era ben visibile, nella foto a sinistra, un grande pinnacolo isolato in cui l'erosione già aveva messo in luce i vani scavati nel suo interno. Nel 1990 (foto a destra) lo stesso pinnacolo non esisteva più a causa dello sviluppo di numerosi crolli.



Fig. 11 (sopra) - I fenomeni da crollo che hanno interessato la falesia tufacea hanno portato a giorno i vani sotterranei scavati nel versante (foto: G. Bologna).

Fig. 12 (a destra) - Tomba rupestre ricavata in un masso crollato dai retrostanti versanti (foto: R. Bixio - Centro Studi Sotterranei). Soganli, Cappadocia (Turchia centrale).



stati generalmente utilizzati nella loro morfologia originaria e senza l'uso dell'intonaco, lasciando a giorno la ruvida superficie tufacea, spesso coperta da licheni ed alterata dall'azione erosiva di pioggia e vento (Del Prete & Mele, 2005). Ciò al fine di favorire l'adattamento delle strutture abitative e rurali all'assetto ambientale del territorio e con lo scopo di realizzare un necessario mimetismo difensivo (Fig. 12).

In aree caratterizzate da frequenti escursioni termiche giornaliere, con l'alternanza di più cicli gelo-disgelo, possono verificarsi fenomeni di disgregazione fisica per gelivazione o termoclastismo i cui effetti si risentono in modo più graduale nel tempo. Il grado di porosità e il tipo di fessurazione caratterizzano l'attitudine di una roccia a risentire di tale processo che può condurre alla frantumazione dell'ammasso roccioso in blocchetti o in scaglie e sfoglie (esfoliazione). Nella Valle di Meskendir in Cappadocia l'effetto della esfoliazione sulle pareti dei cunicoli di drenaggio (Fig. 9) ha notevolmente contribuito, in tempi millenari, al "rimodellamento" delle originarie sezioni di scavo (Bertucci et al., 1995; Castellani, 2002).

### Fattori endogeni

La deposizione di materiali piroclastico tufacei ad opera delle eruzioni vulcaniche è una delle principali manifestazioni dell'influenza delle forze endogene, in quanto evento generatore di un substrato roccioso tra i più idonei allo scavo di opere ipogee, sulla realizzazione di strutture sotterranee.

Soprattutto in ambito minerario e con particolare riferimento alle miniere di carbone, un altro fattore endogeno di notevole interesse e pericolosità è associato alla presenza di sacche gassose (più comunemente note come *grisou*) la cui imprevedibile localizzazione tanti lutti ha provocato tra i minatori in varie epoche storiche.

Simili problematiche, tuttavia, sono riscontrabili anche durante le fasi di scavo di gallerie che attraversano particolari formazioni argillose ricche di sostanza organica o nel caso di ipogei realizzati in aree vulcaniche che possono intercettare zone di risalita di gas endogeni. Fra questi ultimi, un esempio di rinomanza mondiale noto fin dall'antichità, è rappresentato dalla Grotta del Cane di

Agnano nei Campi Flegrei (Baldi, 2001; Varriale, 2005; Fig. 13).

Un altro aspetto interessante nell'ambito dei fattori endogeni è l'influenza della presenza di "fumarole fossili" (pipe da degassazione) sulle caratteristiche litotecniche degli ammassi tufacei. Infatti, al momento della deposizione e del successivo raffreddamento della coltre piroclastica, la quale in seguito per processi di zeolitizzazione o piperizzazione darà origine al tufo o al piperno, possono instaurarsi fenomeni di degassazione s.l. in aree più o meno localizzate. Tale fenomeno può comportare l'asportazione della matrice fine del deposito che localmente si presenterà costituito da elementi lavici, scoriacei, pomicei e litici grossolani (da centimetrici a decimetrici), incoerenti ed in matrice scarsa o nulla. Noti anche come "carie del tufo" questi camini fumarolici hanno un andamento subverticale e forma irregolare (Di Girolamo, 1968; Del Prete & Bocchino, 1999). Granulometricamente sono riconducibili ad un deposito ghiaioso sciolto le cui caratteristiche di autosostegno sono ben lontane da quelle tipiche dell'ammasso tufaceo compatto nel

quale si possono rinvenire. Anche i fenomeni bradisismici in quanto associati alle dinamiche interne della Terra, possono in

casi particolari svolgere un ruolo importante per la fruibilità nel tempo di un ipogeo artificiale. Con riferimento a cavità realizzate

lungo la fascia costiera di un'area vulcanica attiva, infatti, non mancano casi in cui queste oggi vengono a trovarsi sotto il livello del mare per effetto dei moti negativi del suolo. Qualora non vi siano più conservate chiare evidenze della loro origine antropica, spesso possono essere confuse con cavità di origine naturale generate dall'azione di abrasione marina.

Nell'area vulcanica flegrea, in Campania, numerose sono le testimonianze di interi villaggi risalenti ad epoca greco-romana oggi situati sotto il livello del mare. Analoga sorte è toccata anche ad alcuni tunnel di epoca greca ritrovati nelle vicinanze di Castel dell'Ovo a Napoli (Cilek et al., 1992) ed alla Grotta Spuntatore o di Varule, di epoca romana, nell'isola d'Ischia (Buchner, 1943; Monti, 1980) che nell'arco di circa 2000 anni sono sprofondate di alcuni metri sotto il livello del mare.

#### **Stabilità delle opere in sotterraneo**

Spesso la maggior parte delle cavità artificiali versa in uno stato di abbandono, senza che siano state prese le opportune precauzioni per garantirne la conservazione nel tempo (Fig. 14). Per questo motivo, le condizioni di stabilità delle cavità appaiono in genere precarie e possono rappresentare un notevole elemento di rischio che talora si estende anche al territorio sovrastante. La chiusura degli originari ingressi e, nel tempo, la perdita di memoria degli stessi, aggrava ul-



Fig. 13 - Volute gassose intercettate dalla Grotta del Cane sul bordo del Lago di Agnano nel distretto vulcanico dei Campi Flegrei - Campania (foto: R. Varriale).



Fig. 14 - Panoramica interna di una cava di piperno (Del Prete, 2004) alla base della Collina dei Camaldoli (Napoli) in cui si notano numerosi massi staccatisi dalla volta e dalle pareti dei pilastri (foto: S. Del Prete). Questi ultimi mostrano ben evidenti gli effetti dello schiacciamento indotto dalle sollecitazioni statiche dovute ai carichi sovrastanti.

teriormente la situazione, producendo un rischio ancora maggiore a causa della perdita di informazioni sulla distribuzione spaziale degli ambienti ipogei.

I dissesti più frequentemente osservati in cavità consistono nel distacco, dalle volte e/o dai pilastri, di blocchi di dimensioni variabili da qualche metro ad alcune decine di metri cubi (Fig. 15). Questi crolli parziali avvengono di frequente in modo improvviso e senza alcun segno premonitore, anche a distanza di centinaia di anni dalla fine delle operazioni di scavo.

I fenomeni di instabilità dei versanti, al cui interno si sviluppano insediamenti e cavità sotterranee, e l'assottigliamento dei pilastri di sostegno all'interno delle cavità (Fig. 16), risultano di particolare gravità allorquando minacciano direttamente siti di importanza storico-archeologica, come ad esempio le gravine (profonde incisioni, a pare-



Fig. 16 - Ani, Turchia orientale. Assottigliamento di pilastri in una miniera di ossidiana (foto: R. Bixio - Centro Studi Sotterranei). La tipica scheggiatura che si genera lungo le pareti dei pilastri è causata dai carichi verticali esercitati dal peso delle rocce sovrastanti.

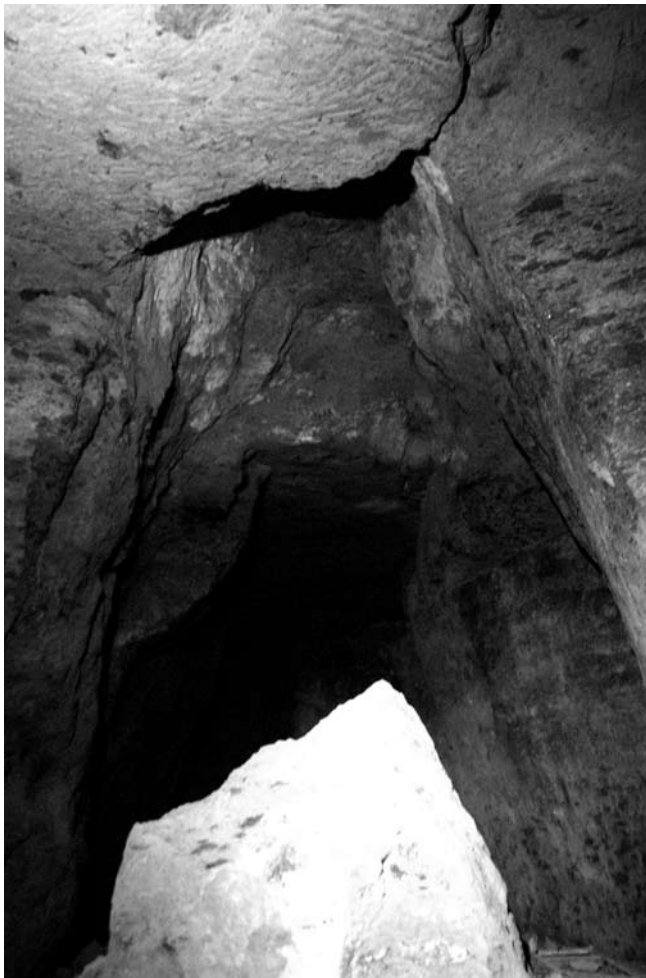


Fig. 15 - Alcuni esempi di crolli in cave ipogee di piperno (a sinistra; foto: S. Del Prete) e in tufo (a destra; foto: B. Bocchino). A seconda delle caratteristiche tecniche della roccia e del suo grado di fratturazione si possono isolare singoli massi di diversi metri cubi o numerosi massi di pezzatura notevolmente inferiore. In ogni caso l'evoluzione dei crolli porta ad una migrazione verso l'alto della volta delle cavità che, nella foto in alto a destra, è giunta alla completa asportazione del tufo e ad intercettare i depositi alluvionali a tetto del tufo stesso.

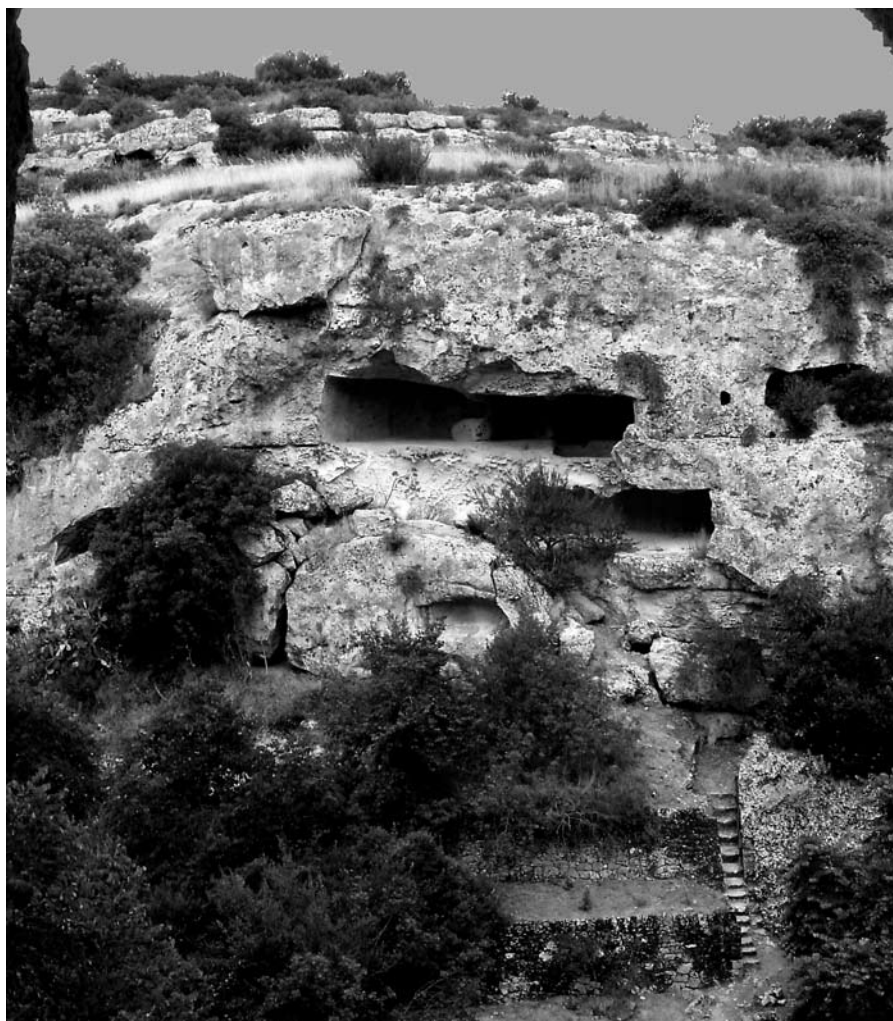


Fig. 17 - Gravina Madonna della Scala (Massafra, Taranto): lo sviluppo di crolli in destra orografica della gravina ha causato danni alle cavità scavate a più altezze nella parete calcarenitica (foto: M. Parise).

ti verticali, in rocce calcarenitiche) del territorio apulo-lucano, interessate dallo sviluppo della cosiddetta "civiltà rupestre" (Fonseca, 1970). Numerosi sono i casi in cui le cavità sono state parzialmente distrutte da crolli e ribaltamenti delle porzioni più esterne delle pareti rocciose (Bertucci et al., 1995; Bixio et al., 2002; Pecorella et al., 2004; Parise, 2007b; Fig. 17), e frequenti sono i casi di cavità la cui stabilità è seriamente compromessa per la presenza di fratture beanti, sia sulla volta che intorno ai pilastri (Fig. 18).

Ad eccezione di particolari situazioni come quelle su citate, generalmente l'effetto di crolli risulta localizzato nell'ambito della cavità sotterranea e nei suoi immediati dintorni, con contenuti danni a cose o persone, vista la scarsa frequentazione di molte cavità. Ciò nonostante, l'alterazione delle condizioni statiche che ne deriva può essere estremamente perico-

losa e può innescare, per fenomeni di migrazione verso l'alto, un collasso generale della struttura con effetti che si ripercuotono in superficie alle eventuali strutture del soprassuolo. Situazioni di questo tipo si riscontrano ad esempio in aree interessate da diffusa attività estrattiva in sotterraneo che hanno determinato in superficie lo sviluppo di fenomeni di lenta subsidenza o l'apertura di voragini (*anthropogenic sinkhole*; Fig. 19). Tra i territori maggiormente interessati, si ricordano le aree estrattive di Gallipoli (Fiorito & Onorato, 2004) e di Cutrofiano (Cherubini & Sgobba, 1997; Bruno & Cherubini, 2005), entrambe nel Salento. In particolare a Cutrofiano, le intense attività estrattive, sia in sotterraneo con l'estrazione della locale calcarenite, che in superficie con l'apertura di cave nelle sovrastanti argille, hanno prodotto negli ultimi decenni numerose situazioni di instabilità, con effetti sulle attività antropiche (Parise et al., 2007). Analoghe situazioni, di frequente all'ordine delle cronache, si verificano nel napoletano e in tutta la piana campana, in pieno ambito urbano (AA.VV., 1967; Evangelista, 1991; Vallario, 1992; Evangelista et al., 1980; 2005; Hall et al., 2004).



Fig. 18 - Frattura da detensionamento molto ampia ed estesa su tutta la porzione della falesia tufacea già interessata da pregressi fenomeni di crollo che hanno messo in luce i vani sotterranei scavati nel versante (foto: R. Bixio - Centro Studi Sotterranei). L'ulteriore evoluzione della frattura porterà nel tempo al collasso anche di questa porzione di versante e degli ipogei in esso presenti.

Le discontinuità che si possono rilevare in un ipogeo possono avere natura diversa: alcune di esse sono preesistenti allo scavo e strettamente legate alla genesi dell'ammasso roccioso (ad esempio, fratture singenetiche in un ammasso tufaceo per effetto del rapido raffreddamento durante la deposizione dei depositi sciolti); altre invece si sono formate nel tempo a seguito della redistribuzione dello stato tensionale dovuta alle operazioni di scavo, ovvero alle eventuali vicissitudini tettoniche in cui è stato coinvolto l'ammasso o a rilasci tensionali in corrispondenza di versanti sub verticali (Fig. 19).

Le discontinuità esistenti nell'ammasso roccioso svolgono il ruolo di concentratori di sforzi di trazione e sono in grado di attivare nel tempo una progressiva riduzione della resistenza a lungo termine del materiale (Hall et al., 2004).

Per una corretta valutazione del rischio associato ai fenomeni di dissesto nel sottosuolo è necessaria la conoscenza delle effettive condizioni di stabilità delle cavità (ad esempio, attraverso uno studio del quadro fessurativo delle volte)

e delle possibili cause che sono all'origine dei meccanismi di crollo (Hall et al., 2004). Le prime sono indispensabili per stabilire una scala di priorità degli interventi e per la progettazione delle opere di consolidamento, mentre le seconde sono estremamente utili per scegliere le più idonee tecniche di monitoraggio al fine di controllare l'evoluzione nel tempo dei fenomeni di dissesto.

### Conclusioni

La disamina appena esposta sull'influenza che rivestono i fattori geologici e geomorfologici sulla realizzazione delle opere in sottoterraneo, è esemplificativa della complessità e della vastità dell'argomento. In generale, è possibile constatare come spesso i ruoli esercitati dai vari fattori esaminati singolarmente, a seconda dei contesti si sovrappongano ed agiscano congiuntamente. Il risultato di tale combinazione, inoltre, può dipendere sia da fattori ambientali (geografici e climatici) che dalla natura delle rocce nonché dal fat-

tore tempo.

Così, ad esempio, alla reincisione del fondo ed al rimodellamento della sezione di un cunicolo di drenaggio contribuiscono tanto l'azione di erosione meccanica delle acque di scorrimento quanto, in condizioni climatiche idonee, i processi termoclastici. Analogamente, alla individuazione di una litologia o di una vena mineralizzata di interesse economico o più in generale idonea alla realizzazione di un'opera in sottoterraneo s.l., si sovrappongono anche aspetti di carattere geomeccanico e/o idrogeologico che possono condizionare le tecniche di scavo, i tempi e i costi di realizzazione, il grado di preservazione dell'opera nel tempo e quindi la sua fruibilità futura.

L'acqua sotterranea, a sua volta, ha una marcata influenza sulla realizzazione e sull'utilizzo di una struttura sotterranea. Un insediamento abitativo o un magazzino sotterraneo possono assolvere alla loro funzione solo se realizzati in rocce dalle buone caratteristiche drenanti che garantiscano livelli di umidità accettabili. Nel caso delle opere minerarie o di importanti

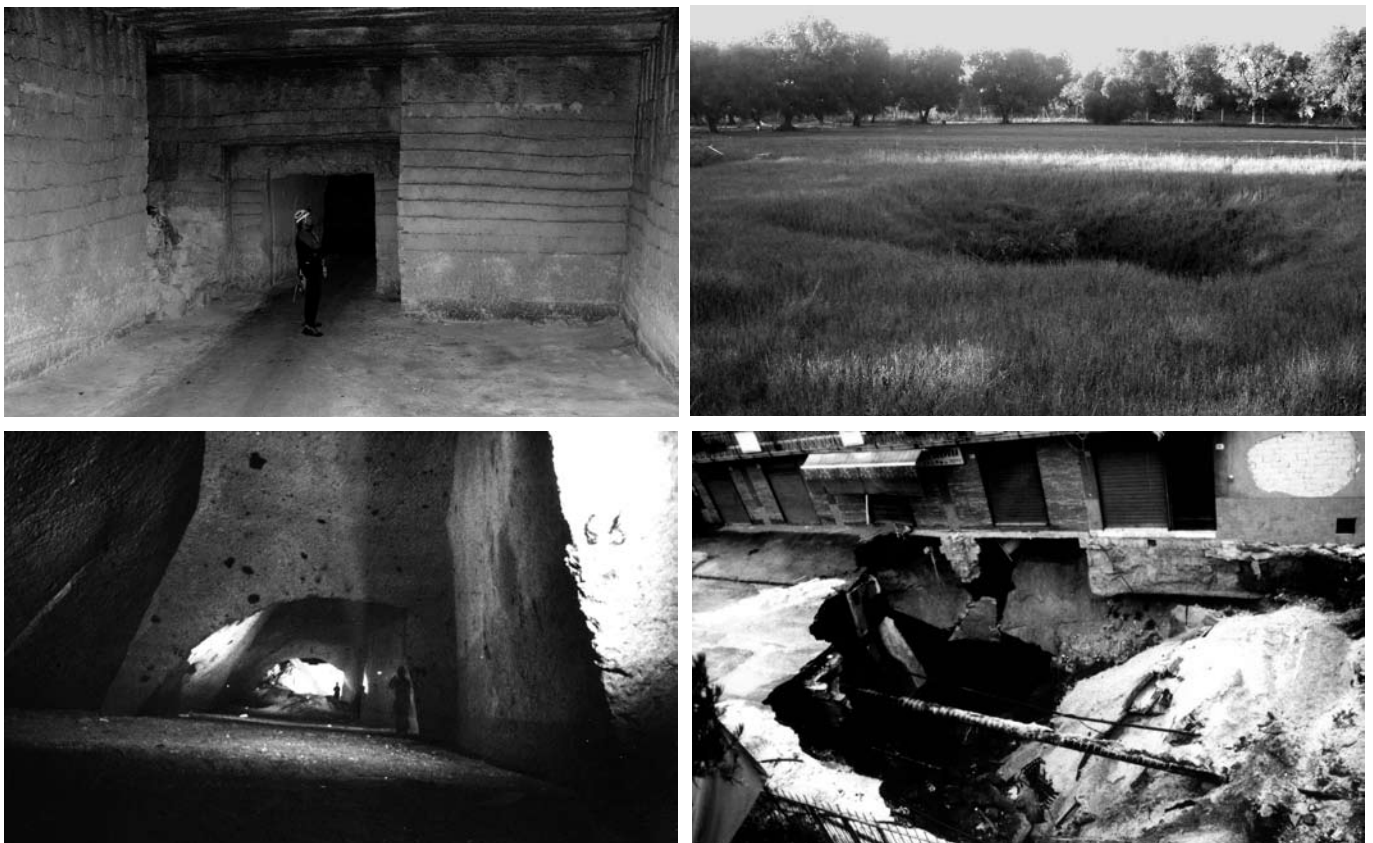


Fig. 19 - Esempi di cavità sotterranee che hanno dato luogo a fenomeni di sprofondamento (Cutrofiano, in alto, e Lusciano, in basso) talora provocando anche gravissimi danni al tessuto rurale e urbano sovrastante (foto di Cutrofiano: M. Parise; foto di Lusciano: B. Bocchino, S. Del Prete).

vie di transito, tuttavia, l'interesse socioeconomico può essere tale da imporre anche drenaggi di quantità d'acqua importanti. L'eventuale sovrapposizione, poi, di fattori endogeni (risalite di fluidi e alte temperature) e strutturali (ad esempio strutture tettoniche drenanti

o tamponanti) può ulteriormente complicare la realizzazione dell'opera sotterranea con conseguenti ripercussioni sui tempi di realizzazione e sui costi.

In generale, quindi, appare evidente come, nello studio delle strutture sotterranee, anche l'ap-

profondimento degli aspetti geologici s.l. può fornire importanti indicazioni in merito agli aspetti socioeconomici e alle motivazioni che hanno indotto popoli e culture alla realizzazione e all'utilizzo degli spazi sotterranei ed ai benefici che ne hanno tratto.

### Ringraziamenti

Gli autori desiderano esprimere un sincero ringraziamento a Roberto Bixio per la lettura critica del manoscritto, per i numerosi spunti di riflessione e il costruttivo confronto avuto durante le fasi di stesura nonché per la notevole carrellata di immagini che è stato in grado di sottoporci e mettere a disposizione. Un sincero ringraziamento rivolgono anche al Prof. Maifredi dell'Università di Genova ed a tutti gli Autori delle foto per aver messo a disposizione il loro prezioso repertorio di immagini.

### Bibliografia

- AA.VV., 1967, *Il sottosuolo di Napoli*. Relazione della Commissione di Studio, a cura del Comune di Napoli, 466 pp.
- AA.VV., 2005, *Atti del Convegno Cavità Naturali e Artificiali della Grande Guerra*, Circolo Ufficiali Presidio Militare di Trieste Villa Italia, 11-12 giugno 2005, Centralgrafica snc, Trieste.
- ALBERTINI V., BALDI A., ESPOSITO C., 1997, *Napoli la città riscoperta - viaggio nel sottosuolo di Napoli*. Associazione Napoli Sotterranea, 196 pp.
- ASHBY T., 1935, *The Aqueducts of Ancient Rome*. Clarendon Press, Oxford.
- BALDI A., 2001, *La Grotta del Cane ad Agnano*. Studi etno-antropologici e sociologici, vol. 29, 36-44.
- BIENIAWSKI Z.T., 1979, *The geomechanics classification in rock engineering applications*. Proc. 4th Int. Cong. on Rock Mech., Montreux.
- BERTUCCI G., BIXIO R., TRAVERSO M. (a cura di), 1995, *Le Città sotterranee della Cappadocia*. Opera Ipogea, 1, Erga edizioni, Genova, 140 pp.
- BIXIO R., SAJ S., TRAVERSO M., 1999, *Indagine in una miniera preistorica della Liguria orientale*. Opera Ipogea, 1, Erga edizioni, Genova, 47-52.
- BIXIO R., CASTELLANI V., SUCCHIARELLI C. (a cura di), 2002, *Cappadocia - le Città sotterranee*. Ist. Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma, 319 pp.
- BODON G., RIERA I., ZANOVELLO P., 1994, *Utilitas necessaria (sistemi idraulici nell'Italia romana)*. Progetto Quarta dimensione, Grafiche Folletti, Milano.
- BRUNO G., CHERUBINI C., 2005, *Subsidence induced by the instability of weak rock underground quarries in Apulia*. Giornale di Geologia Applicata, 1, 33-39.
- BUCHNER P., 1943, *Formazione e sviluppo dell'isola d'Ischia*. Rivista di Scienze Naturali "Natura", 34, 39-62, Milano.
- BURRI E., 1987, *Lake Fucino (Abruzzi - Central Italy): ancient and recent drainage of a karstic lake*. Atti Int. Symp. "Human Influence in Karst", Ljubljana, 19-30.
- BURRI E., 2005, *Il Fucino e il suo collettore sotterraneo*. Opera Ipogea, nuova serie, n. 1/2, 56-74.
- CAPPA G., 1999, *Speleologia in Cavità Artificiali*. Quaderni didattici della Soc. Speleologica Italiana, 20pp.
- CAPPA E., CAPPA G., 1991, *Cavità artificiali nei massi di tufo verde sul Monte Epomeo (isola d'Ischia - Campania - Italia)*. Notiz. Sez. CAI Napoli, n. 1, 45-54.
- CASTELLANI V., 1999, *La civiltà dell'acqua*. Editorial Service System, Roma, 256 pp.
- CASTELLANI V., 2002, *I condotti idrici della valle di Meskendir*. In BIXIO R., CASTELLANI V., SUCCHIARELLI C. (a cura di), *Cappadocia - le Città sotterranee*, Ist. Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma, 279-290.
- CASTELLANI V., CALOI V., 2000, *L'emissario di Nemi (Roma): aggiornamenti topografici*. Opera Ipogea, n. 1, 11-18.
- CASTELLANI V., DRAGONI W., 1989, *Opere idrauliche ipogee nel mondo romano: origine, sviluppo ed impatto ambientale*. L'Universo, Istituto Geografico Militare, 69, 105-137.
- CASTELLANI V., CALOI V., DOBOSZ T., GALEAZZI C., GALEAZZI S., GERMANI C., 2003, *L'emissario del Lago di Nemi. Indagine topografico-strutturale*. Opera Ipogea, n. 2/3, 2-76.
- CELICO P., CIVITA M., MACCHI A., NICOTERA P., 1977, *Il sistema idrogeologico dei Monti calcareo-dolomitici di Salerno: idrodinamica, riserve globali e loro degradazione a seguito dello scavo della galleria ferroviaria S. Lucia*. Memorie e Note dell'Istituto di Geologia Applicata dell'Università di Napoli, vol XIII.
- CHERUBINI C., CUCCHIARARO L., GIASI C., RAMUNNI F.P., 1993a, *Elaborazioni statistiche fisiche e meccaniche di vari tipi di calcareniti pugliesi*. Atti Conv. Int. "Le pietre da costruzione: il tufo calcareo e la Pietra Leccese", Bari 26-28 maggio 1993.
- CHERUBINI C., GERMINARIO S., PAGLIARULO R., RAMUNNI F.P., 1993b, *Caratterizzazione geomeccanica delle calcareniti di Canosa in relazione alla stabilità degli ipogei*. Atti Conv. Int. "Le pietre da costruzione: il tufo calcareo e la Pietra Leccese", Bari 26-28 maggio 1993.
- CHERUBINI C., SGOBBA D., 1997, *Le cave sotterranee di tufo pugliesi: descrizione degli ipogei e valutazione di stabilità*. Atti IV Convegno Nazionale sulle Cavità Artificiali, Osoppo, 30 maggio - 1 giugno 1997, 51-68.

- CILEK V., SUTTA V., WAGNER J., 1991, *Under-sea tunnels in the vicinity of Castel dell'Ovo in Naples*. Atti III Int. Symp. on Underground Quarries, Napoli, Castel dell'Ovo, 10-14 giugno 1991, 173-175.
- COTECCHIA V., CALÒ G., SPILOTRO G., 1985, *Caratterizzazione geolitologica e tecnica delle calcareniti pugliesi*. Atti III Conv. Naz. su "Attività estrattiva dei minerali di 2a categoria", Bari 17-19 gennaio 1985.
- D'ARBITRIO N., ZIVIELLO L., 1991, *Ischia. L'architettura rupestre delle case di pietra*. Edizioni Scientifiche Italiane, 142 pp.
- DELLE ROSE M., GIURI F., GUASTELLA P., PARISE M. & SAMMARCO M., 2006, *Aspetti archeologici e condizioni geologico-morfologiche degli antichi acquedotti pugliesi. L'esempio dell'Acquedotto del Triglio nell'area tarantina*. Opera Ipogea, nuova serie, n. 1-2, 33-50.
- DEL PRETE S., 2004, *Rilevamento topografico della cavità sotterranea in piperno di via Vicinale dei Monti in Pianura (NA). Relazione Tecnica*. Studio realizzato per conto del dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Napoli "Federico II" nell'ambito del progetto di ricerca "Recupero, salvaguardia e rivalorizzazione dei materiali lapidei in Campania: il Piperno dei Camaldoli (Napoli). Ipotesi per la riscoperta di un "geosito" ipogeo", 19 pp., allegato fotografico, 4 tavv. f.t.
- DEL PRETE S., 2005, *Le cave ipogee di piperno*. In: RUSSO N., DEL PRETE S., GIULIVO I. & SANTO A. (a cura di), *Grotte e speleologia della Campania*. Elio Sellino editore, 184-185.
- DEL PRETE S., BOCCHINO B., 1999, *Sul rinvenimento di una cava di tufo nel comune di Lusciano (Caserta)*. Opera Ipogea, n. 3, 51-58.
- DEL PRETE S., MELE R., 2005, *Le case di pietra dell'isola d'Ischia*. In: RUSSO N., DEL PRETE S., GIULIVO I. & SANTO A. (a cura di), *Grotte e speleologia della Campania*. Elio Sellino editore, 172-173.
- DEL PRETE S., MELE R., ALLOCCA F., BOCCHINO B., 2002, *Le miniere di bauxite di Cusano Mutri (Monti del Matese - Campania)*. Opera Ipogea, n. 1, 3-44.
- DI GIROLAMO P., 1968, *Petrografia dei Tufi campani: il processo di pipernizzazione. Petrografia, rilevamento e natura ignimbratica del tufo campano del casertano*. Rendiconti Accademia Scienze Fisiche Matematiche, vol. 35 ser. 4°, Napoli, 5-70.
- EVANGELISTA A., 1991, *Cavità e dissesti nel sottosuolo dell'area napoletana*. Atti Conv. "Rischi naturali ed impatto antropico nell'area metropolitana napoletana", Napoli Facoltà di Ingegneria, 7-8 giugno 1991, Acta Neapolitana, Guida Editori, 195-218.
- EVANGELISTA A., LAPEGNA U., PELLEGRINO A., 1980, *Problemi geotecnici nella città di Napoli per la presenza di cavità nella formazione del tufo*. Atti XIV Convegno Nazionale di Geotecnica, Firenze, 163-175.
- EVANGELISTA E., FLORA A., DE SANCTIS F., LIRER S., 2005, *Il rischio connesso alla presenza di cavità in aree urbane: il caso di Napoli*. In: RUSSO N., DEL PRETE S., GIULIVO I. & SANTO A. (a cura di), *Grotte e speleologia della Campania*. Elio Sellino editore, 186-187.
- FIENGO G., 1990, *L'acquedotto di Carmignano e lo sviluppo di Napoli in età barocca*. Olschki, Firenze, 239 pp.
- FIORITO F., ONORATO R., 2004, *Le cave ipogee di colle S. Lazzaro - Gallipoli*. Primi studi. Atti "Spelaion 2004", 10-12 dicembre 2004, Lecce, 125-136.
- FONSECA C.D., 1970, *Civiltà rupestre in terra ionica*. Ed. Bestetti, Roma.
- FORTI P., 2006, *Una foresta di cristalli di gesso nel profondo delle miniere di Naica*. Geitalia, n. 18, 29-34.
- GALIBERTI A. (a cura di), 2005, *Defensola. Una miniera di selce di 7000 anni fa*. Protagon, Siena.
- GHERLIZZA F., RADACICH M., 2005, *Grotte della grande Guerra*. Club Alpinistico Triestino - Gruppo Grotte, 352 pp., Trieste.
- HALL S., DE SANCTIS F., VIGGIANI G., EVANGELISTA A., 2004, *Impiego della tecnica delle emissioni acustiche nella previsione dei dissesti in cavità: studi preliminari in laboratorio*. Atti I Conv. "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkhole e ruolo delle Amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", 20-21 maggio 2004, APAT, Roma, 467-478.
- LANG J.R., 1995, *A geological evaluation of the Naica deposit, Chihuahua, Mexico*. Rapporto Interno, Compañia Fresnillo, 109 pp.
- MELE R., DEL PRETE S., 1998, *Fenomeni di instabilità dei versanti in Tufo Verde del Monte Epomeo (isola d'Ischia - Campania)*. Boll. Soc. Geol. It., 117 (1), 93-112.
- MONTI P., 1980, *Ischia - Archeologia e Storia*. Lito-Tipografia F.lli Porzio, Napoli.
- PARISE M., 2007a, *Il Progetto "La Carta degli Antichi Acquedotti Italiani"*. Opera Ipogea, nuova serie, n. 1.
- PARISE M., 2007b, *Pericolosità geomorfologica in ambiente carsico: le gravine dell'arco jonico tarantino*. Atti e Memorie Commissione Grotte "Eugenio Boegan", vol. 41, 81-93.
- PARISE M., DONNO G., DE PASCALIS A., DE PASCALIS F., INGUSCIO S., 2007, *Subsidence and sinkholes related to quarrying in karst*. Geophysical Research Abstracts, vol. 9, 01460.
- PECORELLA G., FEDERICO A., PARISE M., BUZZACCHINO A., LOLLINO P., 2004, *Condizioni di stabilità di complessi rupestri nella Gravina Madonna della Scala a Massafra (Taranto, Puglia)*. Grotte e dintorni, anno 4, n. 8, 3-24.
- PICIOCCHI A., PICIOCCHI C., 2005, *Le cavità artificiali della Piana Campana*. In RUSSO N., DEL PRETE S., GIULIVO I., SANTO A. editors: *Grotte e speleologia della Campania*, Sellino ed. Avellino, 175-182.
- SUCCHIARELLI C., 2002, *Geomorfologia, forme di erosione e insediamenti sotterranei*. In BIXIO R., CASTELLANI V., SUCCHIARELLI C. (a cura di), *Cappadocia - le Città sotterranee*, Ist. Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma, 59-76.
- TARANTINI M., 2007, *Le miniere preistoriche di selce del Gargano (5.500-2.500 a.C.)*. Atti I Convegno Regionale di Speleologia in Cavità Artificiali, Castellana Grotte, 24-25 marzo 2007, Grotte e dintorni, 12, 99-110.
- VALLARIO A., 1992, *Sprofondamenti e crolli nelle cavità del sottosuolo napoletano*. In: *Frane e Territorio*, 427-458, Liguori Editore, Napoli.
- VARRIALE R., 2005, *La Grotta del Cane*. In RUSSO N., DEL PRETE S., GIULIVO I., SANTO A. (a cura di), *Grotte e speleologia della Campania*. Elio Sellino editore, p. 183.
- ZEVİ F. (a cura di), 1994, *Neapolis*. Banco di Napoli - Guida Editore, 300 pp.

