

# Geologia dell'Ambiente

Periodico trimestrale della SIGEA  
Società Italiana di Geologia Ambientale



Supplemento al n. 2/2013

ISSN 1591-5352

Poste Italiane S.p.a. - Spedizione in Abbonamento Postale - D.L. 353/2003 (conv. in L. 27/02/2004 n° 46) art. 1 comma 1 - DCB Roma



## Atti dei convegni

**Quando la terra tremò:  
il terremoto del 23 novembre 1980**

*Calitri (AV), 22 novembre 2010*

**Studi ed interventi per il risanamento  
delle cavità antropiche e naturali.**

**Aspetti geologici, geotecnici e sismici**  
*Altamura (BA), 9 dicembre 2010*

## **Pozzi per l’Africa - Michele Maggiore-**

Preservare le caratteristiche dell’acqua e assicurarne la disponibilità a favore di tutte le comunità umane è il principale obiettivo etico dell’idrogeologia, scienza che esplora i processi che determinano la composizione e la distribuzione dell’acqua negli ambienti naturali del nostro pianeta.

Michele Maggiore (1945 - 2010), docente di Idrogeologia presso l’Università degli Studi di Bari, ha trasmesso a quanti lo hanno conosciuto la consapevolezza che “l’acqua è un bene prezioso”, espressione che vibrava della sua generosità di insegnante e della sua instancabile passione di studioso.

Realizzare pozzi in Africa è un’iniziativa per donare il bene prezioso dell’acqua alle popolazioni afflitte da gravi carenze idriche. La raccolta fondi finanzierà la realizzazione di uno o più pozzi per l’estrazione di acqua dal sottosuolo, a vantaggio di piccole comunità dove sono attivi i progetti idrici sviluppati da Amref.

Per contribuire al Progetto è possibile effettuare un versamento sul conto corrente bancario IT19 H01030 03202 000001007932 (IBAN) o sul conto postale 35023001, intestato ad AMREF Italia Onlus, Via Boezio 17, 00192 – Roma, riportando la causale **Pozzi per l’Africa – “Michele Maggiore”**.



[www.amref.it](http://www.amref.it)  
[www.puglia.sigeaweb.it](http://www.puglia.sigeaweb.it)



Società Italiana  
di Geologia  
Ambientale



## Geologia dell'Ambiente

Periodico trimestrale della SIGEA  
Società Italiana di Geologia Ambientale

Associazione di protezione ambientale a carattere nazionale riconosciuta dal Ministero dell'ambiente, della tutela del territorio e del mare, con D.M. 24 maggio 2007, G.U. n. 127 del 4.6.2007

Supplemento al n. 2/2013  
Anno XXI - aprile-giugno 2013

Iscritto al Registro Nazionale della Stampa n. 06352  
Autorizzazione del Tribunale di Roma n. 229  
del 31 maggio 1994

### Comitato scientifico

Mario Bentivenga, Aldino Bondesan,  
Giancarlo Bortolami, Felice Di Gregorio,  
Giuseppe Gisotti, Giancarlo Guado,  
Giacchino Lena, Giacomo Prosser,  
Giuseppe Spilotro

### Consiglio Direttivo nazionale 2013-2016

Fatima Alagna, Federico Boccalaro (*Segretario*),  
Antonello Fiore (*Tesoriere*), Daria Duranti,  
Fabio Garbin, Sandro Gennaro, Francesco Geremia,  
Giuseppe Gisotti (*Presidente*), Fabrizio Ioiò,  
Giacchino Lena, Vincent Ottaviani, Debora Perazzoli,  
Angelo Sanzò, Andrea Vitturi (*Vicepresidente*),  
Francesco Zarlenga

### Comitato di redazione

Federico Boccalaro, Giorgio Cardinali,  
Giovanni Conte, Giacchino Lena,  
Paola Mauri, Maurizio Scardella

### Direttore responsabile

Giuseppe Gisotti

### Procedura per l'accettazione degli articoli

I lavori sottomessi alla rivista dell'Associazione, dopo che sia stata verificata la loro pertinenza con i temi di interesse della Rivista, saranno sottoposti ad un giudizio di uno o più Referees.

### Redazione

SIGEA: tel./fax 06 5943344  
Casella Postale 2449 U.P. Roma 158  
info@sigeaweb.it  
www.sigeaweb.it

### Progetto grafico e impaginazione

Fralerighe  
tel. 0774 554497 - fax 0774 2431193  
info@fralerighe.it  
www.fralerighe.it

### Pubblicità SIGEA

### Stampa

Tipolitografia Acropoli, Alatri - FR

Abbonamento annuale: Euro 30,00

# Sommario

Presentazione  
ANTONELLO FIORE, ALFREDO PITULLO, SALVATORE VALLETTA 7

## ATTI DEL CONVEGNO

### QUANDO LA TERRÀ TREMÒ: IL TERREMOTO DEL 23 NOVEMBRE 1980

La sismoinduzione di frane nei terremoti irpini  
del 1930 e 1980  
VINCENZO DEL GAUDIO 10

La prevenzione sismica in Italia dal terremoto  
campano-lucano del 1980 a oggi  
SERGIO CASTENETTO, GIUSEPPE NASO 18

Il controllo delle grandi dighe in Italia.  
Procedure previste a seguito di eventi sismici  
VITO SAVANELLA 21

## ATTI DEL CONVEGNO

### STUDI ED INTERVENTI PER IL RISANAMENTO DELLE CAVITÀ ANTROPICHE E NATURALI. ASPETTI GEOLOGICI, GEOTECNICI E SISMICI

Il database nazionale dei fenomeni di sinkhole  
STEFANIA NISIO 28

Le cave sotterranee di Altamura. Fasi operative per la  
mappatura e per il supporto alle attività di bonifica  
PEPE PIETRO, PENTIMONE NUNZIA, GARZIANO GIUDITTA,  
PARISE MARIO, MARTIMUCCI VINCENZO, GIACOMINA LORUSSO 33

Il sinkhole di Camaiore  
VINCENZO BUCHIGNANI, STEFANO RIZZO 41

L'esperienza della Regione Lombardia nel risanamento  
di cavità antropiche  
ADRIANA MAY 48

Risposta sismica locale in aree con presenza di cavità  
TITO SANÒ 55

Il recupero del percorso militare sotterraneo "tunnel  
borbonico" realizzato da Ferdinando II di Borbone (Napoli)  
GIANLUCA MININ, ENZO DE LUZIO, PAOLO MARIA GUARINO 62

A cura di: Antonello Fiore, Alfredo Pitullo & Salvatore Valletta

Analisi e confronto delle procedure tecnico-amministrative per la gestione delle aree a pericolosità geomorfologica per presenza di cavità sotterranee in Puglia, nell'ambito dei territori di competenza delle Autorità di Bacino interregionali di Puglia e Basilicata

ANTONELLO FIORE, DANILO STEFANELLI 68

Strategie di recupero e valorizzazione del sottosuolo urbano ed extraurbano: i casi di Canosa, Gravina e Palagianello in Puglia

ANTONELLA CALDERAZZI, ALESSANDRO CARIELLO, DAVIDE DEL RE, PASQUALINA MINERVA, ROSSELLA PAGLIARULO, ROCCO PASTORE, ROSAMARIA TRIZZINO 74

### **RIASSUNTI**

Pericolosità da sprofondamenti antropici e naturali nell'ambiente carsico della Regione Puglia

ANTONIO FIORE, MARIO PARISE 80

Rilievi speleologici speditivi e di precisione delle gallerie di cave in sotterraneo. Il caso di Altamura (Ba)

PIETRO PEPE, VINCENZO MARTIMUCCI 81

Classificazione per la determinazione degli interventi di bonifica e consolidamento delle cavità antropiche in funzione del fattore di rischio. Il caso di Canosa di Puglia

SABINO GERMINARIO, EDMONDO MARTORELLA, FRANCESCO PASTORE 82

L'impatto della presenza di cavità nella progettazione e realizzazione di infrastrutture ed opere di ingegneria. Il caso della Regione Friuli Venezia Giulia

LUCA ZINI, FRANCO CUCCHI 83

Utilizzo di analisi numeriche per la valutazione della stabilità di cavità in sotterraneo: un percorso metodologico

RICCARDO CASTELLANZA, CLAUDIO DI PRISCO, DAVID BETTI, MATTEO CIANTIA 84

Studi ed interventi per la tutela di un patrimonio sotterraneo: l'esempio delle cavità di Napoli

ALESSANDRO FLORA 85

Parametrizzazione e interventi di risanamento di cavità in area urbana. Il caso di Roma

ANGELO CORAZZA, MAURIZIO LANZINI 86

## SESSIONE POSTER

- Le cavità antropiche nei centri urbani del Vulture-Melfese: caratterizzazione geostrutturale e metodologie d'intervento. Caso di studio: lavori di consolidamento costone tufaceo lungo via Rapolla in abitato di Barile (Pz)  
RAFFAELE CARBONE, CLEMENTE MARCO TUCCI 88
- Percorsi ipogei da valorizzare a Gravina in Puglia. Gravina sotterranea  
MICHELE PARISI, NUNZIA PENTIMONE 89
- L'esplorazione geofisica per la ricerca di cavità: alcuni case-histories pugliesi  
RUGGIERO QUARTO, GIUSEPPE CAMERO, MARIO FRATE, LUIGI MANDRISI, GIANLUIGI MAZZILLI, ALBERTO QUARTO 90
- Le indagini geofisiche possono rilevare vuoti sotterranei a profondità maggiori di 10 metri? Alcuni aspetti teorici ed applicativi di tale difficile problema  
RUGGIERO QUARTO, GIUSEPPE CAMERO 90
- Indagini tomografiche elettriche 3D per fabbricato sito nel comune di Gravina in Puglia – V. Fornaci  
G. MICHELE VIZZIELLO 91
- Studi sul fenomeno sinkhole nella regione Lazio  
GIACOMO CATALANO, LORENZO LIPERI, FABIO MELONI, MARIA CARMELA NOTARMUZI, ORNELLA SATTALINI, ADELAIDE SERICOLA, MASSIMO TOCCACIELI, PIETRO ZIZZARI, VALTER TONELLI 92
- Dissesto idrogeologico in zona Fornaci ad Altamura  
VITO GIORDANO 94
- Sprofondamenti improvvisi e cavità antropiche nel territorio del Comune di Napoli: condizionamento esercitato dall'assetto geologico del sottosuolo  
PAOLO MARIA GUARINO, STEFANIA NISIO 95
- La voragine di "San Procopio" a Barletta: analisi preliminari, rilievi speleologici e geofisici per la mappatura della pericolosità geomorfologica  
ALFREDO DE GIOVANNI, VINCENZO MARTIMUCCI, MICHELE MARZULLI, MARIO PARISE, NUNZIA PENTIMONE, DANIELE SPORTELLI 96



**A** distanza di qualche anno si sono voluti pubblicare i contributi presentati in occasione di due momenti molto importanti organizzati dalla SIGEA: Calitri 23/11/2010 e Altamura 9/12/2010. Si è deciso di organizzare i convegni non nei capoluoghi di regione o in sedi centrali ma nei luoghi dove gli argomenti trattati hanno avuto il maggior impatto sia per ciò che riguarda gli aspetti tecnico-scientifici sia per la forte emotività dei temi sulla popolazione coinvolta. Il primo convegno tenutosi a Calitri (AV) ed organizzato dalle Sezioni regionali della Puglia, Basilicata e Campania della SIGEA è associato al trentennale del terremoto che il 23 novembre del 1980 ha devastato l'Irpinia con alcuni excursus sul terremoto del 23 luglio 1930 del Vulture, mentre il secondo convegno organizzato dalla SIGEA Sezione Puglia ad Altamura (BA), ha trattato i diversi aspetti dei dissesti del sottosuolo e gli sprofondamenti di cavità sotterranee in relazione al patrimonio edilizio esistente ed alla pianificazione urbanistica a scala comunale.

**CALITRI.** In molti di noi il terremoto del 23 novembre 1980, vissuto direttamente o tramite l'esperienza di parenti o documentari o anche come occasione di studio, ha lasciato una traccia indelebile, spesso quasi una linea di demarcazione nella vita di ciascuno. A distanza di trent'anni possiamo senz'altro ricordare questo terremoto come uno degli eventi più indicativi della storia sismica del nostro Paese, non solo per le sue conseguenze, ma anche perché ha rappresentato un punto di svolta scientifico e normativo per la difesa dai terremoti e per l'organizzazione della Protezione Civile, come già era stato per il disastroso terremoto di Reggio Calabria e Messina del 28 dicembre 1908 e per il terremoto del 23 luglio 1930 del Vulture. Infatti, dopo il terremoto dell'Irpinia del 1980 la comunità scientifica elabora la prima proposta di riclassificazione sismica del territorio basata su criteri tecnico-scientifici che consentirà di rendere obbligatorio il rispetto di specifiche norme tecniche per le costruzioni su circa il 45% del territorio italiano. Il 1980 sancisce anche la nascita in Italia della rete sismometrica di sorveglianza del territorio. Infatti, l'assenza di una rete di monitoraggio era stata tra i motivi dei ritardi nei soccorsi e nella definizione del quadro degli effetti e sull'effettiva entità della popo-

lazione coinvolta. Si avvia nel 1981, a cura del Ministero dei Lavori Pubblici, anche la realizzazione della Rete Accelerometrica Nazionale oggi gestita dal Dipartimento della Protezione Civile che consente di acquisire dati di estremo interesse per la definizione delle azioni sismiche di progetto. Il 1980, infine, segna la nascita della Protezione Civile in Italia. Fino ad allora la Protezione Civile era una struttura di coordinamento del Ministero dell'Interno, con scarsi poteri e mezzi. La tremenda lezione dell'Irpinia fece comprendere che tale ruolo non poteva essere affidato ad un settore specifico della pubblica amministrazione ma era necessario il coinvolgimento del Governo nella sua interezza. Nel 1982 nasce il Dipartimento della Protezione Civile, Zamberletti è nominato Ministro per il Coordinamento della PC, si introducono le attività di previsione e prevenzione, sono poste le basi per il percorso che porterà nel 1992 alla legge n.225 istitutiva del Servizio Nazionale della Protezione Civile, aprendo la strada all'assetto attuale del sistema. Ricordare quegli eventi vuol dire tenere viva l'attenzione non solo per ciò che è accaduto ma ancor di più per ciò che potrebbe accadere di nuovo non solo nei luoghi già noti per eventi simili ma anche in territori in cui la memoria si è affievolita. L'impegno di tutti, amministratori, tecnici, ricercatori è quello di operare in maniera sinergica per migliorare il quadro delle conoscenze scientifiche e destinare strumenti normativi e finanziari alla protezione sismica del territorio. La storia sismica dell'Italia è patrimonio di tutti ed in questa va recuperato un nuovo approccio alla cultura del territorio.

**ALTAMURA.** In cima alla classifica delle città a rischio idrogeologico per la presenza di cavità antropiche e naturali ci sono due delle principali città italiane, Roma e Napoli, ma anche Altamura, Canosa di Puglia e Gallipoli ed una lunga lista di altri comuni del Lazio, Abruzzo, Toscana, Campania, Puglia, Sicilia e Sardegna. I dissesti causati dal crollo delle volte delle cavità, che formano voragini in grado di inghiottire in un attimo auto, case e persone sono noti nella letteratura scientifica con il termine "sinkholes" e ultimamente vengono sempre più spesso utilizzati i termini voragine o sprofondamento. Tali fenomeni che interessano, se pur in misura diversa, l'intero territorio nazionale, costituiscono fattore di rischio

molto elevato poiché sovente caratterizzati da una rapida evoluzione (6 ore circa) che coinvolge aree urbanizzate ed infrastrutture, talvolta con un inaccettabile costo in vite umane. Ad innescare queste voragini si possono indicare: le piogge copiose, le fratture nel sottosuolo come pure le attività umane ed eventi sismici. Le cavità sotterranee, sia quelle naturali (quali le grotte carsiche o di natura vulcanica) sia quelle realizzate dall'uomo (quali escavazioni in sottosuolo per l'estrazione di roccia, cantine, frantoi, chiese rupestri, ecc.), sono da considerare un elemento della pericolosità idrogeologica alla stessa stregua di frane ed alluvioni. Analisi questa maturata sia dalle cronache degli ultimi decenni sia dalle attività svolte dall'ISPRA e dagli Enti Locali in termini di censimento dei fenomeni e interventi di risanamento dei dissesti. Sono tanti gli esperti a livello regionale e nazionale chiamati dalla SIGEA a confrontarsi su questo delicato tema, convinti che gli aspetti sociali ed economici legati a questo tipo di dissesto idrogeologico richiedano necessariamente una attenta analisi geologica dei luoghi a supporto della pianificazione territoriale. Si deve ricordare lo sforzo del Dipartimento Difesa del Suolo dell'ISPRA che nelle sue attività istituzionali evidenzia come i fenomeni naturali di sprofondamento rappresentino un fenomeno spesso poco considerato. Sono stati censiti e studiati dall'ISPRA più di 1000 casi di sprofondamento attribuiti a fenomeni naturali, cui si aggiungono alcune centinaia di sprofondamenti antropici avvenuti nei centri abitati. Molti di questi casi sono riportati nel volume degli Atti del precedente Workshop internazionale organizzato da ISPRA a Roma nel 2009 "I Sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale e in quello antropizzato" distribuito, grazie a Stefania Nisio, in occasione del convegno di Altamura. Il volume che vi accingete a leggere contiene le relazioni estese fornite dai relatori per il convegno di Calitri e di Altamura. Il nostro grazie a tutti i relatori, i sostenitori ed i soci della SIGEA, che hanno permesso la riuscita dei due convegni e la pubblicazione dei presenti atti. I momenti di riflessione sulla nostra storia, sul nostro territorio e sul nostro futuro non possono essere separati dagli eventi catastrofici che nella loro drammaticità rappresentano il normale evolversi dei fenomeni naturali.



Società Italiana di Geologia Ambientale  
Sezione Campania  
Sezione Basilicata  
Sezione Puglia



Calitri (Av), **22 novembre 2010**  
ore **15.30**

Sala della Comunità Montana - Corso Europa, 12

# Quando la terra tremò: il terremoto del 23 novembre 1980

A trent'anni dal terremoto che colpì duramente il territorio della Campania, della Basilicata e della Puglia, a ottant'anni da quello del Vulture, il convegno vuole offrire un momento di discussione e di confronto in tema di sicurezza e pianificazione sismica del territorio alla luce dell'evoluzione normativa nazionale e regionale.

## Convegno

Moderatore: Alfredo Pitullo (SIGEA)

Ore 15.30 Saluti  
Giuseppe Di Milia (Presidente Comunità Montana Alta Irpinia)  
Anna Improta (Presidente SIGEA Campania)  
Salvatore Valletta (Presidente SIGEA Puglia)  
Mario Bentivenga (Presidente SIGEA Basilicata)

ore 15.45 - 16.15  
**Assetto morfostrutturale e neotettonica delle aree dei terremoti dell'Irpinia (1980) e del Monte Vulture (1930)**  
Marcello Schiattarella (Università degli Studi della Basilicata)

ore 16.15 - 16.45  
**La sismo-induzione di frane nei terremoti del 1930 e 1980**  
Vincenzo Del Gaudio (Università degli Studi di Bari)

ore 16.45 - 17.15  
**La prevenzione sismica dall'Irpinia a oggi: il ruolo dei geologi e la microzonazione sismica.**  
Giuseppe Naso (Dipartimento Protezione Civile Nazionale)

ore 17.15 - 17.45  
**Il controllo delle grandi dighe in Italia. Procedure previste a seguito di eventi sismici**  
Vito Savanella (Ufficio Tecnico per le Dighe - Napoli) ore 17.45 - 18.15  
**"Fate presto". L'evoluzione della Protezione Civile dal terremoto dell'Irpinia ad oggi.**  
Sergio Castenetto (Dipartimento Protezione Civile - Roma)

Ore 18.15  
**Tavola Rotonda**  
**Dalla ricostruzione alla prevenzione: il ruolo degli Enti Locali**  
Moderatore: Giuseppe Naso (Dipartimento Protezione Civile Nazionale)

Intervengono:  
**Giuseppe Di Milia** - Sindaco di Calitri (Av)  
**Antonio Placido** - Sindaco di Rionero in Vulture (Pz)  
**Giovanni Calcagni** - Presidente Ordine dei Geologi della Puglia  
**Raffaele Nardone** - Presidente Ordine dei Geologi di Basilicata  
**Francesco Peduto** - Presidente Ordine dei Geologi della Campania

Concludono:  
**Angela Barbanente** - Assessore Assetto del territorio Regione Puglia  
**Giovanni Romano** - Assessore Ambiente Regione Campania

Per il convegno è stato richiesto accreditamento APC per geologi  
Segreteria organizzativa:  
SIGEA Sezione Puglia c/o Ordine Geologi Puglia via Junipero Serra, 19 - 70125 Bari  
tel./fax 080.5429864 E-mail: puglia@sigeaweb.it

## PATROCINI RICHIESTI





**Atti del Convegno**

**Quando la terra tremò:  
il terremoto  
del 23 novembre 1980**

**Calitri (AV), 22 novembre 2010**

# La sismoinduzione di frane nei terremoti irpini del 1930 e 1980

VINCENZO DEL GAUDIO  
Dipartimento di Geologia e Geofisica – Università degli Studi “Aldo Moro” di Bari

## RIASSUNTO

I terremoti Irpini del 1930 e 1980 sono stati gli ultimi due eventi sismici italiani ad aver avuto una magnitudo maggiore di 6.5, una soglia al di là della quale un terremoto produce effetti di destabilizzazione dei versanti a scala regionale. Tali effetti contribuiscono pesantemente al quadro di danneggiamento e costituiscono un fattore di grave ostacolo alla gestione dei soccorsi. I dati raccolti sui fenomeni franosi indotti dai suddetti terremoti mostrano che, contrariamente a quanto osservato in aree geografiche al di fuori dell'Italia, nell'Appennino meridionale i movimenti di massa sismo-indotti non sono in prevalenza frane di primo distacco, ma piuttosto riattivazioni di frane pre-esistenti, spesso caratterizzate da un innesco ritardato di ore o giorni rispetto al verificarsi della scossa principale. Queste caratteristiche della franosità sismica appaiono riconducibili al ruolo svolto nella destabilizzazione dei versanti non tanto dall'effetto diretto dello scuotimento sismico, quanto dalle alterazioni idrogeologiche prodotte dai terremoti, testimoniate dal manifestarsi di anomalie idrologiche nell'imminenza dell'evento sismico e nelle ore o nei giorni successivi. I dati disponibili sulla suscettibilità dei pendii alla sismo-induzione di frane segnalano la diffusa presenza nell'Appennino meridionale di pendii marginalmente stabili che possono essere mobilitati in numero elevato in occasione di forti terremoti. È quindi di grande importanza inquadrare questo problema in una corretta pratica di gestione del territorio in funzione di una efficace prevenzione dei danni attesi per futuri scenari sismici di elevata energia.

## 1. INTRODUZIONE

Le osservazioni condotte in numerosi terremoti che hanno interessato aree montuose o collinari in tutto il mondo hanno dimostrato che, spesso, una quota molto rilevante degli effetti di danneggiamento è il risultato di fenomeni di instabilità del suolo indotta dall'evento sismico. Inoltre, nello scenario di una crisi sismica di elevata energia, la mobilitazione diffusa di frane entro un'area estesa determina condizioni di grave ostacolo alla gestione dell'emergenza ed alla organiz-

zazione dei soccorsi, per esempio causando interruzioni delle vie di comunicazione e di infrastrutture di servizio (acquedotti, linee elettriche, ecc.). Infine, le frane generate da un terremoto possono a loro volta innescare ulteriori fattori di rischio: per esempio possono creare sbarramenti fluviali che formano laghi temporanei la cui successiva tracimazione può dare origine a violente inondazioni.

L'insieme di queste considerazioni ha sollecitato da qualche decennio lo sviluppo di nuove linee di ricerca che analizzano l'impatto complessivo di un terremoto sulla stabilità dei versanti di una regione e quindi sul conseguente scenario che ne deriva. Le basi concettuali di questo approccio sono state definite da Keefer (1984) che, partendo da un database di frane prodotte da 40 terremoti in tutto il mondo, ha delineato una classificazione delle frane in base alla loro suscettibilità all'innesco sismico, secondo tre categorie principali: 1) frane disgregate (“disrupted slides”), quali crolli e “rock avalanche”, che, nel database analizzato, costituiscono la tipologia presente in numero largamente maggioritario (86%); 2) frane coerenti, intese come frane il cui movimento avviene lungo una ben definita superficie di scivolamento (slump rotazionali, scivolamenti, colate), che si presentano in numero molto più ridotto (8% nel database analizzato), ma, avendo dimensioni maggiori, comportano generalmente un rischio di danneggiamento più elevato; 3) espansioni laterali e colate rapide, generate da fenomeni di liquefazione.

Con riferimento a queste tipologie di frane, Keefer individuò alcune proprietà generali della loro distribuzione spaziale, quali, il numero di frane, l'area di distribuzione e la distanza massima dalla sorgente del terremoto, tutte quantità analizzate in funzione della magnitudo dell'evento. Per esempio, per eventi di magnitudo maggiore di 6.5 si può avere l'innesco di migliaia di frane fino a distanze superiori a 100 km, per aree estese migliaia di km<sup>2</sup> (Keefer, 2002). La suddetta soglia di magnitudo costituisce quindi un livello energetico al di là del quale un terremoto produce effetti di destabilizzazione dei versanti su una estesa scala regionale. È quindi di grande importanza, per la definizione degli scenari sismici di

futuri terremoti, comprendere gli effetti che possono derivare da eventi a questa scala di grandezza. Per tale scopo è utile esaminare i dati relativi ad eventi di queste dimensioni che si sono verificati nel passato. In Italia gli ultimi due eventi che hanno superato la magnitudo 6.5 sono stati i due terremoti irpini del 1930 e 1980: è quindi di notevole interesse l'analisi dei dati disponibili sui fenomeni di sismo-induzione delle frane verificatisi in queste due crisi sismiche.

## 2. CARATTERISTICHE GENERALI DEI TERREMOTI DEL 1930 E 1980

I due terremoti del 1930 e 1980 presentano alcune analogie, ma anche alcune differenze. Essi sono avvenuti in regioni contigue dell'Appennino meridionale (Fig. 1), anche se la sorgente del primo era collocata più in prossimità del fronte della catena, mentre quella del secondo in una zona più assiale. Una differenza che può essere stata rilevante per gli effetti del terremoto riguarda la stagione in cui i due eventi si sono verificati: il terremoto del 1930, infatti, è avvenuto in piena estate (23 luglio), mentre quello del 1980 in un mese autunnale tipicamente piovoso (23 novembre). Ciò rende particolarmente interessante una comparazione dei due eventi perché permette di studiare la differenza dell'impatto di un terremoto sulla stabilità dei versanti in condizioni idrologiche diametralmente differenti.

Dal punto di vista delle dimensioni delle sorgenti, il terremoto del 1980, con una magnitudo di momento sismico  $M_w = 6.9$  è stato leggermente superiore di quello del 1930, la cui magnitudo, stimata per via strumentale o da dati macrosismici, risulta compresa tra di 6.5 e 6.7. Per quest'ultimo evento Pino *et al.* (2008) hanno identificato come sorgente una faglia normale di direzione appenninica con immersione adriatica, rottasi per un'estensione di 32 km in un tempo di circa 20 s (Fig. 2). Comparativamente, il terremoto del 1980 fu caratterizzato da un processo più complesso che interessò almeno tre distinti episodi di rottura ad intervalli di 20 secondi (Bernard e Zollo, 1989). Di questi sub-eventi, i primi due furono caratterizzati da un meccanismo di faglia normale con direzione appenninica e immersione adriatica,

e l'ultimo fu prodotto da una faglia antitetica alle precedenti, con immersione tirrenica, delineando nel complesso il collasso di una struttura crostale cuneiforme (Fig. 2). La successione di sub-eventi su faglie diverse determinò una durata complessiva della scossa insolitamente lunga (circa un minuto) per un evento di questa magnitudo, il che può aver contribuito ad accentuare i danneggiamenti, ma anche gli effetti di destabilizzazione dei versanti.

### 3. LE FRANE INDOTTE DAL TERREMOTO DEL 1930

Una comparazione degli effetti di induzione di frane dei due terremoti è reso problematico dalla differente quantità e qualità dei dati disponibili relativamente a questi fenomeni. Per il terremoto del 1930, il più ampio studio pubblicato (Esposito *et al.*, 2009) riporta dati relativi a 26 fenomeni franosi: si tratta chiaramente di un campione largamente incompleto, se comparato ai numeri previsti dalle statisti-

che di Keefer. Tuttavia utili indicazioni si possono ricavare analizzando alcuni eventi per i quali sono disponibili maggiori informazioni, come i casi di San Giorgio la Molara e di Melfi.

Nel territorio di San Giorgio la Molara, nel Sannio, si verificò una grossa frana costituita da uno slump rotazionale associato ad una colata. La frana ebbe una forma all'incirca triangolare, con una lunghezza complessiva di 3 km ed un fronte di 1 km al piede, dove il corpo di frana sbarrò il corso del fiume Tammaro deviandone temporaneamente l'alveo (Esposito *et al.*, 2009; Boschi *et al.*, 1997). Un aspetto interessante di questa frana è che si trattò di una riattivazione di una frana pre-esistente, descritta in una relazione (Fig. 3) relativa a un terremoto del 1805 in Molise (magnitudo stimata 6.6: CPTI, 2004), con epicentro distante 45 km. Anche in quel caso la frana causò uno sbarramento del fiume Tammaro, generando un lago temporaneo (Porfido *et al.*, 2002).

Questo caso solleva una questione che si ripresenta di frequente nella sismo-induzione di frane nell'Appennino meridionale. Dall'analisi del suo database mondiale, Keefer (1984) deriva l'osservazione che, generalmente, le frane sismo-indotte appaiono es-

Figura 1 – Localizzazione geografica degli epicentri dei terremoti irpini del 1930 e 1980 (denotati da stelle) e delle località interessate dalle frane citate nel testo (indicate da quadratini).

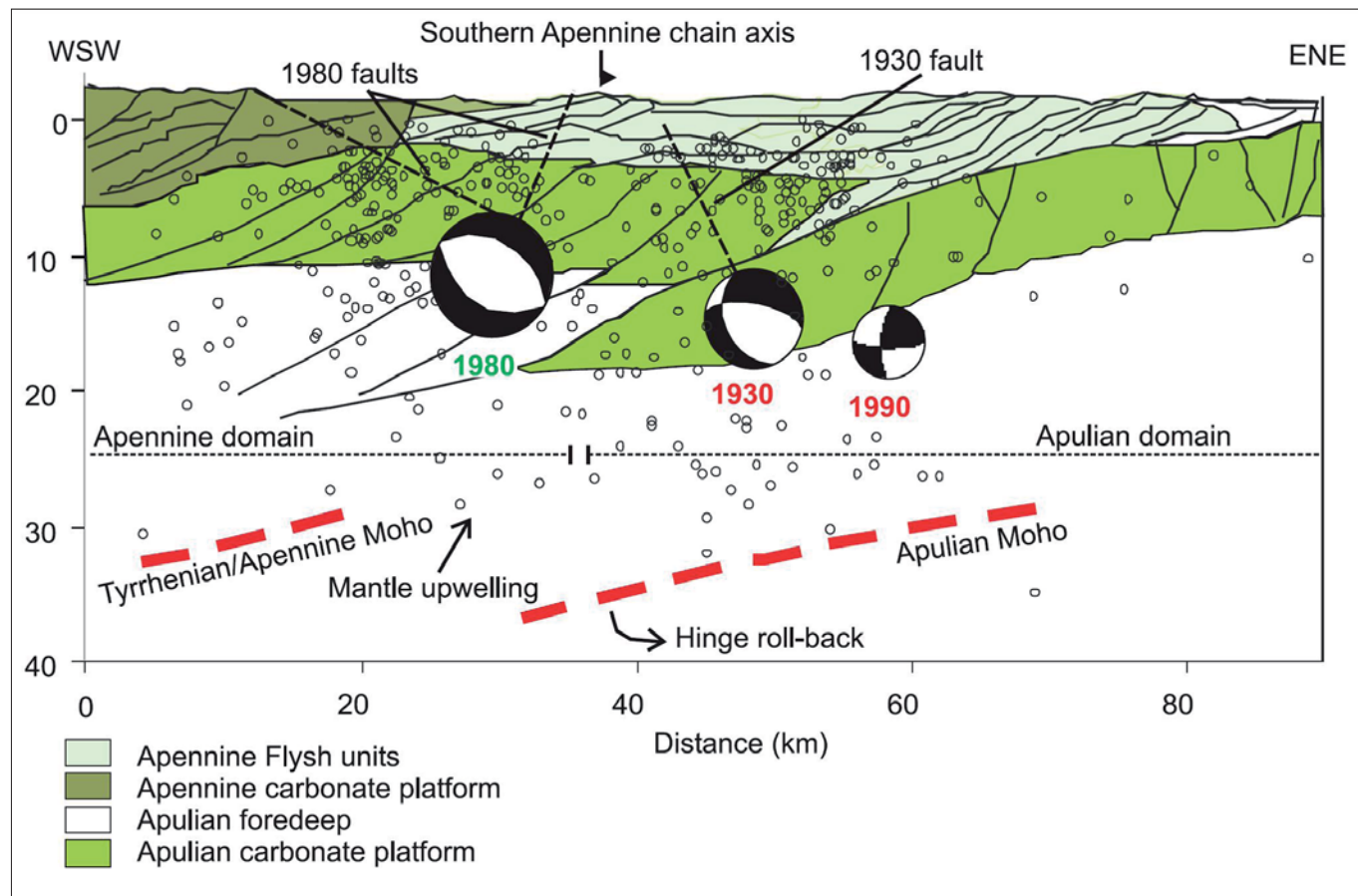
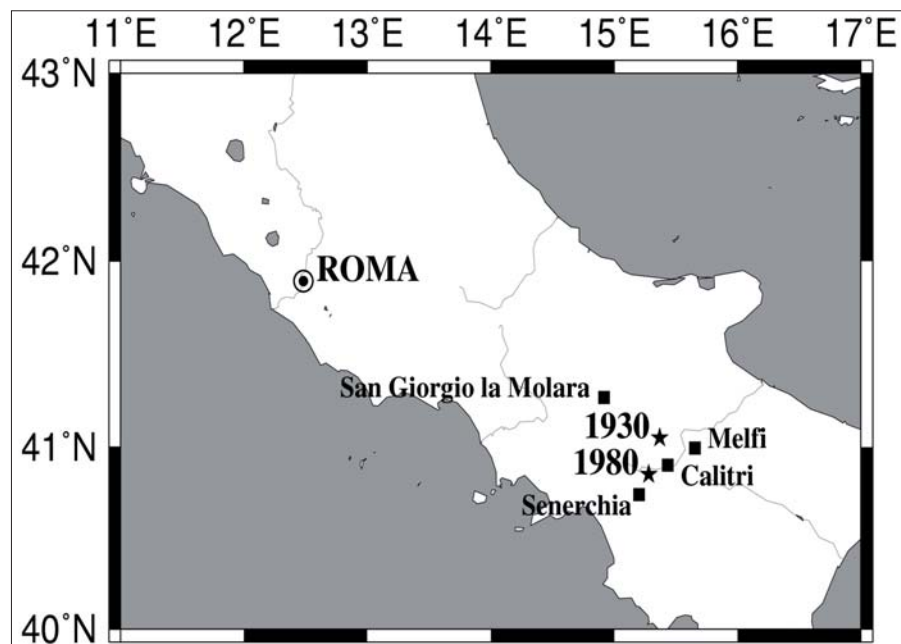


Figura 2 – Sezione della catena dell'Appennino meridionale attraverso le strutture sismogenetiche che generarono i terremoti del 1930 e del 1980, con i relativi meccanismi focali. I cerchietti rappresentano la proiezione di ipocentri di eventi crostali registrati tra il 1981 e il 2002 (da Pino *et al.*, 2008)

sere prevalentemente di primo distacco, non solo nel caso ovvio delle frane da crollo, ma anche in quello delle frane di tipo coerente. Questa osservazione può essere ricondotta al fatto che l'attivazione di frane legate ad eventi meteorici tende ad "equilibrare" il profilo di un pendio, avendo così un effetto stabilizzante rispetto alle sollecitazioni di successivi terremoti. Nell'area dell'Appennino meridionale sembra che questa condizione non si realizzi, sicché i pendii appaiono rimanere permanentemente in condizioni di equilibrio marginalmente stabile, che li porta a ripetute riattivazioni delle medesime frane.

Un altro caso di interesse è rappresentato dagli effetti del terremoto del 1930 sull'abitato di Melfi, centro situato sulle pendici di una collina il cui nucleo è costituito da rocce laviche. Uno studio di Gizzi e Masini (2004), basato su documentazioni archivistiche, ha esaminato in dettaglio la distribuzione dei danneggiamenti prodotti a Melfi dal terremoto del 1930, riscontrando una concentrazione di danneggiamenti gravi nella parte bassa del versante sud della collina (Fig. 4). Questa zona è risultata quella maggiormente danneggiata anche in occasione di precedenti terremoti, quale quello del 14 agosto 1851 (magnitudo stimata 6.3), per il quale alcune descrizioni dei danni suggeriscono un concorso, nel crollo di edifici, da parte di un collasso dei terreni del pendio: è infatti descritto che pezzi di fondamenta rotolarono a valle insieme a blocchi di tufo franati (Gizzi e Masini, 2004). Questo caso evidenzia come, soprattutto nei terremoti del passato, il ruolo dei franamenti nel quadro di danneggiamento prodotto dalle scosse sismiche può essere rimasto sottovalutato. Gizzi e Masini (2004) sottolineano che i danni maggiori del terremoto del 1930 appaiono associati alla zona di Porta Calcinai, dove fu osservata l'apertura di fessurazioni sul pendio e, otto giorni dopo la scossa principale, l'attivazione di una frana.

L'esempio riportato mostra un'altra peculiarità frequente nelle frane sismo-indotte in Appennino meridionale, e cioè il ricorrente verificarsi di franamenti con un certo ritardo dopo la scossa principale. Ciò implica che i movimenti di massa spesso non sono innescati direttamente dall'azione meccanica degli scuotimenti sismici, ma sono il risultato di una destabilizzazione dei pendii prodotta da un deterioramento delle proprietà meccaniche dei materiali (per esempio per effetto di apertura di fessurazioni) e/o da alterazioni idrogeologiche. In effetti, in riferimento al terremoto del 1930, Esposito *et al.* (2009) hanno raccolto evidenze documentali di diverse alterazioni idrologiche, quali variazioni di portata di sorgenti e di livello dell'acqua in pozzi e fiumi, manifestatesi nelle ore o nei giorni successivi alla scossa principale. Tali variazioni non sono riconducibili alle

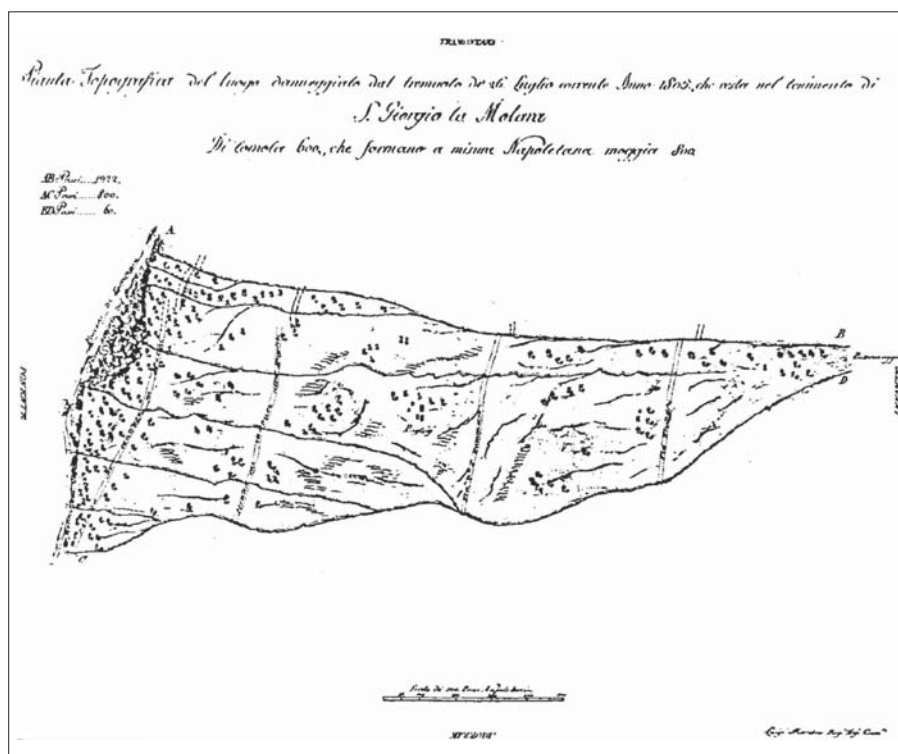


Figura 3 – Pianta Topografica, redatta dal Regio Ingegnere Luigi Marchese, relativa alla perizia della frana innescata dal terremoto molisano del 1805 (da Porfido *et al.*, 2002)

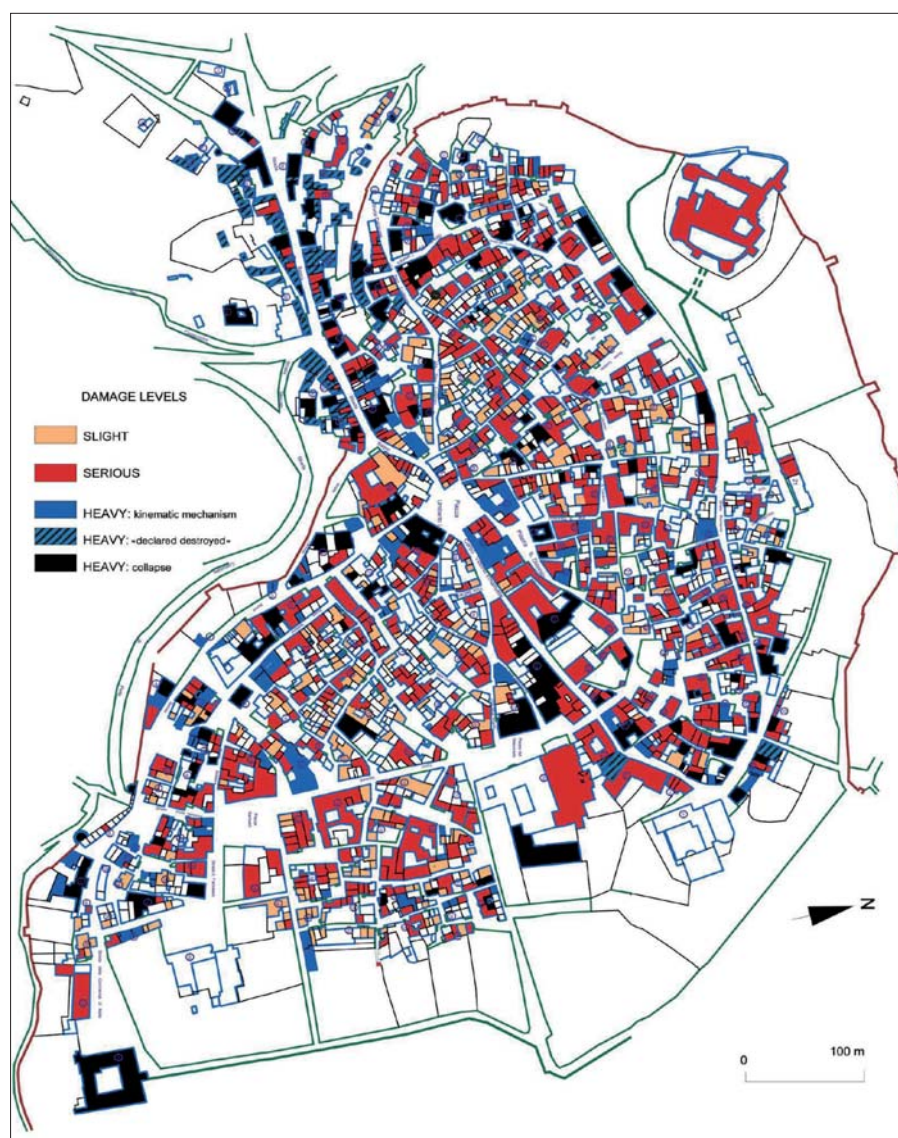


Figura 4 – Quadro dei danneggiamenti dell'abitato di Melfi a seguito del terremoto del 1930, ricostruito da Gizzi e Masini (2004)

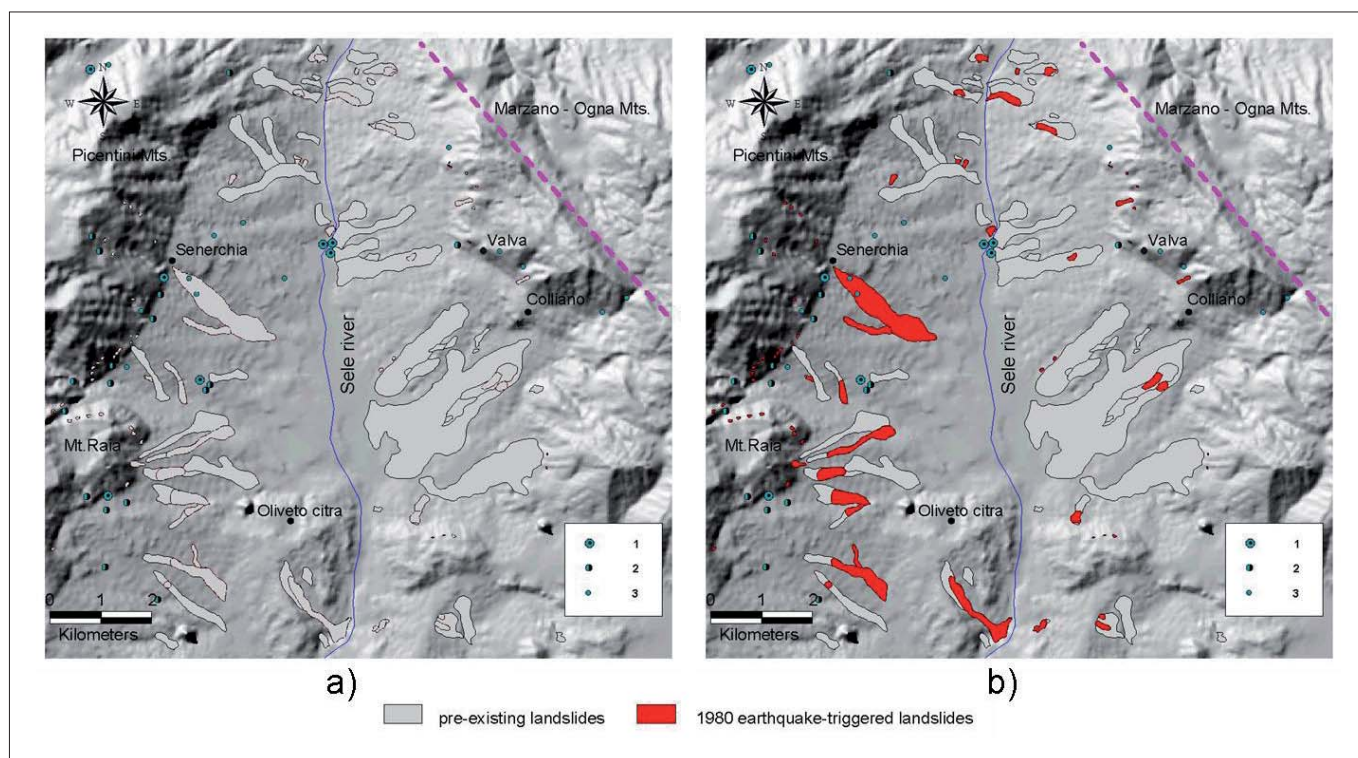


Figura 5 – Mappa delle frane nella alta valle del Sele attivatesi precedentemente al terremoto del 1980 (a) e (in rosso) in conseguenza di questo (b). I cerchietti blu marciano la posizione di sorgenti con portata minore di 5 l/s (1), tra 5 e 50 l/s (2) e maggiore di 50 l/s (3). La linea tratteggiata rappresenta schematicamente la traccia in superficie della faglia che ha causato il terremoto (da Wasowski *et al.*, 2002)

precipitazioni verificatesi in quei giorni e devono quindi attribuirsi ad un effetto del terremoto legato a variazioni della permeabilità dei terreni e a variazioni delle pressioni esercitate sugli acquiferi, conseguenti al riassetto di blocchi tettonici. Simili fenomeni sono stati registrati anche a notevole distanza dall'area epicentrale e possono aver determinato localmente rapide variazioni nei livelli delle falde acquifere, con effetti destabilizzanti su pendii marginalmente stabili in tempi successivi alla scossa principale.

### 3. LE FRANE INDOTTE DAL TERREMOTO DEL 1980

Riguardo al terremoto del 1980, i dati disponibili sono ovviamente più abbondanti. Un inventario di circa 200 frane è stato ottenuto in alcuni studi sistematici (Esposito *et al.*, 1998, Porfido *et al.*, 2002) che hanno fornito anche delle statistiche circa la loro distribuzione tra diverse tipologie: il 47% delle frane censite è costituito da crolli, il 40% da frane coerenti (slump, colate), il 4% da colate rapide, mentre il 9% è di incerta natura.

I numeri, per quanto di un ordine di grandezza superiore rispetto alle frane documentate per il terremoto del 1930, fanno ritenere che si tratti comunque di un inventario largamente incompleto. Se si confrontano questi numeri con le statistiche di Keefer, si trova che essi sono molto al di sotto delle medie osservate per terremoti di magnitudo confrontabile. Per esempio per il terremoto di identica magnitudo verificatosi a Loma Prieta (California) il 17 ottobre 1989, il numero

di frane riconosciute sul terreno ammonta a circa 1300; inoltre, la distribuzione statistica tra le tipologie di frane indica una prevalenza molto più marcata delle frane da crollo (74%), che si spiega tenendo conto della maggiore lacunosità, in un inventario incompleto, dei dati relativi a frane di dimensioni minori.

Tuttavia uno studio focalizzato sull'area della alta valle del Sele (Wasowski *et al.*, 2002), a ridosso della faglia che ha generato il terremoto del 1980, ha concluso che, limitatamente a quest'area, l'inventario si può ritenere sostanzialmente completo. Infatti la concentrazione delle frane (numero di distacchi di frana per km<sup>2</sup>) calcolata per quest'area è del tutto comparabile con quella osservata per il terremoto di Loma Prieta nel medesimo intervallo di distanze dalla faglia sismogenetica (0 - 10 km). Ciò rende possibile trarre statistiche significative circa la distribuzione spaziale delle frane inventariate nella alta valle del Sele.

La zona in questione è caratterizzata dalla presenza di massicci calcarei sui due lati della valle (monti Picentini ad ovest, monti Marzano e Ogna ad est), bordati da faglie quaternarie che determinano la presenza di ripide scarpate. Verso il fondo valle le formazioni calcaree sono a contatto con formazioni terrigene di origine torbiditica (flysch di argille varicolori e calcari marnosi), aventi un contenuto argilloso variabile. Sia la parte alta che quella bassa dei fianchi della valle sono state variamente interessate, anche prima del 1980, da fenomeni franosi di diversa natura (crolli sui pendii rocciosi, slump rotazionali e colate sui pendii argillosi) (Fig.

5a). In concomitanza del terremoto del 1980 si sono attivate circa 80 frane, per il 60% circa costituite da crolli e per il resto da frane di tipo coerente che appaiono essere riattivazioni di frane pre-esistenti (Fig. 5b).

Un'analisi della distribuzione spaziale di queste frane ha evidenziato una chiara anomalia: benché sia ragionevole attendersi un decremento della concentrazione delle frane con la distanza dalla faglia che ha generato il terremoto, si osserva una inversione di questa tendenza a partire da una distanza di 6 km dalla faglia, sino al raggiungimento di un massimo assoluto di concentrazione intorno ai 10 km (Fig. 6). Questo dato, di per sé, potrebbe non essere significativo, perché andrebbe incrociato con quello delle caratteristiche litologiche e morfologiche delle aree collocate alle diverse distanze. Tuttavia, un'analisi più approfondita mostra che l'incremento della concentrazione delle frane con la distanza si verifica al passaggio dal versante orientale a quello occidentale della valle e che, sostanzialmente, l'anomalia osservata è dovuta ad una maggiore concentrazione di frane sul versante occidentale rispetto a quello orientale, nonostante questo sia più prossimo alla faglia generatrice del terremoto (Wasowski *et al.*, 2002).

Dal punto di vista litologico i due versanti appaiono assai poco differenziati, se non per il fatto che sul versante occidentale è più comune trovare nei flysch stratificazioni in contro-pendenza (il che dovrebbe, semmai, rendere questo versante meno suscettibile alla franosità). Per quanto riguarda, poi, le pendenze, che hanno un'ovvia influenza sulla

franosità, la loro distribuzione di frequenza sui due versanti appare nel complesso abbastanza simile. Ne consegue che né la litologia, né le caratteristiche topografiche possono spiegare l'anomalia osservata nella distribuzione delle frane.

Nello studio citato (Wasowski *et al.*, 2002) due sono i fattori individuati come i più probabili responsabili dell'anomalia osservata. Il primo è il fatto che il versante orientale, precedentemente al 1980, era stato interessato più frequentemente e diffusamente da fenomeni franosi (Fig. 5a), il che si riflette in una pendenza media leggermente più bassa delle aree di frane pre-esistenti (di circa 2° gradi inferiore rispetto al versante occidentale): ciò può aver rappresentato un fattore di relativa maggiore "stabilizzazione" del versante rispetto alle sollecitazioni dell'evento sismico. Un secondo fattore è rappresentato da una "asimmetria idrogeologica" evidenziata dalla maggiore presenza di sorgenti e di maggiori portate dei flussi d'acqua provenienti dagli acquiferi del versante occidentale (Fig. 5), il che può aver determinato una accentuazione dei fenomeni di destabilizzazione dei versanti in relazione agli effetti del terremoto sugli acquiferi.

Ulteriori elementi di interesse emergono dall'esame delle modalità di occorrenza delle maggiori frane prodotte dal terremoto del 1980. Si possono citare, a questo riguardo, i casi delle frane di Senerchia e di Calitri.

La frana di Serra dell'Acquara a Senerchia (Fig. 7) ha mobilizzato un pendio costituito prevalentemente da argille varicolori, già interessato da una frana pre-esistente al margi-

ne meridionale dell'abitato. Il franamento si è sviluppato sotto forma di una colata di 2.5 km larga fino a un massimo di 500 m e profonda fino a 33 m (Cotecchia *et al.*, 1986). L'inizio del movimento viene fatto risalire a circa 8 ore dopo la scossa principale del terremoto (Esposito *et al.*, 1998). I dati raccolti e le analisi eseguite indicano che la frana fu attivata in maniera indiretta dal terremoto e che un ruolo importante fu svolto da un probabile innalzamento della superficie piezometrica entro il corpo della vecchia frana (Cotecchia *et al.*, 1986).

Un movimento di massa che è stata oggetto di numerosi studi su un lungo arco di tempo è quello di Calitri (Hutchinson e Del Prete, 1985; Crespellani *et al.*, 1996; Martino e Scarascia Mugnozza, 2005), anche in relazione al fatto che, in questo caso, la rottura del pendio è iniziata all'interno dell'abitato e che, in prossimità della nicchia di distacco, era collocata una stazione accelerometrica (Fig. 8). Il movimento ha interessato un pendio costituito prevalentemente da argille grigio-azzurre ed ha avuto uno sviluppo complesso con slump

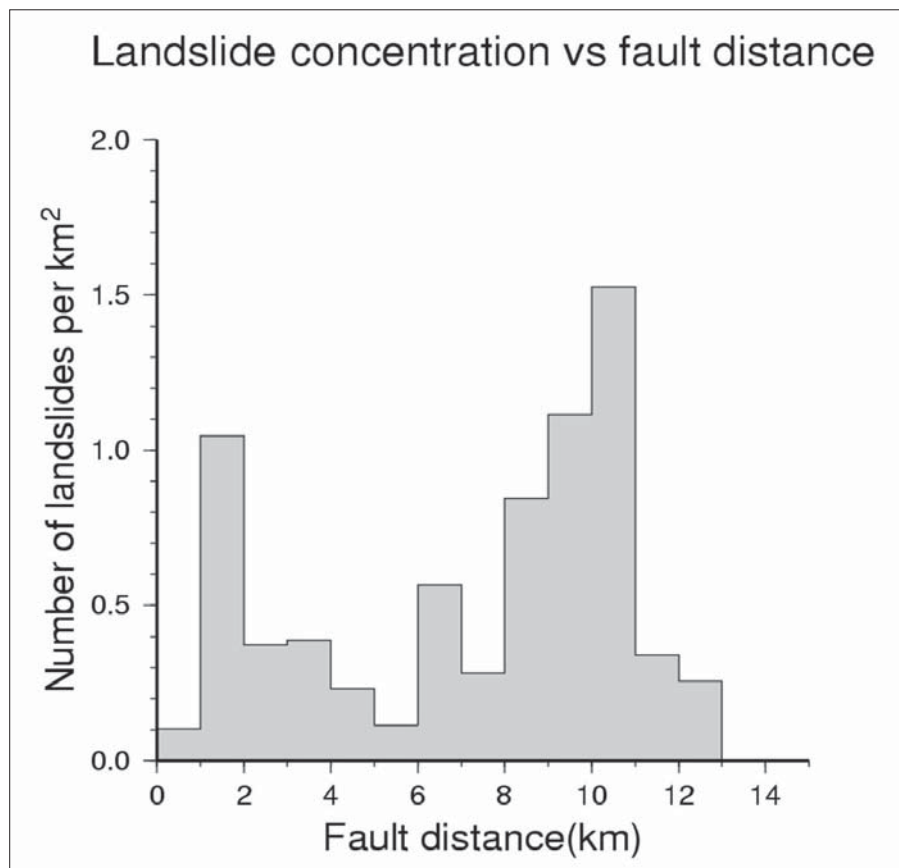


Figura 6 – Concentrazione delle frane (numero di frane per km<sup>2</sup>) indotte nella alta valle del Sele dal terremoto del 1980, in funzione della distanza dalla faglia responsabile del terremoto (da Wasowski *et al.*, 2002)

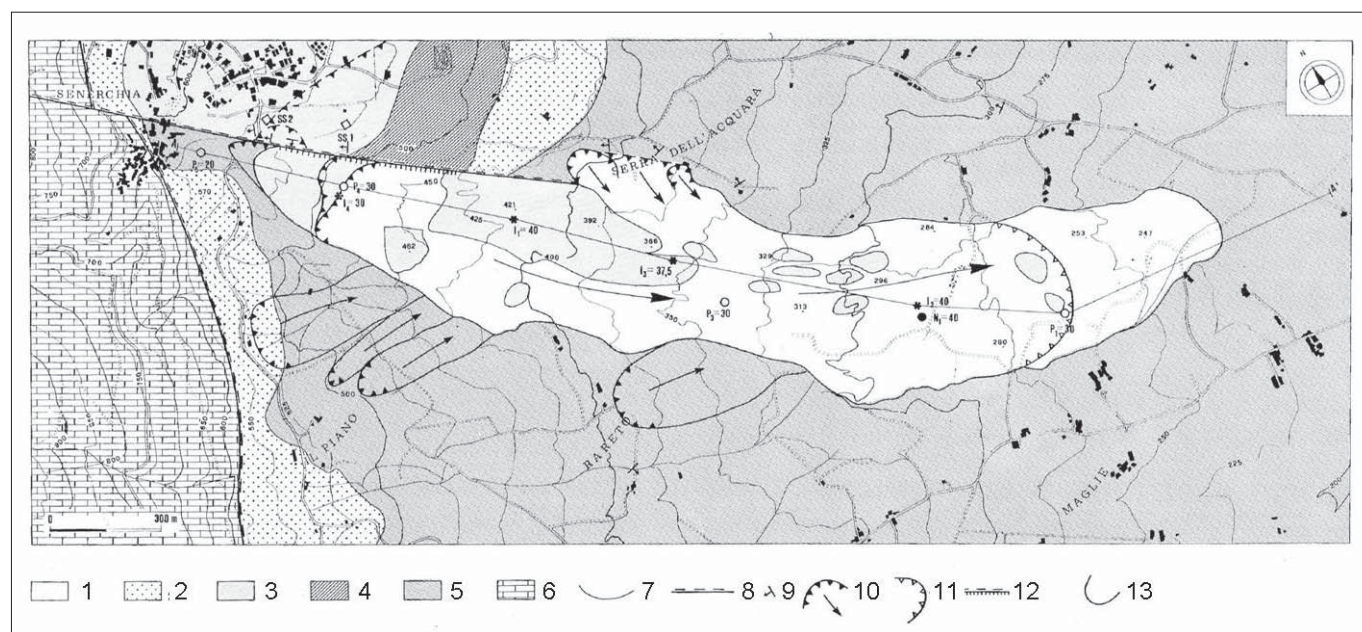


Figura 7 – Geologia della frana di Serra dell'Acquara: 1) detrito di frana con breccie calcaree; 2) detrito attuale e recente; 3) breccie calcaree; 4) detrito in megablocchi; 5) Unità Sicilide; 6) Calcari dolomitici; 7) limiti di formazione; 8) faglie normali; 9) giacitura della stratificazione; 10) scarpate principali delle frane; 11) piede della parte della frana riattivata il 27 dicembre del 1980; 12) scarpate di faglia; 13) limiti di frane (modificato da Cotecchia *et al.*, 1986)

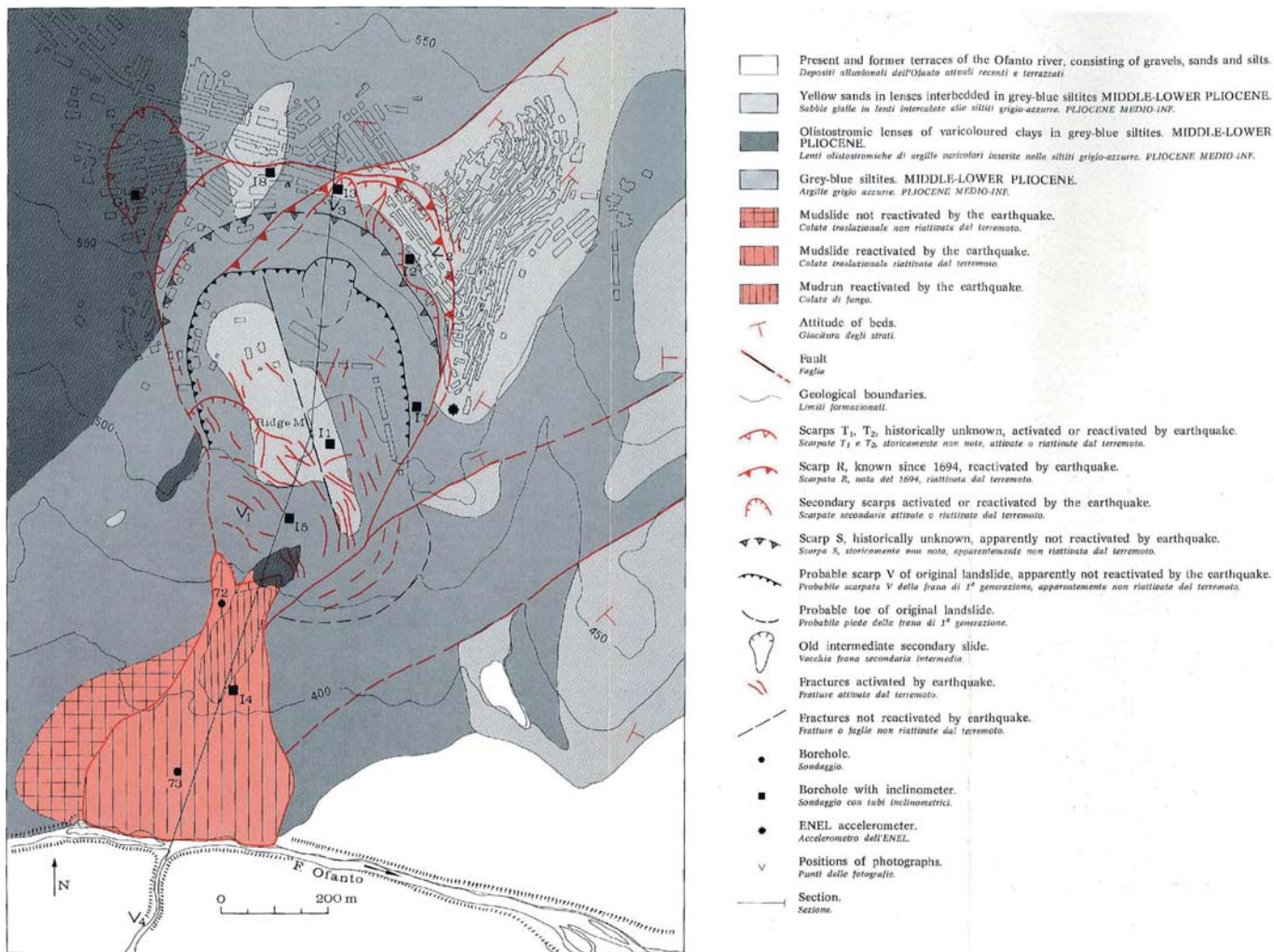


Figura 8 – Geologia della frana di Calitri (da Hutchnison e Del Prete, 1986)

rotazionali larghi fino a 600m e profondi fino a 100 m nella parte alta del pendio e colate spesse fino a 10 m nella parte bassa, estendendosi per oltre un chilometro fino alle rive dell'Ofanto (Hutchinson e Del Prete, 1985). La tempistica esatta dell'attivazione dei movimenti è incerta: è possibile che le prime fessurazioni del pendio si siano manifestate in concomitanza con la scossa principale o meno di un'ora dopo, tuttavia i movimenti di sprofondamento che hanno interessato alcune strade e piazze della parte vecchia del paese sono iniziati circa 3 ore e mezza dopo la scossa principale (Martino e Scarascia Mugnozza, 2005). Anche per questa frana ci sono dati che indicano che lo stesso pendio era andato soggetto in passato a movimenti di massa sia di origine sismica che meteorica.

Gli esempi citati evidenziano la ricorrenza, tra le frane prodotte dal terremoto del 1980, di alcune caratteristiche già osservate tra quelle del 1930, cioè la frequente presenza di riattivazioni di vecchie frane e il tempo di innesco ritardato rispetto al momento del terremoto. Quest'ultimo aspetto è stato esaminato in maniera sistematica da Esposito *et al.* (1998) per tutte le frane censite. I dati raccolti indicano che, a parte il caso delle frane in roccia (cioè, generalmente, crolli), che per

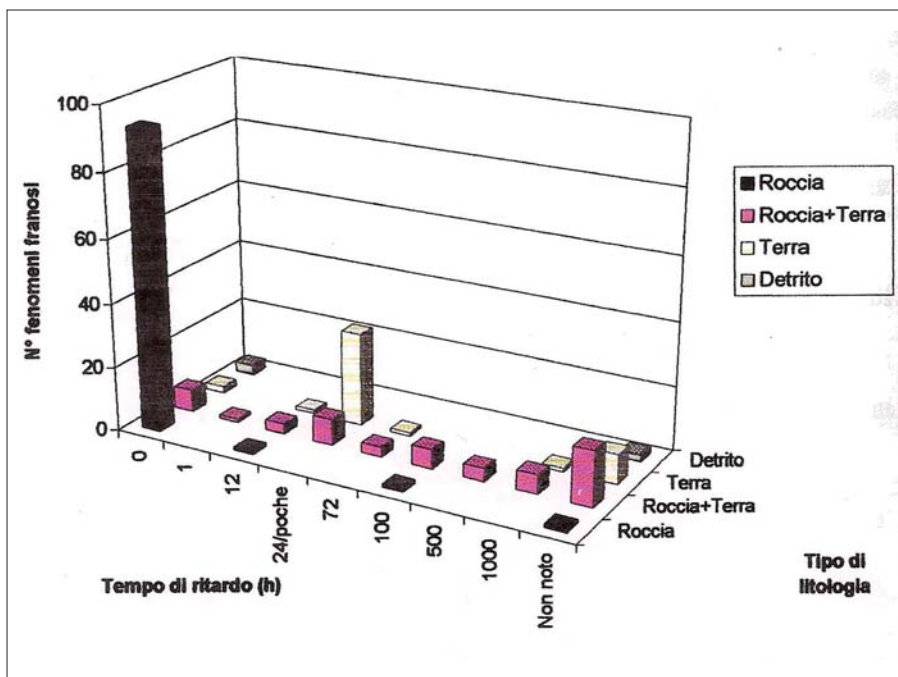


Figura 9 – Distribuzione dei valori di ritardo nell'innesco sismico di frane a seguito del terremoto del 1980 per diverse tipologie di frane (da Esposito *et al.*, 1998)

la quasi totalità hanno avuto una attivazione cosismica, le altre frane mostrano prevalentemente, nei tempi di innesco, un ritardo variabile da poche ore ad alcuni giorni rispetto al momento della scossa principale (Fig. 9).

Queste caratteristiche della distribuzione temporale della sismo-induzione delle frane suggerisce, ancora una volta, un ruolo importante svolto dalle alterazioni idrogeologiche che si sono manifestate nelle ore o nei giorni

## $(Ac)_{10}(0.10|50 y)$ for coherent slides in soft soil

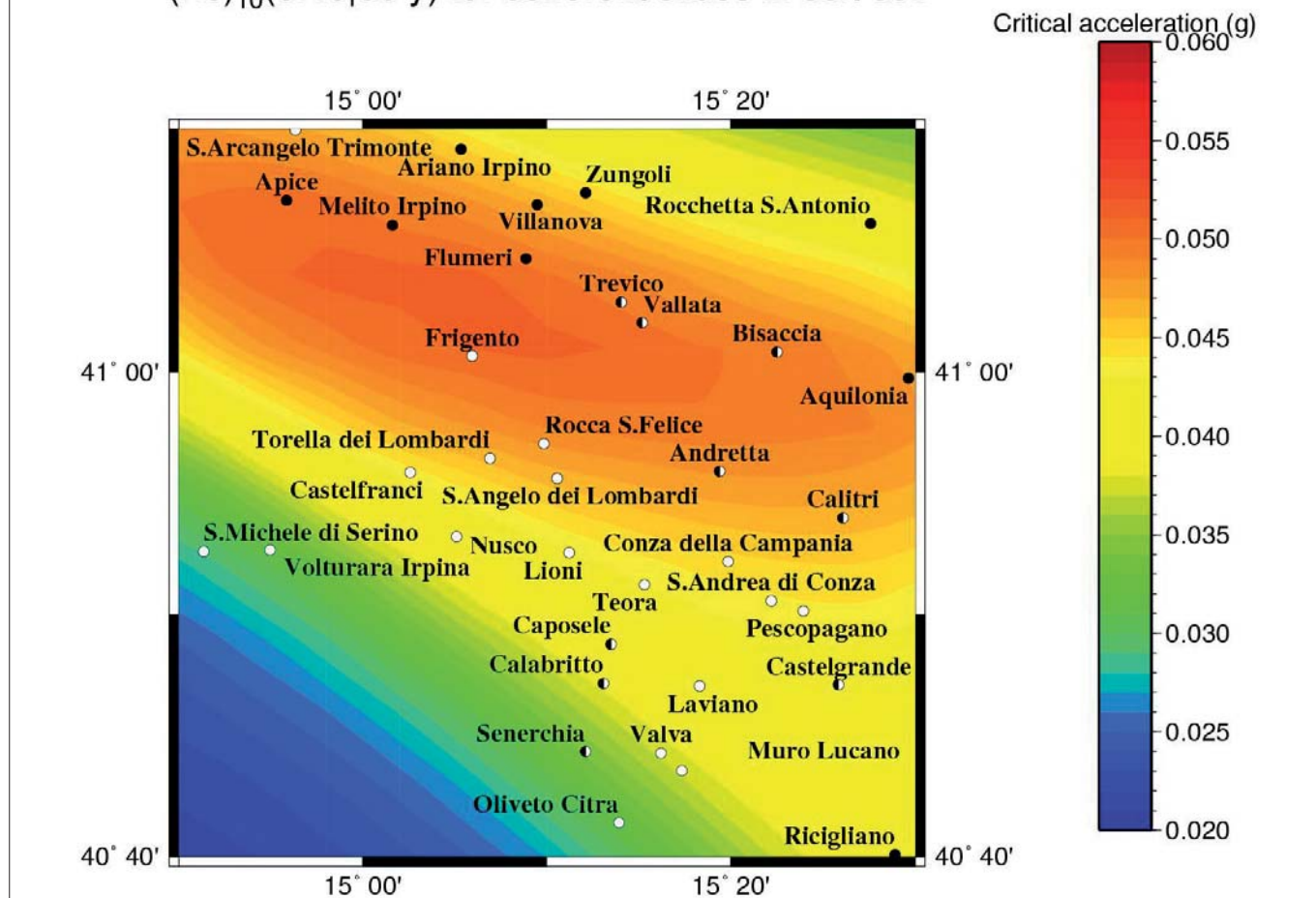


Figura 10 – Mappa dei valori di accelerazione critica minima richiesta ai pendii nell'area Irpina per mantenere la probabilità di innesco sismico di frane di tipo coerente nei limiti del 10% in 50 anni. I cerchietti bianchi e quelli neri marcano, rispettivamente, i siti in cui sono state attivate frane dal terremoto del 1980 o da terremoti precedenti. I cerchietti a metà bianchi e neri marcano siti dove il terremoto del 1980 ha riattivato frane già mobilizzate da precedenti terremoti (modificato da Del Gaudio et al., 2004).

successivi all'evento principale del 23 novembre. Anche per questo terremoto, infatti, sono state raccolte chiare evidenze che, verosimilmente per l'effetto combinato di modifiche nella permeabilità dei terreni e nella distribuzione degli stress tettonici, i flussi idrici all'interno degli acquiferi hanno subito, successivamente al terremoto, variazioni in tempi e per durate localmente variabili: ne sono esempi le variazioni di portata di importanti sorgenti di alimentazione dell'Acquedotto Pugliese quali la sorgente Sanità a Caposele e le sorgenti Bagno e Pollentina a Cassano Irpino, con considerevoli incrementi dei flussi d'acqua non riconducibili all'andamento delle precipitazioni meteoriche. È evidente che, in una vasta area attorno alle zone di rottura delle faglie del terremoto del 1980, simili variazioni idrologiche possono aver comportato localmente rapide variazioni nei livelli delle falde, con effetti destabilizzanti su pendii marginalmente stabili, riportando temporaneamente frane pre-esistenti al di sotto delle condizioni di equilibrio limite.

#### 4. SUSCETTIBILITÀ DEI PENDII NELL'APPENNINO MERIDIONALE

La ricorrenza di riattivazioni sismiche di frane pre-esistenti solleva anche la questione di come evolvano nel tempo, attorno alle sor-

genti sismiche dei ricorrenti terremoti irpini, le condizioni di equilibrio dei pendii e di come ciò si rifletta sulla suscettibilità dei suddetti pendii all'innesco di frane.

Alcune indicazioni a questo riguardo sono derivate da uno studio di Del Gaudio e Wasowski (2004) finalizzato ad applicare all'area irpina una metodologia di stima della pericolosità da frane sismo-indotte a scala regionale. La metodologia in questione si basa sul calcolo della "domanda di resistenza" alla franosità (calcolata sotto forma di accelerazione critica) che i pendii devono essere in grado di sostenere per contenere la probabilità di innesco sismico di frane entro una probabilità prefissata (per esempio, del 10% in 50 anni).

Trattandosi di un approccio a scala regionale, il calcolo viene realizzato ricorrendo a un modello semplificato che consente di ottenere, per aree estese, mappe della distribuzione spaziale delle accelerazioni critiche richieste dalle caratteristiche della sismicità perché nei pendii si mantenga al di sotto di una soglia prestabilita la probabilità di deformazioni permanenti sismo-indotte di entità tali da determinare il collasso dei pendii.

Il calcolo di una tale mappa per l'area dell'Irpinia ha evidenziato che, per contenere

il rischio di innesco sismico di frane di tipo coerente (slump, scivolamenti, colate) al di sotto di una probabilità del 10% in 50 anni, la domanda di resistenza richiesta ai pendii di questa regione non appare particolarmente elevata, essendo al massimo di poco superiore a 0.05 g (Fig. 10). Ciononostante, un'analisi di eventi storici ha evidenziato che l'area in questione è stata ripetutamente interessata da diffusi fenomeni di sismo-induzione di frane in concomitanza con diversi terremoti.

Una mappa come quella di Fig. 10 andrebbe incrociata con il calcolo della effettiva accelerazione critica dei pendii presenti localmente, per valutarne la suscettibilità ad essere destabilizzati da futuri eventi sismici. Essa ha, comunque, un significato probabilistico, e quindi il fatto che in un dato terremoto del passato si sia verificata l'attivazione di frane andrebbe analizzato tenendo conto della domanda di resistenza associata allo specifico evento.

Nello studio citato (Del Gaudio e Wasowski, 2004) un'analisi di questo tipo è stata condotta in maniera semplificata per una cinquantina di frane, per i quali lo scuotimento in occasione dei terremoti che le avevano innescate è stato stimato in termini di intensità



di Arias (Arias, 1970). Corrispondentemente, adottando un modello semplificato di relazione tra intensità di Arias e deformazioni del pendio (Jibson *et al.*, 2000), è stata calcolata l'accelerazione critica minima che avrebbe dovuto avere i pendii nei diversi siti per resistere alla sollecitazione sismica senza franare.

I risultati ottenuti mostrano che in circa un quarto dei siti analizzati la domanda di resistenza richiesta ai pendii al momento del terremoto era inferiore a 0.05 g. Il fatto che in tutti i siti considerati una frana sia stata effettivamente mobilizzata indica che l'effettiva "capacità di resistenza" dei pendii nei suddetti casi era inferiore a 0.05 g. Date le semplificazioni introdotte nella procedura, questo risultato ha più un significato statistico complessivo che un valore dimostrativo puntuale per i singoli casi evidenziati. Comunque, un'ulteriore conferma delle sue implicazioni è derivato da un esame dei pochi casi riportati in letteratura di pendii sottoposti ad azioni sismiche nell'area Irpina, per i quali sono state calcolate le accelerazioni critiche.

Nel sia pur limitato campione di esempi ricorrono diversi casi in cui l'accelerazione critica è risultata inferiore a 0.05g. Ciò avvalorava l'idea che nell'Appennino meridionale c'è una diffusa presenza di pendii marginalmente stabili che, in occasione di un forte terremoto, potrebbero dare origine all'innescamento di numerose frane in un ampio territorio. Il frequente verificarsi di riattivazioni di frane pre-esistenti indica che i pendii sembrano permanere in una condizione di prossimità all'equilibrio limite, in cui le alterazioni idrogeologiche indotte dai terremoti possono generare l'innescamento di frane, anche se le sollecitazioni meccaniche degli scuotimenti sismici non sono in grado di produrre direttamente il distacco della frana. In tal caso ci si può attendere che numerose frane si verifichino non al momento della scossa principale ma solo successivamente, con un ritardo di ore o giorni.

## CONCLUSIONI

In caso di terremoti di energia elevata (magnitudo > 6.5) è da attendersi l'innescamento di migliaia di frane in aree estese per migliaia di km<sup>2</sup>, il che determina scenari sismici in cui i fenomeni franosi possono condizionare pesantemente il quadro dei danneggiamenti e ostacolare gravemente gli interventi di gestione dell'emergenza.

È da sottolineare, a questo riguardo, che negli ultimi 80 anni l'Italia è stata colpita da un solo terremoto di questa scala di grandezza (quello del 1980), ma ciò rappresenta una fortunata anomalia: se esaminiamo la storia sismica degli ultimi 500 anni, per i

quali si può affidabilmente assumere la sussistenza di una completezza dei cataloghi sismici rispetto ad eventi di queste dimensioni, si rinvennero una ventina di terremoti di magnitudo > 6.5, cioè, in media, circa 4 al secolo e se si considerano i primi 30 anni del secolo scorso, ben quattro eventi hanno superato la suddetta soglia di grandezza. Ne consegue che per il futuro dobbiamo attenderci che eventi di questa scala si ripresenteranno con frequenze maggiori di quanto non sia accaduto negli ultimi decenni, sicché è di estrema importanza attrezzarci a fronteggiare adeguatamente future crisi sismiche.

L'insieme delle osservazioni riportate relativamente agli eventi irpini del 1930 e 1980 evidenzia che, rispetto a quanto osservato in altre aree del mondo, nell'Appennino meridionale la sismo-induzione di frane presenta delle peculiarità, per esempio la ripetuta riattivazione delle medesime frane in terremoti successivi, probabilmente legata ad un ruolo fondamentale giocato dalle alterazioni idrogeologiche generate dagli eventi sismici.

Per altro, una conseguenza rilevante di tale influenza è che le maggiori frane in pendii costituiti da terreni incoerenti si attivano con ritardi variabili (da ore a giorni) rispetto alla scossa principale, il che, se debitamente considerato nella gestione delle emergenze, fornisce un margine di intervento per la mitigazione delle conseguenze.

Il sia pur limitato dati relativi alla suscettibilità dei pendii all'innescamento sismico di frane nell'Appennino meridionale segnalano una probabile diffusa presenza di pendii marginalmente stabili che permangono in una condizione di prossimità all'equilibrio limite anche dopo il verificarsi di franamenti (il che spiega il fenomeno delle riattivazioni delle stesse frane in terremoti successivi). Ciò implica che esiste un'elevata probabilità che, in occasione di futuri forti terremoti, potranno verificarsi diffusi fenomeni franosi su aree estese, e ciò dovrebbe consigliare atteggiamenti di maggiore attenzione alla gestione del territorio e dei suoi rischi, nonché lo sviluppo di adeguati approcci di prevenzione degli effetti di futuri scenari sismici.

## BIBLIOGRAFIA

ARIAS A. (1970). *A measure of earthquake intensity*. In: Seismic Design for Nuclear Power Plants, R. J. Hansen (Editor), MIT Press, Cambridge Massachusetts, pp. 438-483.

BERNARD P., ZOLLO A. (1989). *The Irpina (Italy) 1980 earthquake: detailed Analysis of a complex normal faulting*. Journal of Geophysical Research, 94 (B2), 1631-1647.

BOSCHI E., GUIDOBONI E., FERRARI G., VALENSISE G., GASPERINI P. (1997). *Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1990*. Istituto Nazionale

di Geofisica, Roma – SGA, Storia Geofisica e Ambiente, Bologna, su CD ROM.

COTECCHIA V., DEL PRETE M., TAFUNI N. (1986). *Effects of earthquake of 23 November 1980 on pre-existing landslides in the Senerchia area (southern Italy)*. Geol. Appl. e Idrogeol., 21 (4), 177-198.

CPTI WORKING GROUP (2004). *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04)*, INGV, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/CP-TI04/>.

CRESPELLANI T., MADIAI C., MAUGERI M. (1996). *Analisi di stabilità di un pendio in condizioni sismiche e post-sismiche*. Rivista Italiana di Geotecnica, 1, 50-59.

DEL GAUDIO V., WASOWSKI J. (2004). *Time probabilistic evaluation of seismically-induced landslide hazard in Irpina (Southern Italy)*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24, 915-928.

ESPOSITO E., GARGIULO A., IACCARINO G., PORFIDO S. (1998). *Distribuzione dei fenomeni franosi riattivati dai terremoti dell'Appennino meridionale. censimento delle frane del terremoto del 1980*. Atti del Convegno "La prevenzione delle catastrofi idrogeologiche: il contributo della ricerca scientifica", Alba (CN), 5-6 novembre, 1996, 409-429.

ESPOSITO E., PECE R., PORFIDO S., TRANFAGLIA G. (2009). *Ground effects and hydrological changes in the Southern Apennines (Italy) in response to the 23 July 1930 earthquake (MS=6.7)*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, 539-550.

GIZZI F.T., MASINI N. (2004). *Damage scenario of the earthquake on 23 July 1930 in Melfi: the contribution of technical documentation*. Annals of Geophysics, 47 (5), 1641-1663.

HUTCHINSON J.N., DEL PRETE M. (1985). *Landslides at Calitri, southern Apennines, reactivated by the earthquake of 23rd November 1980*. Geologia Applicata e Idrogeologia, XX (1), 9-38.

JIBSON R.W., HARP E.L., MICHAEL J.A. (2000). *A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps*, Engineering Geology, 58, 271-289.

KEEFER D.K. (1984). *Landslides caused by earthquakes*. Geological Society of America Bulletin, 95, 406-421.

KEEFER D.K. (2002). *Investigating landslides caused by earthquakes – A historical review*. Surveys in Geophysics, 23 (6), 473-510.

MARTINO S., SCARASCIA MUGNOZZA G. (2005). *The role of the seismic trigger in the Calitri landslide (Italy): historical reconstruction and dynamic analysis*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25, 933-950.

PINO N. A., PALOMBO B., VENTURA G., PERNIOLA B., FERRARI G. (2008). *Waveform modeling of historical seismograms of the 1930 Irpina earthquake provides insight on "blind" faulting in Southern Apennines (Italy)*. Journal of Geophysical Research, 113, B05303, doi:10.1029/2007JB005211.

PORFIDO S., ESPOSITO E., VITTORI E., TRANFAGLIA G., MICHETTI A.M., BLUMETTI M., FERRELLI L., GUERRIERI L., SERVA L. (2002). *Areal distribution of ground effects induced by strong earthquakes in the southern Apennines (Italy)*, Surveys in Geophysics, 23 (6), 529-562.

WASOWSKI J., DEL GAUDIO V., PIERRI P., CAPOLONGO D. (2002). *Factors controlling seismic susceptibility of the Sele valley slopes: the case of the 1980 Irpina earthquake re-examined*. Surveys in Geophysics, 23 (6), 563-593.

# La prevenzione sismica in Italia dal terremoto campano-lucano del 1980 a oggi

SERGIO CASTENETTO  
Dipartimento della Protezione Civile - Ufficio  
Rischio Sismico e Vulcanico

GIUSEPPE NASO  
Dipartimento della Protezione Civile - Ufficio  
Rischio Sismico e Vulcanico

## PREMESSA

Il 23 novembre 1980, una domenica, alle ore 19 e 36, una scossa di magnitudo 6.9 colpisce una vasta area della Campania, della Basilicata e marginalmente della Puglia, con epicentro tra l'Irpinia e la Basilicata nord-occidentale.

L'intensità epicentrale viene stimata del X grado della scala Mercalli e in alcuni casi più alta, a causa di numerosi effetti locali legati alle caratteristiche dei terreni sui quali sono edificati i centri abitati e che amplificano lo scuotimento sismico.

Le conseguenze del sisma sono pesantissime: 2.734 le vittime, 8.848 i feriti e più di 400.000 i senzatetto. Oltre 300.000 le abitazioni distrutte o gravemente danneggiate e circa 500.000 quelle danneggiate. I comuni più colpiti risultano Sant'Angelo dei Lombardi, Lioni, Conza della Campania e Teora, tutti in provincia di Avellino. Le scosse sismiche innescano anche numerose frane, alcune delle quali molto estese, che arrecano danni in aggiunta a quelli già provocati dallo scuotimento; tra queste: le frane di Calitri, di Caposele, di Calabritto, di Senerchia.

L'Italia intera si mobilita come solo in poche altre occasioni è capitato nella storia della Repubblica.

Dal 1980 ad oggi molto si è fatto per la prevenzione sismica e molto resta ancora da fare. In questa nota, brevemente, si descrivono gli sviluppi scientifici e normativi registrati negli ultimi trent'anni in Italia nel campo della prevenzione sismica.

## LA PREVENZIONE DEL RISCHIO SISMICO PRIMA DEL 1980

Il terremoto del 23 novembre 1980 ha certamente segnato una svolta importante per il nostro Paese, sia dal punto di vista scientifico che normativo, portando l'attenzione su problemi troppo a lungo trascurati: la difesa del territorio dai terremoti, l'organizzazione di una efficiente struttura di protezione civile.

A che punto si era nel 1980 rispetto alla prevenzione del rischio sismico? Brevemente, ricordiamo che l'azione di prevenzione del rischio sismico si è avviata nel nostro Paese

dopo il terremoto del 28 dicembre 1908 di Reggio e Messina, attraverso la classificazione del territorio e l'applicazione di specifiche norme per le costruzioni nelle zone classificate.

La normativa riguardava, in sintesi, la scelta di siti idonei, l'utilizzo di materiali e l'adozione di tecniche di costruzione adeguate.

La classificazione del territorio è progredita nel tempo comprendendo i territori che progressivamente venivano interessati da eventi sismici. Nel 1927 vengono introdotte due categorie sismiche per distinguere le zone classificate sulla base del livello di danno. Siamo dunque ancora lontani dal concetto di pericolosità sismica basata sulla frequenza e intensità dei terremoti e lontani da una classificazione sismica che sia efficace strumento di prevenzione.

Nel 1980 il riferimento normativo è rappresentato dalla legge quadro n. 64/74, che attribuiva un ruolo importante al Ministero dei Lavori Pubblici e introduceva alcuni principi fondamentali, primo fra tutti che le norme devono garantire la salvaguardia della vita degli occupanti degli edifici che non devono crollare in caso di forti terremoti e subire solo danni lievi in occasione di quelli meno forti. Le norme tecniche vengono emanate con il DM del 3 marzo 1975 che stabiliva anche la nuova classificazione sismica, prevedendo due categorie alle quali veniva assegnato un grado di sismicità  $S$  pari a 9, per la 2ª categoria, e 12 per la 1ª categoria, da utilizzare nei calcoli dell'azione sismica di progetto.

Dopo l'evento, di fronte alla gravità della situazione, il "Progetto Finalizzato Geodinamica" del Consiglio Nazionale delle Ricerche, avviato nel 1976, elabora una proposta di classificazione sismica che, per la prima volta, considera, nell'attribuzione del grado di sismicità, la storia sismica dei territori comunali. La proposta, con alcune modifiche (è introdotta la 3ª categoria), viene adottata dal Ministero dei Lavori Pubblici che, attraverso appositi Decreti Ministeriali, tra il 1981 ed il 1984, attribuisce ai comuni italiani una delle 3 categorie nelle quali risulta suddiviso il territorio naziona-

le. Alla categoria sismica corrisponde una diversa severità delle norme che devono essere applicate per le costruzioni: massima in 1ª categoria. I Decreti Ministeriali classificano complessivamente 2.965 comuni italiani su di un totale di 8.102, corrispondenti al 45% della superficie del territorio nazionale, nella quale risiede il 40% della popolazione.

L'esperienza del terremoto irpino-lucano fa emergere, inoltre, la consapevolezza che i problemi attinenti la protezione civile non possono essere trattati nell'ambito di un settore specifico dell'Amministrazione Pubblica (allora il Ministero di competenza era il Ministero dell'Interno), ma sono problemi di ordine generale, che coinvolgono il Governo nella sua interezza, sia per quanto riguarda il necessario coordinamento delle attività, sia per l'assunzione di precise responsabilità di ordine politico.

Con il D.L. n. 57 del 22 febbraio 1982, convertito nella legge n.187/82, l'On. G. Zamberletti viene nominato Ministro per il Coordinamento della Protezione Civile che, nella sua attività, si avvale del Dipartimento della Protezione Civile (DPC), costituito presso la Presidenza del Consiglio dei Ministri con DPCM del 22 giugno 1982. Con la nascita del DPC, la protezione civile piuttosto che limitarsi ad organizzare i soccorsi nell'emergenza, avvia finalmente anche l'attività di previsione e prevenzione dei rischi. Inizia così il percorso che porterà nel 1992, con la legge n. 225, alla nascita del Sistema Nazionale della Protezione Civile.

## LA PREVENZIONE DEL RISCHIO SISMICO DOPO IL 1980

In questi 30 anni, a partire dal 1980, molte cose sono cambiate, anche a seguito di altri eventi, come quelli di Umbria e Marche nel 1997, del Molise nel 2002 e dell'aquilano nel 2009 che hanno introdotto ulteriori miglioramenti normativi e organizzativi.

## MONITORAGGIO

A pesare negativamente sulle vicende del terremoto irpino-lucano furono i ritardi delle prime ore nell'opera di soccorso, causati dalla gravità dell'evento, dall'im-

praticabilità delle strade, dall'assenza di una rete sismografica di sorveglianza del territorio, che consentisse la localizzazione certa dell'epicentro e quindi dell'area più colpita. I dati sismici venivano raccolti ed elaborati presso osservatori dove gli analisti, una volta interpretati i dati li inviavano via posta ordinaria presso la sede dell'Istituto Nazionale di Geofisica (ING) a Roma. Ciò naturalmente rendeva impossibile la determinazione dell'epicentro in tempi rapidi.

Dopo il 1980 venne avviata la realizzazione della rete sismica nazionale centralizzata, affidata all'ING. Nel 1981 sono già 36 le stazioni collegate via telefonica al centro di Monte Porzio Catone. Da allora la rete si è ampliata e conta oggi circa 280 stazioni digitali distribuite sul territorio e trasmesse al Centro Nazionale Terremoti dell'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, ex ING) a Roma. Il Centro assicura la sorveglianza sismica h24 fornendo al DPC, attraverso un collegamento internet riservato, le informazioni su tutti i terremoti registrati, aggiornate in tempo reale. Inoltre, a partire da valori di magnitudo  $\geq 3.0$ , viene comunicato alla Sala Situazioni Italia del DPC l'evento sismico anche via telefono entro due minuti dall'evento, attivando una complessa procedura di trasferimento di informazioni sempre più raffinate (telefono, e-mail, sms, fax e sito riservato), relative alle coordinate geografiche dell'epicentro, alla magnitudo ed alla profondità ipocentrale in chilometri. Dopo 30 minuti i dati sono considerati definitivi, ma sin dalla prima comunicazione vengono attivate le procedure interne di emergenza previste dal DPC.

Il Ministero dei Lavori Pubblici, in funzione di un miglioramento della normativa che considerasse una progettazione su base dinamica e non più statica, aveva sviluppato negli anni '70 del secolo scorso una rete accelerometrica remota che poi venne affidata all'ENEL. La Rete Accelerometrica Nazionale (RAN), acquisita in seguito dal DPC, è stata progressivamente potenziata con strumentazione digitale. Attualmente è costituita da 449 stazioni digitali equipaggiate con modem GSM/GPRS collegate al Centro di acquisizione RAN di Roma (dato aggiornato al 23 dicembre 2010).

Nell'ordinario, i dati accelerometrici sono utilizzati:

- In sismologia, per lo studio dei meccanismi di sorgente dei terremoti;
- In ingegneria sismica, per la produzione di spettri di riferimento per le varie aree sismiche, ai fini dell'adeguamento della progettazione edilizia ed infrastrutturale e del miglioramento della normativa,

basata su spettri di progetto reali e non prodotti da modelli matematici;

- In geologia tecnica, per indagini mirate a caratterizzare il comportamento dinamico dei terreni attraverso il confronto tra le registrazioni di stazioni poste su terreni con diverse caratteristiche litologiche.

Dopo un evento sismico, i dati accelerometrici sono utilizzati per valutare gli scuotimenti prodotti dal terremoto nelle località in cui sono installate le stazioni e per costruire gli scenari di danno, così da indirizzare meglio gli interventi di aiuto e soccorso alla popolazione.

Inoltre, in occasione di eventi sismici di magnitudo  $\geq 5.0$  il DPC, in coordinamento con l'INGV, è in grado di installare in tempi rapidi reti sismiche e accelerometriche mobili nell'area epicentrale, per una migliore definizione dei parametri che descrivono la sequenza sismica in atto.

#### CLASSIFICAZIONE SISMICA E NORMATIVA

Nel 2003, con l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274, sono stati predisposti i criteri di nuova classificazione sismica del territorio nazionale, basati sugli studi e le elaborazioni più recenti relative alla pericolosità sismica del territorio, ossia sull'analisi della probabilità che il territorio venga interessato in un certo intervallo di tempo (generalmente 50 anni) da un evento che superi una determinata soglia di intensità o magnitudo.

Il provvedimento ha dettato i principi generali sulla base dei quali le Regioni, a cui lo Stato ha delegato l'adozione della classificazione sismica del territorio (D.L. 112/98 e DPR 380/01 - "Testo Unico delle Norme per l'Edilizia"), hanno successivamente classificato il proprio territorio compilando l'elenco dei comuni con la relativa attribuzione ad una delle quattro zone, a pericolosità decrescente (zona 1, zona 2, zona 3, zona 4), nelle quali è stato riclassificato il territorio nazionale:

- zona 1 - è la zona più pericolosa, dove possono verificarsi forti terremoti;
- zona 2 - nei comuni inseriti in questa zona possono verificarsi terremoti abbastanza forti;

- zona 3 - i comuni interessati in questa zona possono essere soggetti a scuotimenti modesti;
- zona 4 - è la meno pericolosa; nei comuni inseriti in questa zona le possibilità di danni sismici sono basse.

Di fatto non esiste territorio "non classificato" e nelle zone meno pericolose (zona 4) è facoltà delle Regioni prescrivere l'obbligo della progettazione antisismica.

A ciascuna zona, inoltre, viene attribuito un valore dell'azione sismica utile per la progettazione, espresso in termini di accelerazione massima su roccia  $a_g$  (zona 1=0.35g, zona 2=0.25g, zona 3=0.15g, zona 4=0.05g).

Le novità introdotte con l'ordinanza sono state pienamente recepite e ulteriormente affinate, grazie anche agli studi svolti dai centri di competenza del DPC (INGV, Reluis, Eucentre). Un aggiornamento dello studio di pericolosità di riferimento nazionale previsto dall'OPCM 3274/03, è stato adottato con l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28 aprile 2006.

Il nuovo studio di pericolosità, allegato all'OPCM 3519/06, ha fornito alle Regioni uno strumento aggiornato per la classificazione del proprio territorio, introducendo degli intervalli di accelerazione ( $a_g$ ), con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni, da attribuire alle 4 zone sismiche (Tab. 1).

Nel rispetto degli indirizzi e criteri stabiliti a livello nazionale, alcune Regioni hanno classificato il territorio nelle quattro zone proposte, altre Regioni hanno classificato diversamente il proprio territorio, ad esempio adottando solo tre zone (zona 1, 2 e 3) e introducendo, in alcuni casi, delle sottozone per meglio adattare le norme alle caratteristiche di sismicità. Qualunque sia stata la scelta regionale, a ciascuna zona o sottozona è attribuito un valore di pericolosità di base, espressa in termini di accelerazione massima su suolo rigido ( $a_g$ ). Tale valore di pericolosità di base non ha però influenza sulla progettazione. Le attuali Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 14 gennaio 2008; NTC08), infatti, hanno modificato il ruolo che la classificazione sismica aveva ai fini progettuali. Per ciascuna zona precedentemente veniva fornito un valore

**Tabella 1 – Suddivisione delle zone sismiche in relazione all'accelerazione di picco su terreno rigido  $a_g$  (OPCM 3519/06).**

zona sismica	accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni ( $a_g$ )
1	$a_g > 0.25$
2	$0.15 < a_g \leq 0.25$
3	$0.05 < a_g \leq 0.15$
4	$a_g \leq 0.05$

di accelerazione di picco e quindi di spettro di risposta elastico da utilizzare per il calcolo delle azioni sismiche, dal 1 luglio 2009, con l'entrata in vigore delle NTC08, per ogni costruzione ci si deve riferire ad una accelerazione di riferimento "propria" individuata sulla base delle coordinate geografiche dell'area di progetto e in funzione della vita nominale dell'opera. Un valore di pericolosità di base, dunque, definito per ogni punto del territorio nazionale, su una maglia quadrata di 5 km di lato, indipendentemente dai confini amministrativi comunali (<http://esse1-gis.mi.ingv.it/>). La classificazione sismica (zona sismica di appartenenza del comune) rimane utile solo per la gestione della pianificazione e per il controllo del territorio da parte degli enti preposti (Regione, Genio Civile, ecc.).

#### PIANO NAZIONALE PER LA PREVENZIONE DEL RISCHIO SISMICO

Il 1° dicembre 2010 è stata pubblicata in Gazzetta Ufficiale supplemento ordinario n. 262 - l'Ordinanza n. 3907, che disciplina le procedure e modalità dei contributi per gli interventi di prevenzione del rischio sismico previsti dall'art.11 della legge 24 giugno 2009, n. 77. Questo dispositivo prevede un piano di finanziamento distribuito su 7 anni per:

- studi di microzonazione sismica;
- interventi di rafforzamento locale o miglioramento sismico o demolizione e ricostruzione di edifici ed opere pubbliche di interesse strategico per finalità di protezione civile. Sono esclusi dai contributi gli edifici scolastici, ad eccezione di quelli che ospitano funzioni strategiche e sono individuati nei piani di emergenza di protezione civile;
- interventi strutturali di rafforzamento locale o miglioramento sismico o di demolizione e ricostruzione di edifici privati;
- altri interventi urgenti e indifferibili per la mitigazione del rischio sismico, con particolare riferimento a situazioni di elevata vulnerabilità ed esposizione.

I finanziamenti riguardano interventi di prevenzione del rischio sismico nei Comuni in cui l'accelerazione al suolo  $a_g$  non sia inferiore a 0,125g.

#### LA MICROZONAZIONE SISMICA

Tra gli strumenti di prevenzione sismica che maggiormente possono incidere sulla salvaguardia delle persone e delle cose e che ha visto un significativo sviluppo e diffusione negli ultimi trent'anni, c'è sicuramente la microzonazione sismica (MS).

L'osservazione dei danni alle costruzioni e alle infrastrutture spesso evidenzia

differenze sostanziali anche a piccole distanze oppure crolli e danni notevoli anche a grandi distanze dall'epicentro. Esempi di questo tipo si sono riscontrati in quasi tutti i terremoti accaduti negli ultimi 100 anni. Sicuramente la qualità delle costruzioni può influire sulle differenze del danno, ma spesso le cause vanno ricercate in una differente pericolosità sismica locale, determinata da effetti di amplificazione del moto sismico o da instabilità del suolo. Tutto ciò è oggetto degli studi di MS, attraverso i quali è possibile individuare e caratterizzare le zone stabili, le zone stabili suscettibili di amplificazione locale e le zone soggette a instabilità, quali frane, rotture della superficie per faglie e liquefazioni dinamiche del terreno.

Gli studi di MS hanno l'obiettivo di razionalizzare la conoscenza, a scala di dettaglio, di quello che accade sul territorio in caso di evento sismico, restituendo informazioni utili per il governo del territorio, per la progettazione, per la pianificazione per l'emergenza e per la ricostruzione post sisma.

Nella pianificazione territoriale, in funzione delle varie scale e dei vari livelli di intervento, gli studi di MS sono condotti su quelle aree per le quali le condizioni normative consentono o prevedono l'uso a scopo edificatorio o per infrastrutture, o la loro potenziale trasformazione a tali fini, o prevedono l'uso ai fini di protezione civile.

Gli studi di MS sono di fondamentale importanza nella pianificazione al fine di:

- orientare la scelta di aree per nuovi insediamenti;
- definire gli interventi ammissibili in una data area;
- programmare le indagini e i livelli di approfondimento;
- stabilire orientamenti e modalità di intervento nelle aree urbanizzate;
- definire priorità di intervento.

Nella pianificazione d'emergenza sia di livello comunale che provinciale, gli studi di MS consentono una migliore e consapevole individuazione degli elementi strategici di un piano di emergenza ed in generale delle risorse di protezione civile.

La conoscenza dei possibili effetti locali indotti da un evento sismico su un territorio contribuisce a:

- scegliere aree e strutture di emergenza ed edifici strategici in zone stabili;
- individuare i tratti "critici" delle infrastrutture viarie e di servizio e le opere rilevanti, in caso di collasso, per le quali potrebbero essere necessarie specifiche valutazioni di sicurezza.

Nella fase della ricostruzione la MS contribuisce a:

- scegliere le aree per le abitazioni temporanee;
- fornisce elementi ai tecnici e amministratori, sull'opportunità di ricostruire gli edifici non agibili;
- contribuisce a scegliere nuove aree edificabili.

Nella progettazione di opere nuove o di interventi su opere esistenti, gli studi di MS evidenziano l'importanza di fenomeni quali le possibili amplificazioni dello scuotimento legate alle caratteristiche litostratigrafiche e morfologiche dell'area e dei fenomeni di instabilità e deformazione permanente attivati dal sisma. Gli studi di MS, quindi, possono offrire elementi conoscitivi utili per la progettazione di opere, con differente incisività in dipendenza del livello di approfondimento e delle caratteristiche delle opere stesse.

La realizzazione di uno studio di MS è uno strumento conoscitivo dalle diverse potenzialità, che ha costi differenziati in funzione del livello di approfondimento. Al momento di decidere l'esecuzione e il livello dello studio, occorre tener presente l'utilità che da esso può derivare, in modo da compararla con i costi da affrontare. Il miglioramento della conoscenza prodotto dagli studi di MS può contribuire concretamente, insieme a studi di vulnerabilità ed esposizione, all'ottimizzazione delle risorse rese disponibili per interventi mirati alla mitigazione del rischio sismico.

In funzione dei diversi contesti e dei diversi obiettivi gli studi di MS possono essere effettuati a vari livelli di approfondimento, con complessità ed impegno crescenti, passando dal livello 1 fino al livello 3:

- il livello 1 è un livello propedeutico ai veri e propri studi di MS, in quanto consiste in una raccolta di dati preesistenti, elaborati per suddividere il territorio in microzone qualitativamente omogenee;
- il livello 2 introduce l'elemento quantitativo associato alle zone omogenee, utilizzando ulteriori e mirate indagini, ove necessarie, e definisce una vera carta di MS;
- il livello 3 restituisce una carta di MS con approfondimenti su tematiche o aree particolari.

Le modalità tecniche di esecuzione e di applicazione della MS sul territorio italiano sono definite dagli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica" approvati recentemente dal DPC e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province autonome (Gruppo di lavoro MS, 2008).

#### BIBLIOGRAFIA

GRUPPO DI LAVORO MS (2008). *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*, 3 vol. e 1 dvd. DPC & conferenza delle regioni e province autonome. Roma.

# Il controllo delle grandi dighe in Italia. Procedure previste a seguito di eventi sismici

VITO SAVANELLA  
Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti  
Direzione Generale per le dighe e le infrastrutture  
idriche ed elettriche  
Ufficio tecnico per le dighe di Napoli

## LE GRANDI DIGHE IN ITALIA

Il quadro normativo in materia di vigilanza sulla progettazione, costruzione ed esercizio delle dighe, quale risulta dalle disposizioni introdotte con la legge n. 584/1994, prevede che tutti gli sbarramenti (siano essi dighe propriamente dette, vasche di laminazione delle piene o anche traverse fluviali) di altezza superiore a 15 metri ovvero con volume di invaso superiore a 1 milione di m<sup>3</sup> ricadano nelle competenze della *Direzione Generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti*. A tali sbarramenti è attribuita per legge la denominazione di "grandi dighe".

L'uso prevalente di questi importanti impianti italiani è di certo tuttora quello della produzione idroelettrica, con una percentuale prossima al 60% sulle 541 dighe presenti nel territorio nazionale, dopo il quale seguono, molto staccati e nell'ordine, l'utilizzo irriguo, quello potabile e l'industriale. Addirittura poi, in passato, quando all'inizio del secolo scorso la tecnica ha consentito lo svilupparsi delle costruzioni di sbarramenti fluviali, per più dell'80% delle dighe il principale scopo era idroelettrico e fino agli anni 1950/1960 gli altri utilizzi sono rimasti davvero secondari. È infatti soltanto a partire dagli anni 1980 che l'uso irriguo ha superato quello della produzione di energia come principale finalità delle nuove opere, pur essendosi contestualmente evidenziata una progressiva riduzione del numero complessivo di nuovi sbarramenti costruiti.

La distribuzione delle dighe italiane oggi risponde quindi a tutta la serie di complesse e variegate motivazioni, di ordine politico, economico e tecnico, dal loro variare in un arco di tempo trascorso di più di un secolo, ormai, il cui esame mi pare opportuno tralasciare in questa sede, ma il risultato delle quali è certamente sintetizzabile in una spiccata disuniformità distributiva e tipologica. Nelle regioni del Nord l'utilizzo di gran lunga prevalente resta quello idroelettrico, che in Val d'Aosta, in Veneto ed in Trentino Alto Adige rappresenta addirittura l'unica destinazione d'uso della risorsa. Al Sud e nelle Isole, viceversa, prevale per lo più l'utilizzazione a fini irrigui, anche se è singolare il caso della Sardegna dove si verifica un'equa distribuzione delle 55 grandi dighe presenti nelle sue province rispetto alla utilizzazione principale delle stesse: 10 dighe sarde sono infatti dedicate alla produzione idroelettrica, altre 18 all'irrigazione, ben 13 servono come accumulo di acqua che viene poi potabilizzata e le altre 14 servono l'industria.

Da notare poi anche come nel Nord prevalgano le dighe di tipo murario (a gravità ordinaria, in muratura ed in calcestruzzo), e come ciò sia facilmente correlabile con la presenza di valli profondamente incise, tipiche delle Alpi, che a suo tempo furono "chiusure" con imponenti sbarramenti impostati su terreni dalle ottime caratteristiche geomeccaniche (la diga del Vajont, purtroppo nota a tutti, è la più alta d'Italia con i suoi oltre 260 metri). Al

Sud la tipologia costruttiva prevalente risulta viceversa essere quella in materiali sciolti, che appare anche di certo globalmente meno impattante sul territorio, come dimostrato dalle valutazioni in proposito svolte per le più recenti approvazioni dei progetti.

## IL CONTROLLO DELLE GRANDI DIGHE

Nel rispetto della normativa vigente, il Concessionario di una grande diga deve sottoscrivere un documento fondamentale per la salvaguardia delle popolazioni e dei territori che si trovano a valle degli sbarramenti fluviali di competenza statale, documento denominato "*Foglio di Condizioni per l'Esercizio e la Manutenzione*" dell'impianto (per semplicità indicato nel seguito come *FCEM*). In tale documento, che viene poi diffuso a tutti gli Uffici competenti sulla sicurezza dell'impianto stesso, sono indicate le notizie più importanti riguardanti la diga (con i dati e i disegni principali concernenti anche l'intero serbatoio artificiale e le sue opere di scarico fino alla restituzione in alveo), quelle cioè ritenute utili per consentire al personale preposto alla vigilanza innanzitutto l'inquadramento immediato dell'opera sia a fini tecnici che amministrativi, poi l'esatta ubicazione di ogni parte da ispezionare, la descrizione dettagliata di tutti gli accessi presenti a partire dalla viabilità nei dintorni dell'impianto fino ad ogni singolo manufatto, ed infine le informazioni necessarie per il controllo di tutte le attività di monitoraggio strumentale previste,

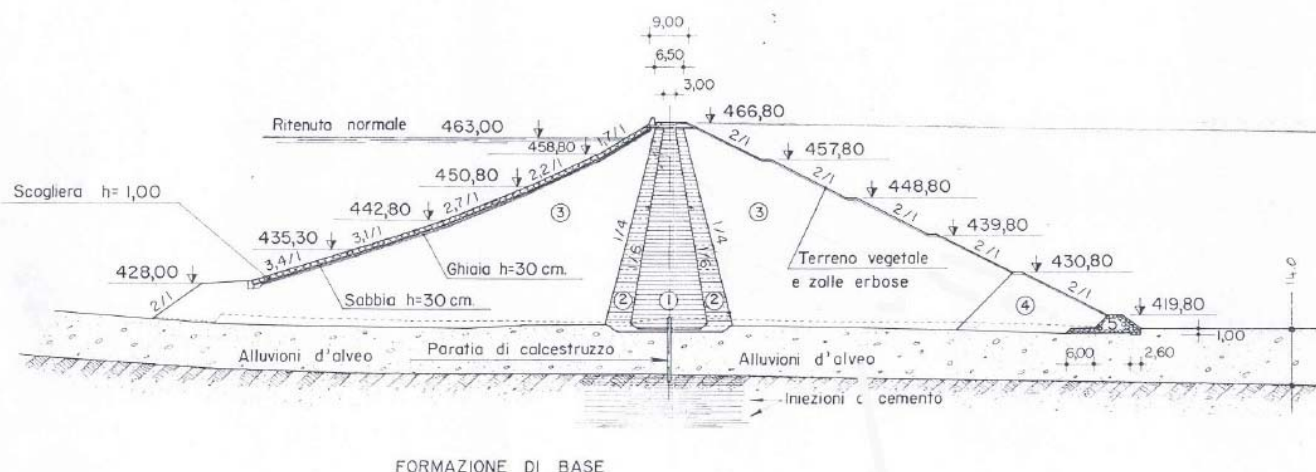


Figura 1 - Sezione tipo di una diga in terra zonata



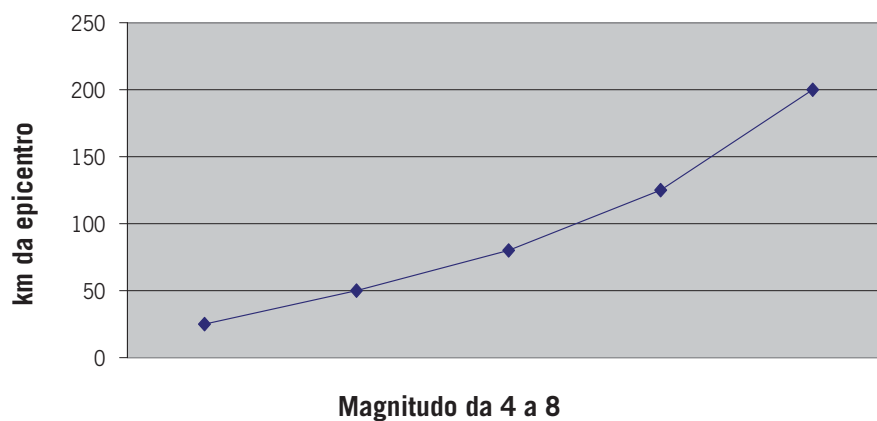
Figura 2 – Paramento di valle, coronamento ed invaso di una diga in terra

con i riferimenti ed i recapiti delle persone direttamente responsabili delle stesse.

Nel *FCEM*, come è logico che sia, sono anche specificati i controlli che lo stesso Concessionario è tenuto ad effettuare a seguito di eventi sismici che dovessero interessare lo sbarramento. È bene precisare subito che tali controlli vengono effettuati in totale autonomia da parte delle strutture tecniche di cui ogni Concessionario deve dotarsi per legge e che, solo successivamente, viene comunicato all'Organo di vigilanza l'esito degli stessi. Proprio per effetto di questa autonomia, peraltro indispensabile per consentire la rapidità dei sopralluoghi finalizzati alla prima valutazione degli effetti di un sisma, negli scorsi decenni si era verificata spesso una certa disuniformità dei controlli effettuati dai vari Concessionari, sempre senza peraltro che ci siano stati reali problemi di sicurezza a valle delle grandi dighe italiane. Tale disomogeneità, come era stato poi sempre possibile chiarire, era stata dovuta per lo più ad accertamenti che non avevano potuto subito privilegiare le verifiche di tipo tecnico-strutturale dell'opera, e ciò prevalentemente a causa dei comprensibili timori di ciascuno dopo un evento sismico significativo, e che erano stati finalizzati comunque e sempre alla salvaguardia della pubblica incolumità.

A valle di queste considerazioni, già quasi 10 anni fa, fu ritenuto opportuno da parte del Servizio Nazionale Dighe della Presidenza del Consiglio dei Ministri, allora competente sulla materia, di intervenire con delle indicazioni a cui dal 1° luglio 2002 ogni *FCEM* ha dovuto

### Controlli a seguito di sisma



Magnitudo M	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
Distanza R (km)	25	50	80	125	200

uniformarsi e gli esiti dei controlli, da allora, sono realmente divenuti più razionali ed efficienti. Si ritiene pertanto utile in questa sede soffermarsi su cosa tali indicazioni concretamente significhino per il Concessionario di una diga e su quali precise azioni dovranno quindi essere convogliati gli sforzi delle persone coinvolte nei controlli tecnici dopo che sia avvenuto un terremoto.

#### PROCEDURA RELATIVA AI CONTROLLI DA EFFETTUARE A SEGUITO DI SISMA (NOTA SND/PCM DEL 01.07.2002)

Le azioni inerziali cui una diga è assoggettata durante un terremoto dipendono dal picco massimo di accelerazione (PGA, Peak Ground Acceleration) nel sito in cui la diga è ubicata. A sua volta il PGA può essere

espresso, con sufficiente approssimazione, in funzione dell'intensità del terremoto (espressa in termini energetici dalla Magnitudo M dell'evento) e della distanza R tra la diga e l'epicentro del terremoto stesso. Ritenendo che l'insieme dei valori M-R nel seguito riportati (suggeriti dalla *International Commission on Large Dams*) possa fornire un'accettabile tabella di riferimento per il complesso problema delle modalità di attenuazione degli effetti di un sisma al crescere della distanza dal suo epicentro, si può fare riferimento alla curva che ne deriva per stabilire se effettuare o meno i controlli sugli sbarramenti fluviali di competenza statale e con che priorità.

I punti che ricadono al di sopra della curva corrispondono a valori di accelerazione per i quali è da ritenersi insignificante l'a-

zione inerziale indotta dal sisma sulle opere. Viceversa a punti posti al di sotto della curva possono corrispondere sollecitazioni di rilievo per l'integrità delle strutture e delle sponde. Ciò premesso, il Concessionario, a seguito di evento sismico, dovrà richiedere il valore di Magnitudo e la posizione dell'epicentro alle Autorità di Protezione Civile e quindi decidere di procedere, o meno, ai controlli seguenti di propria iniziativa, differenziandoli in funzione del campo di accelerazione al quale ciascuna diga è stata presumibilmente assoggettata:

- nell'ipotesi di bassi valori di Magnitudo e di distanze dall'epicentro elevate (parte al di sopra della curva sopra riportata) non si ritengono necessarie particolari verifiche, a meno che, per effetti locali, il sisma non sia stato comunque avvertito nel sito e quindi non debba considerarsi quindi ricadente nel punto successivo;
- nell'ipotesi di elevati valori di Magnitudo e di distanze modeste dall'epicentro (parte al di sotto della curva sopra riportata) il Concessionario è tenuto ad effettuare con immediatezza un sopralluogo finalizzato al controllo visivo di tutte le opere (struttura di sbarramento, scarichi superficiali e profondi, impianti di movimentazione delle paratoie, accessi e casa di guardia) e delle sponde del serbatoio. L'esito del sopralluogo dovrà essere comunicato, con ogni consentita urgenza, all'*Ufficio tecnico per le dighe del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti* competente per territorio da parte dell'Ingegnere Responsabile ai sensi della legge n. 584/1994, che evidenzierà gli eventuali provvedimenti resisi necessari a tutela della pubblica incolumità. In aggiunta dovranno essere effettuate tutte le misure essenziali per la sicurezza e redatta una Asseverazione Straordinaria da inviare all'Organo di controllo non appena possibile.

## IL CASO DEL TERREMOTO DEL 2009 IN ABRUZZO

Nei primi giorni del mese di aprile 2009, a L'Aquila vi sono state 3 scosse sismiche aventi una Magnitudo superiore a 5.0 che hanno provocato, come è noto, numerose vittime e notevoli danni alle strutture di tanti centri abruzzesi. Più in dettaglio, la prima delle 3, la scossa più forte caratterizzata da un valore della Magnitudo  $M$  pari a 5.8, si è verificata il 6 aprile 2009, la seconda di  $M = 5.3$  nella giornata successiva e la terza di  $M = 5.1$  il 9 aprile 2009, sempre nella stessa zona.

Applicando la procedura sopra richiamata è stato pertanto necessario, per i Concessionari delle dighe, verificare lo stato delle opere in un raggio di 75 km dall'epicentro del primo sisma e in raggi comunque superiori ai 50 km per i successivi due più forti. È peraltro noto

che, nei giorni a cavallo tra il mese di marzo 2009 ed aprile 2009, vi erano state numerose scosse di Magnitudo maggiore del valore soglia 4.0 e quindi, sempre in applicazione di quanto riportato in ciascun *FCEM* di ogni diga, vi era già stata la necessità di controllare varie volte alcuni sbarramenti coinvolti e particolarmente vicini alla fascia di territorio lungo la quale si andava sviluppando l'intero sciamone sismico.

Si vuole in questa sede far notare come peraltro già l'aver introdotto una soglia precisa per la quale diventa obbligatorio per i Concessionari di dighe procedere con i sopralluoghi entro un ben preciso raggio di distanza dall'epicentro, ha consentito di evitare tantissime inutili attivazioni di controlli speciali in migliaia di casi (nella zona de L'Aquila vi sono state più di 4mila scosse tra il 1° gennaio ed il 6 aprile 2009 aventi una Magnitudo maggiore di 2.0) e di concentrare viceversa le squadre di tecnici specializzati per i soli casi realmente importanti, che hanno potuto già da subito escludere danni ai serbatoi artificiali verificati.

Tornando in particolare alla sola scossa più forte del 6 aprile 2009, e quindi al raggio di 75 km dal suo epicentro, si evidenzia che ricadevano in tale area (di quasi 18mila km<sup>2</sup>) ben 23 grandi dighe, di cui 14 del solo più importante Concessionario italiano, l'ENEL. L'applicazione della procedura prevista per un numero così elevato di sbarramenti (pur senza considerare le scosse precedenti e le successive) ha reso necessaria una serie di consulti da parte dei Concessionari con il *Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti* e con il territorialmente competente *Ufficio tecnico per le dighe di Perugia* subito dopo i primi, autonomi, sopralluoghi previsti, per concordare la tempistica con la quale approfondire i rilievi strumentali per ogni diga ed inviare le previste Asseverazioni Straordinarie.

La particolarizzazione della tempistica da applicare su ogni diga per i controlli strumentali previsti è comunque necessaria quando le scosse oltre il valore 4.0 della Magnitudo sono numerose in un tempo ristretto e nella stessa zona, come appunto anche nel caso del 2009 a L'Aquila. Emerge infatti sempre la necessità di coordinamento tra le strutture tecniche operative dei Concessionari coinvolti e i tecnici, in primis geologi ed ingegneri, che lavorano presso la *Direzione Generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche*, al fine di garantire la rapida acquisizione dei principali dati utili per la determinazione dei provvedimenti da assumere, in base alle caratteristiche di ciascuna struttura di sbarramento ed al confronto con i numerosi dati strumentali sempre già disponibili negli Uffici competenti e relativi al continuo monitoraggio cui è sottoposta ogni grande diga italiana.

L'attività di controllo strumentale per le dighe coinvolte dal terremoto abruzzese del 2009 si è poi protratta nei mesi successivi, anche al variare dei livelli di invaso dei serbatoi, ed è ovviamente tuttora in corso secondo le indicazioni già previste nel *FCEM* di ciascuno sbarramento e le specifiche richieste integrative che l'Organo di controllo ha ritenuto di effettuare dopo il sisma.

## CONCLUSIONI

L'esistenza, l'evoluzione e la contestuale applicazione rigida di una normativa tecnica chiara nel campo delle dighe resta la garanzia principale per l'incolumità delle popolazioni che vivono nei territori a valle di queste grandi opere. E ciò nelle varie fasi della progettazione, della costruzione e della gestione di queste imponenti opere. Nei confronti delle verifiche da eseguire dopo ogni evento sismico ritenuto significativo secondo la procedura illustrata, la collaborazione tra Concessionari degli impianti ed Organo di controllo, nel rispetto del vigente *FCEM* di ciascuno sbarramento, resta la strada maestra da seguire affinché ogni possibile sforzo di analisi tecnica degli effetti prodotti sia speso effettivamente per incrementare i livelli di sicurezza dell'esercizio, con l'individuazione e la realizzazione in tempi certi degli eventuali interventi manutentivi alla diga che si fossero resi necessari.

È opportuno, per chiudere, evidenziare che comunque, allo stato, resta confermato l'elevato grado di sicurezza sismica delle dighe italiane alla luce di tutte le analisi effettuate sugli sbarramenti coinvolti anche da forti terremoti, comprese le più recenti disponibili per il caso de L'Aquila. Del resto nella letteratura tecnica è da tempo ampiamente documentata la notevole resistenza delle dighe alle azioni inerziali a cui esse risultano assoggettate durante un sisma già solo per la particolare impostazione che dal progetto al collaudo riguarda alla fine ogni tipologia costruttiva con la quale si realizza una grande diga, e che rende tali strutture effettivamente molto stabili. E ciò con riferimento alla scala planetaria, e quindi comprendendo anche il caso dei Paesi in via di sviluppo, nei quali non sempre è presente una valida normativa tecnica di riferimento. A livello statistico vale infatti la pena di ricordare che nel mondo i rari casi di rottura di sbarramenti fluviali sono da attribuire:

- per il 34% alla tracimazione in caso di piene eccezionali dei corsi d'acqua sbarrati;
- per il 30% ai dissesti in fondazione;
- per il 28% alla erosione interna di sbarramenti in materiali sciolti;
- per il solo 8% ad altre cause.

Ed è in questo 8% che è contenuta la modestissima aliquota di crisi di dighe dovuta ai terremoti.



Da sinistra G. Di Milia - A. Pitullo



Da sinistra G. Lena, G. Di Milia, A. Placido



Da sinistra M. Grotta, S. Valletta, M. Bentivenga



M. Schiattarella





V. Del Gaudio



G. Naso



Sede del Convegno presso la Comunità Montana Alta Irpinia



V. Savanella



S. Castenetto



# STUDI ED INTERVENTI PER IL RISANAMENTO DELLE CAVITÀ ANTROPICHE E NATURALI. ASPETTI GEOLOGICI, GEOTECNICI E SISMICI.

**Giovedì 9 Dicembre 2010**

Sala "Il Gattopardo" - Via F. Mercadante c.s. Altamura (BA)

ore 8.30 – 9.00 **Registrazione partecipanti e caffè di benvenuto**

ore 9.00 – 9.30 **Saluto delle Autorità**

Mario Stacca (Sindaco di Altamura) - Luigi Perrone (Presidente ANCI Puglia)  
Pepe (Gruppo Speleologica CARS, Altamura) - Donatangelo Squicciarini (Vice Presidente Centro Altamurano Ricerche Speleologiche) - Giuseppe Gisotti (Presidente Nazionale della SIGEA)

**INTERVENTI APERTURA LAVORI** - Salvatore Valletta (Presidente della SIGEA Sezione Puglia) - Onofrio Introna (Presidente del Consiglio regionale della Puglia)

ore 9.30 – 11.50 - **SESSIONE MATTINA**

moderatore Giuseppe Spilotro (Università della Basilicata)

- **La banca dati nazionale sui fenomeni di sprofondamento** - Stefania Nisio (ISPRA)
- **Pericolosità da sprofondamenti antropici e naturali nell'ambiente carsico della Regione Puglia** Antonio Fiore (Autorità di Bacino della Puglia) & Parise Mario (CNR-IRPI, Bari)
- **Rilievi speleologici speditivi e di precisione delle gallerie di cave in sotterraneo. Il Caso di Altamura (BA)** Vincenzo Martimucci (Federazione Speleologica Pugliese - FSP) & Pietro Pepe (Gruppo Speleologica CARS, Altamura)
- **Classificazione per la determinazione degli interventi di bonifica e consolidamento delle cavità antropiche in funzione del fattore di rischio. Il caso di Canosa di Puglia (BT)** - Sabino Germinario (Comune di Canosa di Puglia), Edmondo Martorella (Consulente) & Francesco Pastore (Collaboratore esterno)

ore 11.50 – 12.30 Discussione

ore 12.30 – 13.30 TAVOLA ROTONDA

**AMBIENTI IPOGEI: FRAGILITÀ DEL TERRITORIO DA RISANARE E RISORSE AMBIENTALI E CULTURALI DA VALORIZZARE**

moderatore Giovanni Calcagni (Presidente Ordine dei Geologi della Puglia)

Fabiano Amati (Assessore OO.PP. e Protezione Civile, Regione Puglia) - Claudio Berardi (Autorità di Bacino della Basilicata) - Angelo Corazza (Dipartimento Nazionale Protezione Civile) - Eugenio Di Loreto (Area Difesa del Suolo, Regione Lazio) - Giovanni Divella (Sindaco di Gravina in Puglia) - Antonio Rosario Di Santo (Segretario Generale Autorità di Bacino della Puglia) - Raffaele Nardone (Presidente Ordine dei Geologi della Basilicata) - Stefania Nisio (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) - Mario Stacca (Sindaco di Altamura) - Giuseppe Tedeschi (Dirigente Servizio Protezione Civile, Regione Puglia) - Giuseppe Venneri (Sindaco di Gallipoli) - Francesco Ventola (Sindaco di Canosa di Puglia)

ore 12.30 – 13.30 **SESSIONE POSTER**

13.30 – 14.30 Pausa Pranzo

ore 14.30 – 18.30 **SESSIONE POMERIGGIO**

moderatore Nicola Walsh (Università di Bari)

- **L'impatto della presenza di cavità nella progettazione e realizzazione di infrastrutture ed opere di ingegneria. Il Caso della regione Friuli** - Luca Zini & Cucchi Franco (Università di Trieste)
- **Monitoraggio integrato in aree a rischio di sinkhole: l'esempio di Camaiore in Toscana**  
Vincenzo Buchignani (Consulente), Michele Di Filippo (Università "La Sapienza", Roma), Davide Leva (LisaLab Srl), Salvatore Lombardi (Università "La Sapienza", Roma), Carlo Rivolta (LisaLab Srl) & Stefano Rizzo (Consulente)
- **Utilizzo di analisi numeriche per la valutazione della stabilità di cavità in sotterraneo: un percorso metodologico** Riccardo Castellanza, Claudio di Prisco & David Betti (Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano)
- **Studi ed interventi per la tutela di un patrimonio sotterraneo: l'esempio delle cavità di Napoli**  
Alessandro Flora (Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica e Ambientale (DIGA), Facoltà di Ingegneria - Università di Napoli Federico II)
- **Parametrizzazione e interventi di risanamento di cavità in area urbana. Il caso di Roma**  
Angelo Corazza (Dipartimento Nazionale Protezione Civile) & Maurizio Lanzini (SIGEA)
- **L'esperienza della Regione Lombardia nel risanamento di cavità antropiche**  
Adriana May (Dirigente Struttura Programmi Speciali Direzione Territorio e Urbanistica, Regione Lombardia)
- **Risposta sismica locale in aree con presenza di cavità. Casi di studio** - Tito Sanò (Consulente Dipartimento Nazionale Protezione Civile)

ore 18.30 – 19.30 **Discussione e chiusura lavori**

Giuseppe Spilotro (Università della Basilicata) - Giovanni Calcagni (Presidente Ordine dei Geologi della Puglia) - Nicola Walsh (Università di Bari)

**SEGRETERIA ORGANIZZATIVA**

**SIGEA Sezione Puglia:**

Annamaria Di Bartolo, Antonio Fiore, Pietro Blu Giandonato, Raffaele Lopez, Antonio Marte, Alfredo Pitullo, Donato Sollitto, Salvatore Valletta  
c/o Ordine dei Geologi della Puglia - Via Junipero Serra, 19 - 70125 Bari  
puglia@sigeaweb.it - www.puglia.sigeweb.it

**INIZIATIVA REALIZZATA CON IL CONTRIBUTO DI**



ApoGeo Soc. Coop. A RL  
Via Claudio Monteverdi, 1 - 70022 Altamura (BA)  
www.apogeo.biz

**Per il convegno sono stati richiesti 8 crediti ai fini dell'Aggiornamento Professionale Continuo per i Geologi (APC).  
Concesso l'esonero dall'obbligo di servizio per docenti pugliesi delle scuole secondarie.**

**MODALITÀ DI ADESIONE AL CONVEGNO**

L'adesione al convegno è gratuita e avverrà solo tramite scheda di preiscrizione scaricabile dal sito [www.puglia.sigeweb.it](http://www.puglia.sigeweb.it). La scheda dovrà essere inviata alla segreteria organizzativa esclusivamente tramite posta elettronica all'indirizzo [puglia@sigeweb.it](mailto:puglia@sigeweb.it), entro il 6 dicembre 2010.

**Atti del Convegno**

**Studi ed interventi  
per il risanamento delle cavità  
antropiche e naturali. Aspetti  
geologici, geotecnici e sismici**

**Altamura (BA), 9 dicembre 2010**

# Il database nazionale dei fenomeni di sinkhole

STEFANIA NISIO  
ISPRA – Dipartimento Difesa del Suolo – Servizio Geologico d'Italia

## INTRODUZIONE

**D**a alcuni anni sono stati condotti dal Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia (ISPRA) studi e ricerche riguardo i fenomeni di sprofondamento (sinkholes) che hanno interessato diverse aree del territorio nazionale.

Nel 2002 è stato avviato un progetto di ricerca a scala nazionale, il "Progetto sinkhole", che ha come obiettivo il censimento e lo studio delle varie tipologie di sprofondamento.

Il progetto Sinkhole è il primo tentativo di censimento dei sinkholes a scala nazionale, ed ha suscitato partecipazione da parte del mondo scientifico. Infatti, nel 2004 e nel 2009, in tale ambito, sono stati organizzati due workshop internazionali che hanno riscosso grande successo e partecipazione da parte di specialisti ed esperti del settore.

Sono stati, sinora, censiti e studiati dall'ISPRA più di 2000 casi di sprofondamento naturale (Fig. 1), avvenuti in aree di pianura, a cui si aggiungono alcune migliaia di sprofondamenti antropogenici avvenuti nei centri abitati e nelle grandi aree metropolitane.

Dei casi più significativi è stato possibile approfondire gli studi con indagini dirette mediante tecniche specifiche (indagini geognostiche, ispezioni subacquee, studi ed analisi idrogeologiche e geochimiche, indagini geofisiche, gas del suolo ed altro) al fine di raccogliere tutte le informazioni utili per giungere alla comprensione dei meccanismi genetici.

Tutti i dati raccolti sono stati inseriti in un database nazionale, consultabile sul web dell'ISPRA, in cui sono stati predisposti appositi ambienti di consultazione che sfruttano le attuali tecnologie Web-Gis.

La ricerca sull'argomento, tuttavia, è ancora all'inizio; permangono aperti molti problemi riguardo la genesi di alcune tipologie di sinkholes, l'evoluzione, l'innesco e propagazione dei fenomeni nonché il trasporto dei materiali.

I sinkholes naturali (*sinkhole senso stretto*) cioè voragini di forma sub-circolare, con diametro e profondità variabili da pochi metri a centinaia di metri, che si aprono rapidamente nei terreni, nell'arco di poche ore) si originano mediante processi non riconducibili



Figura 1 – Distribuzione dei sinkhole s.s. nel territorio italiano

alla sola gravità e/o alla dissoluzione carsica, ma a causa di una serie di fattori predisponenti ed innescanti (fenomeni di liquefazione, substrato carsificabile posto anche a notevole profondità, copertura costituita da terreni a granulometria variabile con caratteristiche geotecniche scadenti, presenza di lineamenti tettonici, faglie o fratture, risalita di fluidi mineralizzati, eventi sismici, eventi pluviometrici, attività antropica, ecc.).

In relazione ai suddetti fattori genetici e alle modalità di propagazione del fenomeno (dal basso verso l'alto all'interno dei terreni di copertura) questa tipologia di sprofondamento si contraddistingue dalle depressioni naturali di origine prettamente carsica (doline).

Tali fenomeni si verificano in aree di pianura al di sopra di elevati spessori di terreni di copertura. I sedimenti di copertura, sono, per lo più costituiti da alluvioni miste con al-

ternanze di intervalli a differente granulometria, e generalmente prossimi ai cento metri, a volte superano ampiamente tali valori. Le voragini nella maggior parte dei casi sono strettamente connesse a fenomeni di liquefazione (piping), a suffosione profonda, a oscillazioni della tavola d'acqua dovute a diverse cause (deep piping sinkhole). A tali tipologie si affiancano sinkholes di natura prettamente carsica (cave collapse sinkholes) che interessano substrati carbonatici o evaporitici.

Le fonti storiche ci confermano le voragini catastrofiche si verificavano anche in epoca romana, e con frequenza centennale hanno interessato le medesime aree, laddove i primi fenomeni erano stati oblitterati artificialmente o naturalmente.

Gli scenari morfologici in cui si originano le tipologie di sinkholes naturali sono: conche intramontane, valli alluvionali, pianure costiere; subordinatamente fasce pedemontane di raccordo con aree di pianura e piccole depressioni intracollinari.

Le aree suscettibili si concentrano sul medio versante tirrenico ed in particolare nelle regioni del Lazio, Abruzzo, Campania e Toscana. Il versante adriatico, a causa del proprio assetto geologico-strutturale, non ne è interessato, così come l'arco Alpino e le Dolomiti.

In Italia settentrionale (dove è in corso ancora il censimento) le condizioni sono differenti. Nelle pianure del Veneto ed in Emilia-Romagna, soprattutto in Pianura Padana alla confluenza del Po con l'Adige, sono presenti numerosi laghi di forma sub-circolare la cui formazione è imputabile a processi di evrosione (fenomeni erosivi legati a turbolenze ad asse verticale) a carico di corpi sedimentari caratterizzati da discreti spessori di materiali

sabbiosi e/o a processi di liquefazione e suffosione.

In Pianura Padana sono inoltre diffuse voragini di piccolo diametro e modesta profondità i cui meccanismi genetici di innesco sono ancora in fase di studio.

Nelle pianure e conche interne del Veneto, del Friuli, della Provincia Autonoma di Bolzano i fenomeni di sprofondamento sono strettamente controllati dalla dissoluzione di litotipi evaporitici e carbonatici che si rinvergono al di sotto di una copertura generalmente di modesto spessore, riconducibili pertanto a tipologie di cover-collapse sinkhole.

I fenomeni segnalati in Calabria, invece, sono riconducibili a piccole cavità, oggi ricolmate, di difficile ubicazione, originatesi nella totalità dei casi durante eventi sismici e connesse a fenomeni di liquefazione dei terreni.

Il contesto geologico appare sostanzialmente differente in Sicilia e in Puglia in cui i casi di sprofondamento sono condizionati dalla presenza di terreni evaporitici (gesso e sale) o calcarei e da coperture argillose o sabbiose di spessore più modesto.

In Puglia in particolare i processi carsici abbiano svolto un ruolo primario nella genesi ed evoluzione del paesaggio, pertanto i cave collapse sinkholes sono diffusi in tutta la regione, e, localmente, costituiscono i principali elementi del paesaggio. A tali fenomeni tuttavia si aggiungono molti sprofondamenti di origine antropica che coinvolgono grandi e piccoli centri urbani connessi alla estesa rete caveale realizzata al di sotto dell'edificio urbano.

I sinkholes antropogenici sono, invece, riconducibili a crolli di volte di cavità antro-

piche (cave, catacombe etc.) o a danni della rete fognaria e pertanto interessano prevalentemente i grandi centri urbani.

## I SINKHOLES NATURALI

I sinkholes naturali costituiscono elevato fattore di rischio nelle aree di pianura italiane per la scarsa prevedibilità e la rapida evoluzione che caratterizza la loro formazione; sono più diffusi di quanto originariamente si pensasse, si verificano sul nostro territorio da tempi storici, quando le cause ed i meccanismi genetici di innesco erano ancora sconosciuti.

In Italia soltanto da pochi decenni tali fenomeni sono oggetto di studi e presentano, pertanto, aspetti ancora poco conosciuti.

Dal punto di vista normativo, quasi tutti i Piani Stralcio per l'Assetto Idrogeologico adottati dalle Autorità di Bacino non prendono in considerazione, accanto alla pericolosità da frana e da alluvione, la pericolosità da sprofondamento, e solo due Regioni italiane (Lazio e Sardegna) ed alcune Autorità di Bacino hanno emanato norme specifiche che impongono studi e indagini nelle aree suscettibili a sprofondamenti.

Le voragini naturali presentano forma sub-circolare, con diametro e profondità variabili da pochi metri a centinaia di metri, interessano generalmente terreni di copertura posti al di sopra di bedrock in cui si è formata per varie cause una cavità, ospitano, nella maggior parte dei casi, uno specchio d'acqua.

I processi che li originano non sono riconducibili alla sola gravità e/o alla dissoluzione carsica, ma entrano in gioco una serie di cause predisponenti ed innescanti (Fig. 2). Lo studio dei meccanismi genetici ha permesso

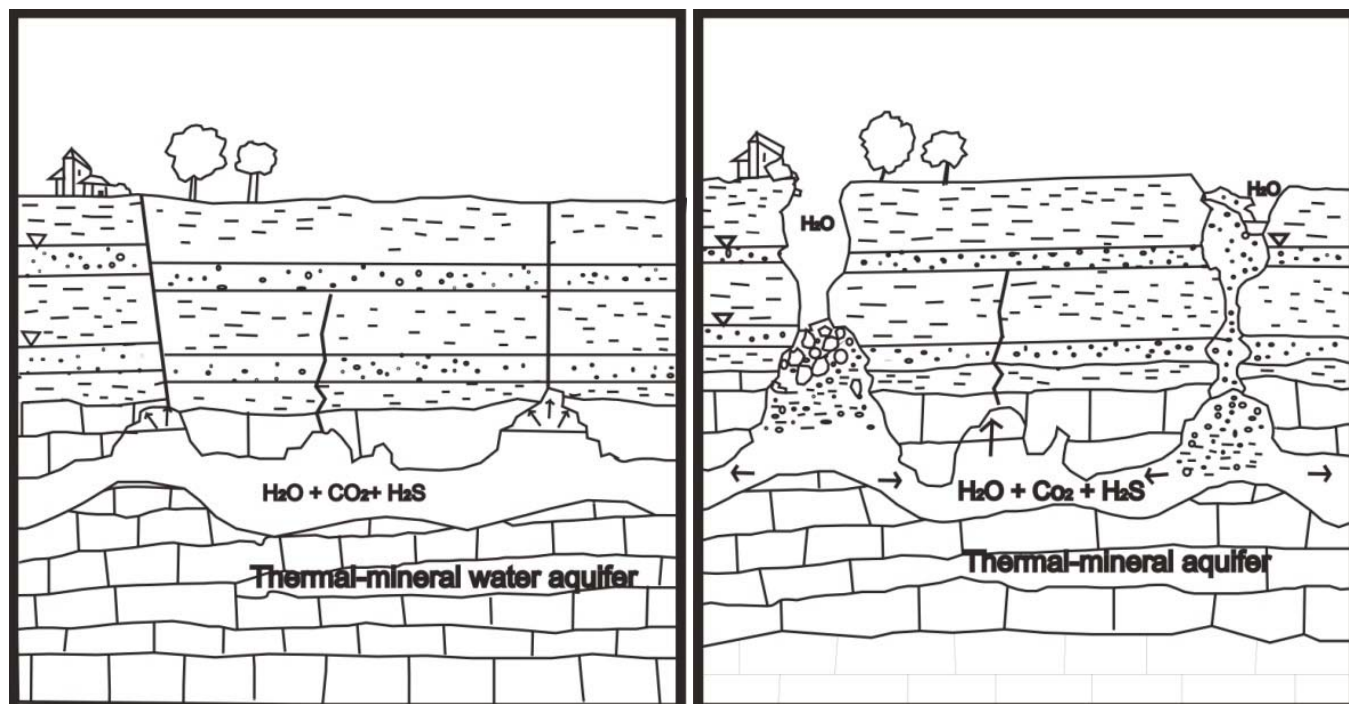


Figura 2 – Schema del processo di formazione di un sinkhole naturale

di realizzare una proposta di classificazione dei sinkholes in base alla casistica italiana (Fig. 3; Nisio & Salvati, 2004; Nisio, 2008).

Gli spessori dei sedimenti di copertura coinvolti dallo sprofondamento, per lo più costituiti da alluvioni miste con alternanze di intervalli a differente granulometria, sono generalmente di alcune decine di metri a volte prossimi ai cento metri, o superano ampiamente tali valori.

Molte aree suscettibili ai sinkholes sono ubicate in pianure con abbondante circolazione idrogeologica e nelle immediate vicinanze di sorgenti con portata di alcuni metri cubi caratterizzate da acque termo-minerali. Inoltre, in tali aree si registrano grandi quantità di  $CO_2$  e di  $H_2S$ .

Dallo studio di numerosi casi è emerso che il motore responsabile della formazione degli sprofondamenti è la presenza di una cavità all'interno del bedrock che progredisce verso l'alto attraverso un condotto cilindrico (*pipe*) mediante l'azione meccanica e dissolvvente di acque termo-minerali, in pressione che risalgono dal basso (NISIO, 2003; 2008; NISIO *et al.* 2005; CARAMANNA *et al.* 2007; Nisio 2008).

La cavità profonda, è ubicata, in un gran numero di casi censiti, all'interno di un basamento carbonatico. In molti altri casi, tuttavia, non si è riusciti a definire la profondità nonché la litologia ospitante un'eventuale cavità di origine.

Gli esempi migliori, di casi in cui la cavità è all'interno di un bedrock carbonatico, provengono dalla Toscana, in cui è diffusa la litologia del Calcare Cavernoso (breccia calcarea altamente carsificabile), altri casi dal Lazio, Abruzzo, Campania e dalla Liguria (NISIO, 2008).

Tuttavia, in alcuni casi la profondità del basamento carbonatico, al di sotto della copertura terrigena, è talmente elevata da risultare influente al fine del risentimento in superficie. In tale ambito si collocano i numerosi casi di sprofondamenti avvenuti in aree vulcaniche.

Alcuni esempi, in tal senso provengono dalla provincia di Roma, e sono quelli di Artena e Colleferro. In tali aree depressioni, di forma sub circolare con diametri compresi tra 75 m-160 m e con profondità comprese tra 15 e 40 m, si aprono all'interno di sedimenti piroclastici; il substrato sembra attestarsi a profondità superiori ai 150-200 m (NISIO, 2008).

Il caso del lago delle Corree in Campania, presso Vairano Scalo (Caserta), risulta tra quelli più didattici. Il lago (180 m di diametro), interpretato in passato come maar viene attualmente ascritto alle fenomenologie da sinkhole (DEL PRETE *et al.* 2004; NISIO, 2008), i sondaggi geognostici, spinti a 135 m

## SINKHOLE CLASSIFICATION

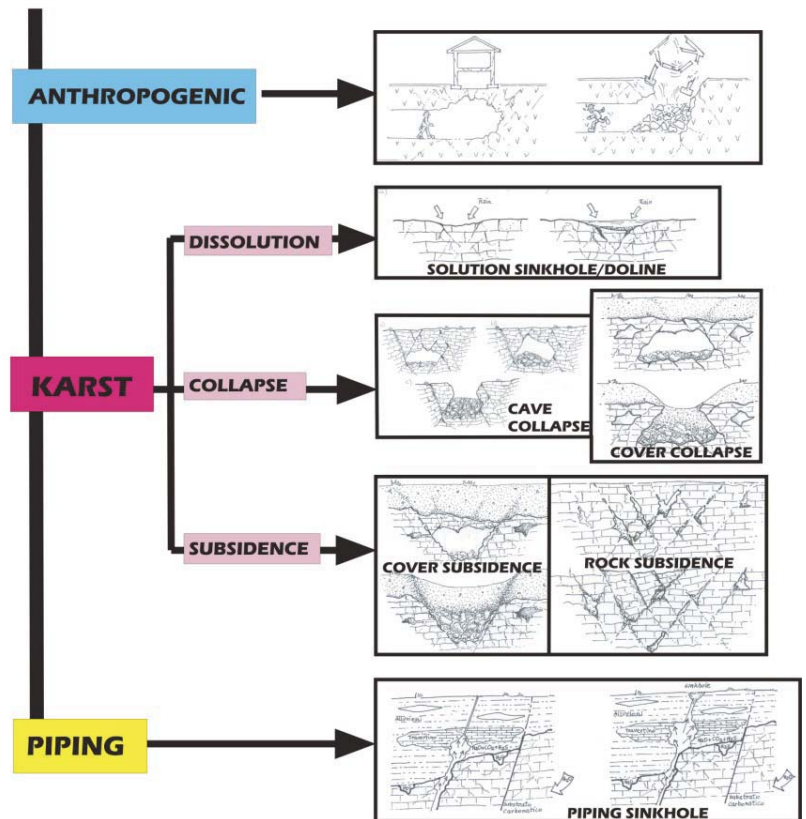


Figura 3 – Classificazione dei fenomeni di sinkhole

dal piano campagna incontrano piroclastici caratterizzate da differenti resistenze.

In provincia di Salerno è particolare, poi, il caso della Fossa di S. Vito, depressione sub-circolare con dimensioni di circa 200 m di diametro e 15 di profondità, ubicata nella piana del Fiume Sarno (presso l'abitato di Sarno) al di sopra di piroclastiti di scarsa e media consistenza (GUARINO & NISIO, 2007a; NISIO, 2008).

I terreni di copertura coinvolti negli sprofondamenti possono presentare caratteristiche molto diverse sia granulometriche che di plasticità. Anche le condizioni di addensamento possono variare e condizionare l'evoluzione del fenomeno. Le analisi svolte hanno mostrato che gli sprofondamenti hanno interessato terreni alluvionali, ma anche terreni piroclastici.

Tra i primi si passa dalle sabbie limose non plastiche ai limi argillosi di bassa o media plasticità, alle argille di alta plasticità, in uno stato di addensamento da medio ad elevato. I loro parametri geotecnici sono rappresentati da valori del peso di volume variabile tra 17 e 19  $kN/m^3$ , angolo di attrito in tensioni efficaci pari a 20-25° con coesione di 5-20  $kN/m^2$  per i terreni argillosi.

Per i terreni sabbiosi e limosi pur presentando pesi di volume dello stesso ordine di grandezza di quelli argillosi, hanno angoli di attrito superiori fino a 30°-33°, ma coesione da nulla a 10  $kN/m^2$ .

Tra i terreni piroclastici i fenomeni di sprofondamento hanno interessato quelli pozzolanici. In questo caso è lo stato di addensamento a condizionare fortemente i parametri di resistenza al taglio.

Non tutti gli Autori sono concordi nell'ipotizzare una connessione tra innesco di sinkholes e presenza di faglie/ fratture attraverso la copertura terrigena. Tuttavia molti Autori sottolineano, tra le cause innescanti, la correlazione con un evento sismico, verificatosi il giorno stesso o alcuni giorni prima e la formazione dello sprofondamento.

### I SINKHOLES ANTROPOGENICI

Nelle principali città italiane si registra un continuo aumento dei casi di sprofondamento dei suoli che originano voragini di dimensioni a volte considerevoli. Tale problematica, in passato ignorata, inizia a destare l'interesse dell'opinione pubblica e degli Enti locali.

Le voragini in genere coinvolgono le sedi stradali e le aree occupate da edifici civili, con formazione di ampie cavità caratterizzate da diametro e profondità variabili, da pochi metri ad alcune decine di metri.

In occasione degli eventi di sprofondamento sono stati registrati, spesso, incidenti che hanno coinvolto gli abitanti, causandone il ferimento o il decesso.

Gli sprofondamenti sono risultati principalmente di origine antropogenica (*anthropogenic sinkholes*), riconducibili, per lo più,

a crolli di volte di cavità artificiali, a scarsa o media profondità dal piano campagna. Subordinatamente tali voragini sono connesse a fenomeni di dilavamento dei terreni sciolti al di sotto del manto stradale, dovuti a problemi di inadeguatezza della rete dei sottoservizi o ad altre cause naturali (carsismo, liquefazione dei terreni etc.). Spesso le prime due cause si sommano (presenza di una cavità sotterranea e dilavamento diffuso dei terreni più superficiali).

La maggior parte degli eventi vengono registrati in concomitanza di eventi piovosi intensi, una scarsissima percentuale di essi, invece, è stata registrata in occasione di terremoti.

Gli sprofondamenti nei centri urbani interessano, prevalentemente, il crollo o il dilavamento di terreni di natura sedimentaria (sabbie e ghiaie) marini o continentali e vulcanoclastica (tufi e piroclastiti incoerenti).

Gli studi compiuti, sinora, dall'ISPRA hanno portato al censimento di alcune migliaia di casi di sprofondamento; il lavoro svolto è consistito in una prima fusione delle banche dati pubblicate (CATENACCI, 1992; Database Protezione Civile, 2004, Progetto AVI etc.), nella ricerca dei fenomeni sprofondamento avvenuti in passato e nella raccolta degli eventi di sprofondamento avvenuti negli ultimi anni. Tale lavoro ha portato all'individuazione dei centri abitati a maggior suscettibilità in tutto il territorio italiano.

Le grandi aree metropolitane maggiormente interessate dal fenomeno sono nell'ordine Roma (2400 fenomeni censiti, Fig. 4), Napoli (circa 400 fenomeni censiti) e Cagliari (alcune decine di fenomeni censiti), cui si aggiungono alcune città della Puglia e della Sicilia.

Per le città di Roma, Napoli e Cagliari le ricerche sono state compiute in maggior dettaglio; coinvolgendo gli Enti Locali, le Regioni, le Amministrazioni comunali, il Dipartimento di Protezione Civile e il CNR. Il lavoro ha portato alla realizzazione di cartografia di suscettibilità del territorio urbano.

L'analisi dei dati e delle segnalazioni raccolte nei principali centri urbani italiani consente di definire la coalescenza di alcuni fattori responsabili della formazione delle voragini, tra loro fortemente interagenti:

- l'esistenza di una complessa ed estesa rete di cavità sotterranee;
- caratteristiche e insufficienze del sistema di smaltimento fognario e delle acque di superficie;
- dissoluzione di rocce solubili per processi carsici;
- processi di liquefazione dei terreni.

Il ruolo di fattore di innesco è svolto principalmente dagli eventi meteorici intensi e/o prolungati.

Le voragini correlate alla presenza di cavità sotterranee, realizzate artificialmente,

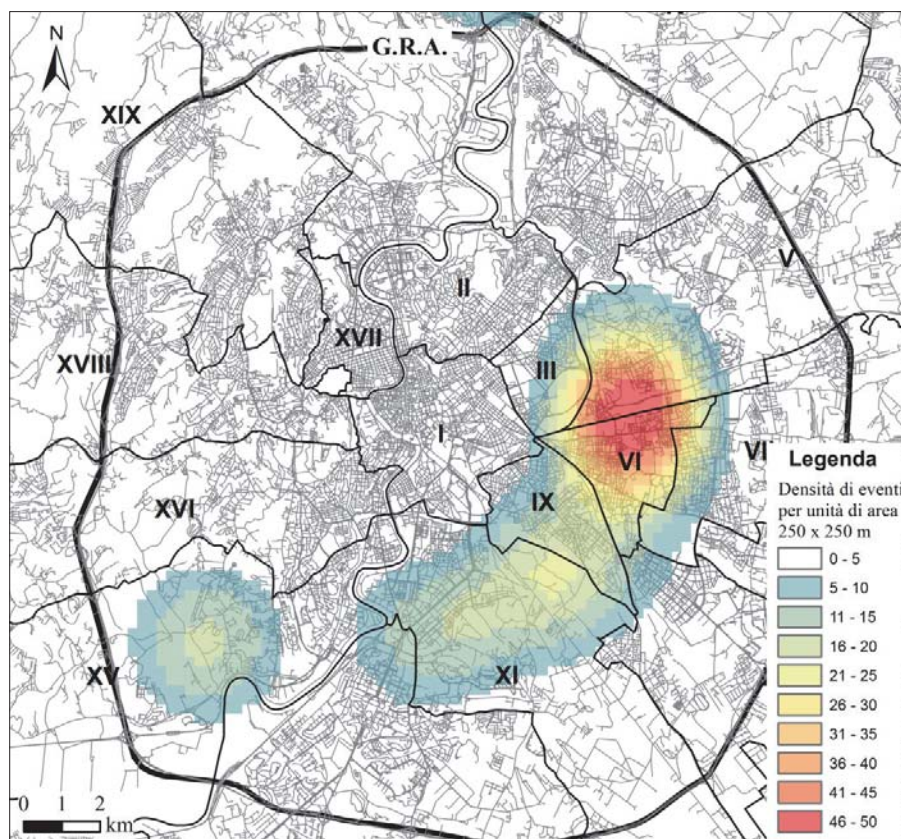


Figura 4 – Densità di eventi di sprofondamento nella città di Roma

sono dovute principalmente al collasso della volta, dei piedritti o dei pozzi di accesso, costituiti, a seconda degli scenari geologici, da terreni di media consistenza, di riporto e/o da litologie sedimentarie o vulcaniche.

La presenza di estese reti caveali, realizzate a vario titolo, caratterizza molte città italiane, costituendo, a volte, una città nascosta sotto la città. Non sempre con l'urbanizzazione si è proceduto alla bonifica di dette gallerie, né all'esatta ubicazione e mappatura delle stesse. Tuttavia, in seguito alla sensibilizzazione al fenomeno voragini, in alcune città si sta procedendo, finalmente, al censimento delle reti caveali antiche. Tale censimento, tuttavia, è ben lungi dall'essere completato. Sono ancora molte, ad esempio, le zone di Napoli o interi quartieri di Roma, che risultano ancora totalmente inesplorati e, molto probabilmente, interessati da sistemi di cunicoli e/o cisterne.

Altra causa ricorrente nella formazione delle voragini in città sono le perdite di acqua dalle condutture idrauliche.

L'infiltrazione delle acque meteoriche, soprattutto durante eventi piovosi intensi o eccezionali, infatti, o delle acque provenienti dai servizi a rete, sia pubbliche che private, determina spesso l'erosione ed asportazione dei terreni sciolti di copertura, con conseguente collasso dei suoli in superficie, con gravi danni al tessuto edificato.

Spesso le prime due cause (cavità e dilavamento dei terreni ad opera della rete dei sottoservizi) interagiscono tra loro. Difatti,

l'acqua infiltrandosi nei terreni, lungo le vie di minore resistenza (fratture, lesioni e discontinuità), raggiunge in qualche punto la rete delle cavità esistenti nel sottosuolo, iniziando così un processo erosivo che si sviluppa in senso regressivo rispetto alla direzione di scorrimento. Il processo risulta facilitato dalle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni porosi, leggeri e soprattutto dotati di coesione modesta che proprio a contatto con l'acqua riescono a disgregarsi facilmente. Quando il processo progredisce fino a raggiungere la superficie, la volta della cavità prodotta, si assottiglia gradualmente, fino a ridursi eccessivamente, e, senza alcun segno premonitore, si verifica uno sprofondamento.

I processi naturali quali il carsismo sono più rari in città e riguardano solo pochi centri abitati di grandi dimensioni che risultano ubicati su litologie facilmente solubili, mentre interessano piccoli centri urbani soprattutto del Friuli Venezia Giulia e del Lazio. Ancora più rari sono i processi di liquefazione.

Gli interventi sulle cavità sotterranee sono generalmente diretti alla messa in sicurezza dei pozzi, al riempimento delle cavità piccole e di modesto interesse storico o archeologico che presentano problemi statici e al recupero, con interventi di consolidamento, di cavità di maggiore interesse o di grandi dimensioni.

Per il consolidamento delle cavità di grandi dimensioni, per le quali si prevede un utilizzo, si fa, in genere, ricorso alle tecniche utilizzate normalmente per le gallerie: alla cerchiatura ed alla chiodatura dei pila-

stri e della volta, nonché all'individuazione delle migliori miscele per le sigillature delle lesioni.

### CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La ricerca sui *sinkholes naturali* e *antropogenici* in Italia ha permesso di censire migliaia di casi di sprofondamento distribuiti in alcune aree di pianura suscettibili, localizzate in varie regioni, ed in alcune città.

I *sinkholes naturali* si sviluppano prevalentemente nei contesti delle conche intramontane, o nelle grandi pianure (sia interne che costiere) e lungo i loro bordi. Un dato interessante scaturisce dall'esame dei terreni coinvolti: fatta eccezione per alcuni casi, soprattutto in Puglia ed in Sicilia (dove affiorano calcareniti), quasi tutte le fenomenologie censite hanno evidenziato la presenza di sedimenti fini alluvionali, o di piroclastiti rimaneggiate granulometricamente assimilabili a limi, limi sabbiosi e sabbie. Solo in pochi casi, gli sprofondamenti interessano travertini e depositi più grossolani di conoide.

Relativamente al substrato, esso è quasi sempre costituito da rocce carbonatiche, nella minoranza dei casi il substrato profondo è costituito da terreni ad alta componente argillosa, con bassi valori di permeabilità. Per quanto riguarda l'assetto idrogeologico delle aree suscettibili, la falda risulta spesso affiorante o sub-affiorante, come testimoniato dalla frequente formazione di laghi, talora perenni; tuttavia nelle diverse aree interessate dagli sprofondamenti, viene frequentemente segnalata la presenza di falde in pressione, multistrato. La maggior parte dei *sinkholes* si origina in sistemi termo-minerali confinati.

Il censimento dei *sinkholes naturali* nelle aree di pianura italiane ha permesso di effettuare alcune considerazioni riguardo la genesi di tali fenomeni, partendo dall'osservazione dei fattori causali geologici e geomorfologici che accomunano le aree studiate, e di realizzare una classificazione dei fenomeni italiani (NISIO, 2008). Rimangono, tuttavia, aperti ancora alcuni problemi legati alla presenza e allo sviluppo di eventuali cavità poste in profondità. La genesi dei vuoti o delle liquefazioni profonde rimane ancora controversa; in alcuni casi, i ricercatori tendono ad attribuire la formazione dei *sinkhole* alla risalita di fluidi dal substrato, lungo faglie attive. In altri casi, si tende, invece, ad escludere questa possibilità per la notevole profondità del substrato, pur ammettendo la possibilità di fenomeni di liquefazione da imputare a scosse sismiche o alla variazione del carico idraulico della falda.

Per quanto concerne i *sinkhole* antropogenici essi sono provocati dal crollo di cavità

antropiche presenti nel sottosuolo ovvero da disfunzioni della rete dei sottoservizi. Negli ultimi dieci anni si è assistito ad un aumento della frequenza dei casi di sprofondamento nelle grandi aree metropolitane sono esempio i casi di Roma e Napoli.

Gli sprofondamenti antropogenici risultano di norma connessi, soprattutto nelle grandi aree urbane, alla presenza di una estesa rete caveale o al dilavamento dei terreni di riporto dovuto, per lo più, al malfunzionamento della rete dei sottoservizi.

Le cavità sotterranee sono state realizzate, nelle grandi città, principalmente per ricavare materiali da costruzione a discapito di litologie vulcaniche. L'estrazione, infatti, delle rocce piroclastiche per l'edilizia è diffusa soprattutto nel Lazio ed in Campania; l'estrazione di inerti per i calcestruzzi, sabbie e ghiaie, o per vari altri usi, ha prevalso nel Lazio, in Abruzzo ed in Puglia. Rocce calcaree particolarmente tenere sono state estratte sin da tempi preistorici da cave in sottosuolo della Puglia, della Sicilia e della Lombardia. Altre grandi cavità nel sottosuolo sono state realizzate per l'estrazione di minerali (gessi, sale argento, pirite, oro ed altri metalli carbonacei), prevalentemente in Sicilia, Calabria, Lombardia, Trentino Alto Adige, Toscana, Sardegna. Inoltre, molte cavità sotterranee sono state realizzate per cisterne, serbatoi e cunicoli idraulici e per la costruzione di luoghi di culto sotterranei.

Non meno diffusa è risultata la pratica antica di realizzare grotte, utilizzate dapprima come rifugi di pastori e bestiame e, successivamente, come cantine e depositi (Abruzzo, Marche, Basilicata, Puglia e Lazio).

Di tali reti caveali, che costituiscono a volte città sotterranee sotto la città, si è persa memoria, ovvero non sono adeguatamente riportate su cartografia specifica; tuttavia esse sono ancora attive o sepolte da terreni di riporto facilmente asportabili per dilavamento.

La presenza di tali vuoti nel sottosuolo, ovviamente, facilita l'innescio di sprofondamenti di superficie che si perpetua in molti centri urbani da anni.

A tali episodi si aggiungono sprofondamenti connessi a fenomeni naturali di dissoluzione carsica particolarmente spinti in rocce evaporitiche o carbonatiche (particolarmente diffuse in Friuli Venezia Giulia, Sicilia e Puglia), nonché fenomeni di sprofondamento connessi alle perdite e ai malfunzionamenti della rete fognaria.

Inoltre, bisogna tener presente che il mancato controllo e la messa in sicurezza di tali cavità potrebbe amplificare gli effetti di eventuali sismi.

I database realizzati a livello nazionale in passato in Italia sono risultati inadeguati per le effettive realtà del fenomeno.

L'ISPRA, da alcuni anni, sta provvedendo all'integrazione, al censimento, alla verifica e alla fusione dei dati preesistenti. La ricerca di dettaglio è stata al momento completata per le tre città maggiormente interessate dal fenomeno: Roma, Napoli, Cagliari. I dati raccolti sono stati organizzati in un database, con GIS ad esso associato.

Nel territorio urbano della città di Roma, sino al raccordo anulare, sono stati censiti dalla fine del 1800 ad oggi da più di 2400 fenomeni di sprofondamento; è stata realizzata una carta di suscettibilità agli sprofondamenti da cui si evince che i quartieri a più elevato rischio sono il Prenestino, Tuscolano, Tiburtino e Appio, ubicati nella porzione orientale del territorio urbano. Sono stati censiti nel territorio del comune di Napoli oltre 400 fenomeni di sprofondamento, verificatisi tra il 1915 e il 2010. Alcune decine di voragini si sono aperte nella città di Cagliari.

Il lavoro di censimento e di ricostruzione delle reti di cavità sotterranee è ben lungi dall'essere concluso.

L'analisi dell'insieme dei dati raccolti potrà consentire di individuare alcuni elementi validi ai fini di una zonazione delle aree urbane in relazione alla suscettibilità ai fenomeni di sprofondamento improvviso.

### BIBLIOGRAFIA

- APAT (2004), *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"*.
- GUARINO P.M., NISIO S. (2007a), *Sinkholes in the Sarno Plain area*. First Sesto Forum italiano di Scienze della Terra. Vol. Abs.2, 244, Rimini 12-14 settembre, 2007.
- GUARINO P.M., NISIO S. (2007b), *Natural sinkhole phenomena in the Volturno Valley (CAMPANIA)*. First Sesto Forum italiano di Scienze della Terra. Vol. Abs.2, 244 Rimini 12-14 settembre, 2007.
- NISIO S. (2003), *I fenomeni di sprofondamento: stato delle conoscenze ed alcuni esempi in Italia Centrale*. Il Quaternario, 16 (1) 2003, 121-132.
- NISIO S. (2008), *I fenomeni naturali di sinkhole nelle aree di pianura italiane*. Mem. Descr. della Carta Geol. d'It. Vol. LXXXV; 475pp.
- NISIO S. (2010), *Atti 2° Workshop internazionale: I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato*. Roma 3-4 dicembre 2009. ISPRA.
- NISIO S., CARAMANNA G., CIOTOLI G. (2007), *Sinkholes hazard in Italy: first results on the inventory and analysis of some case studies*. In: Parise & Gunn (eds) *Natural and Anthropogenic Hazards in Karst areas: Recognition, Analysis and Mitigation*. Geological Society, London, Special Publications, 279, 23-45.
- NISIO S. & SALVATI R. (2004), *Fenomeni di sprofondamento catastrofico. Proposta di classificazione applicata alla casistica italiana*. 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", 573-584.



# Le cave sotterranee di Altamura. Fasi operative per la mappatura e per il supporto alle attività di bonifica

PIETRO PEPE  
Catasto Cavità Sotterranee Comune di Altamura  
Apogeo s.c.a r.l  
CARS (Centro Altamurano Ricerche Speleologiche)

NUNZIA PENTIMONE  
Apogeo s.c.a r.l  
CARS (Centro Altamurano Ricerche Speleologiche)

GIUDITTA GARZIANO  
Apogeo s.c.a r.l  
CARS (Centro Altamurano Ricerche Speleologiche)

MARIO PARISE  
CNR-IRPI, Bari

VINCENZO MARTIMUCCI  
Catasto Cavità Sotterranee Comune di Altamura  
CARS (Centro Altamurano Ricerche Speleologiche)

GIACOMINA LORUSSO  
Catasto Cavità Sotterranee Comune di Altamura

## RIASSUNTO

La presenza di cave sotterranee sotto aree urbanizzate comporta un'evidente situazione di rischio potenziale per le infrastrutture e abitazioni sovrastanti, che si manifesta sotto forma di sprofondamenti conseguenti a fenomeni di dissesto degli ambienti ipogei. Ad Altamura, dal 2006 si sono verificati numerosi casi di *sinkholes*, a seguito dei quali sono state avviate attività di esplorazione e rilievo speleologico, integrate da studi geologici e indagini geofisiche, in grado di fornire un importante supporto alle operazioni di bonifica attualmente in corso. Il presente contributo riassume brevemente tali operazioni, evidenziando il ruolo delle indagini speleologiche per la corretta conoscenza del territorio.

## ABSTRACT

Presence of underground quarries beneath built-up areas implies situations of potential risk for all the man-made infrastructures and constructions above. This risk generally becomes evident through formation of *sinkholes*, which represent the surface expression of instabilities occurring under-

ground. At Altamura, several *sinkholes* have been registered since 2006. As a consequence of these events, systematic explorations have been carried out by local cavers, aimed at mapping the underground quarries. These explorations have been integrated by geological and geophysical surveys; the overall amount of data so obtained represent crucial informations for the on going reclamation works. The present article briefly summarizes such activities, giving particular attention to the role played by the speleological surveys.

## 1. INTRODUZIONE

Le caratteristiche geologiche e morfologiche di gran parte del territorio pugliese si prestano particolarmente bene alla realizzazione di vari tipi di cavità artificiali. Tra queste, le cave sotterranee rappresentano indubbiamente la tipologia di cavità antropiche che pone i maggiori problemi dal punto di vista della pianificazione territoriale e della sicurezza a causa del notevole sviluppo lineare e delle modalità di realizzazione nonché dell'utilizzo stesso e della evoluzione successiva al termine dell'attività lavorativa. Numerosi

casi di sprofondamento sono, infatti, avvenuti negli ultimi anni in Puglia (Fiore & Parise, 2011) coinvolgendo vari settori del territorio e causando ingenti danni e problemi alle abitazioni e strutture direttamente interessate. In relazione a tali eventi, un recente studio (Barnaba *et al.*, 2010) ha inoltre evidenziato come le cave sotterranee costituiscano di gran lunga la tipologia a maggiore pericolosità in Puglia, essendo diffuse praticamente in tutto il territorio regionale (Calò *et al.*, 1992; Sannicola, 1997; Fiorito & Onorato, 2004; Bruno & Cherubini, 2005; Parise *et al.*, 2008, 2010; De Giovanni *et al.*, 2010; De Pascalis *et al.*, 2010; Parise, 2010, 2011).

Nel territorio altamurano sono stati riscoperti diversi sistemi di cavità sotterranee spesso a seguito dei fenomeni di sprofondamento in alcuni loro tratti. In occasione di tali fenomeni d'instabilità e sulla scorta delle informazioni acquisite *in itinere*, il Comune di Altamura è, finora, l'istituzione che ha avviato, con più attenzione, delle attività finalizzate al censimento e alla caratterizzazione delle cavità antropiche esistenti nel proprio territorio seguendo le norme appositamente predi-

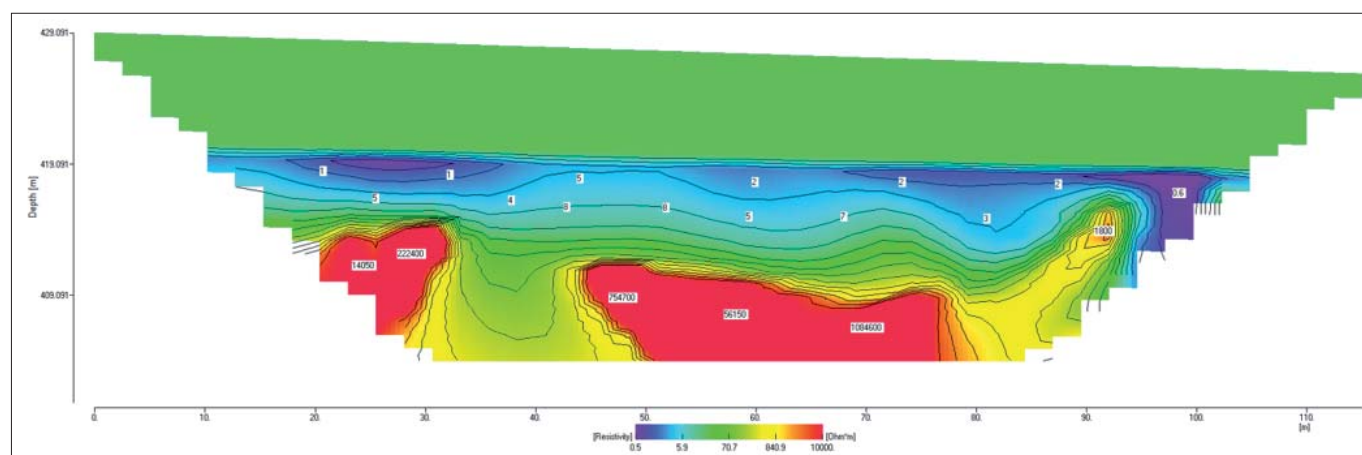


Figura 1 – Restituzione di una tomografia elettrica 2D eseguita con SYSCAL PRO R10 a 96 elettrodi. L'individuazione di anomalie di resistività positive (in rosso) a circa 27 metri di profondità invertendo i dati e assegnando valori costanti di resistività alla copertura argillosa al fine di ridurre i modelli equivalenti.

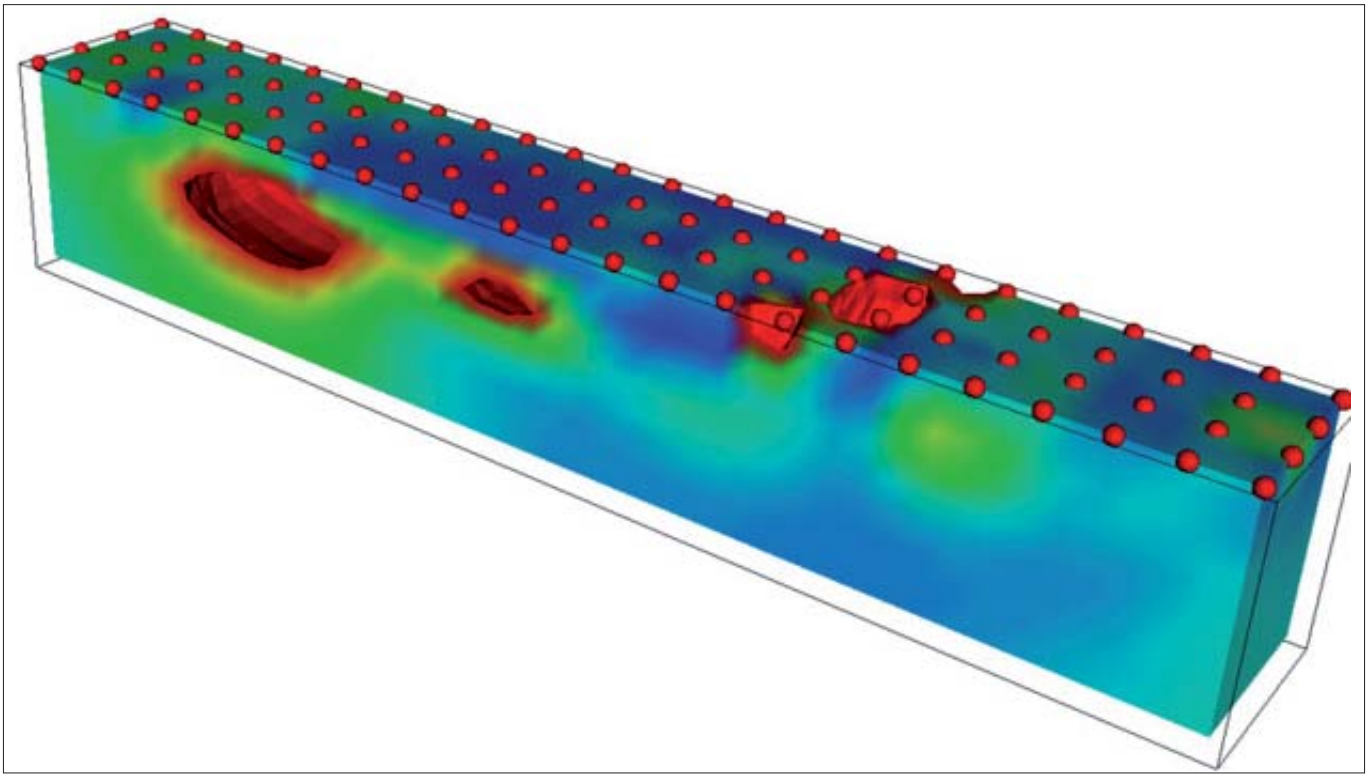


Figura 2 – Restituzione 3D di una tomografia acquisita con SYSCAL PRO R10 a 96 elettrodi ed elaborata con il software ERTLAB. Sono stati acquisiti circa 1500 dati con le configurazioni elettrode Polo-Dipolo, Dipolo-Dipolo e Wenner e le anomalie in rosso corrispondono a cavità di modeste dimensioni successivamente individuate mediante indagini dirette

Figura 3 – Prospezione sismica cross-hole eseguita prima e dopo la bonifica di una cavità; si nota come le velocità aumentino dopo la bonifica e la zona d'ombra dei raypath scompare dopo la bonifica

sposte dagli organismi competenti (Caggiano *et al.*, 2006/2007; Berardi *et al.*, 2009).

Il quadro conoscitivo della rete di cavità artificiali presenti nel Comune di Altamura, tra via Bari e Via Santeramo, è stato realizzato sulla base dei dati acquisiti con i rilievi speditivi effettuati dagli speleologi del Centro Altamurano Ricerche Speleologiche (CARS), ormai specialisti nel settore, ed è in continua evoluzione dal maggio del 2007, allorché una voragine si aprì in Via Barcellona. Fino a tale data si aveva una conoscenza sommaria della rete caveale, limitata soltanto a quei tratti aventi l'accesso dall'unica cava a cielo aperto non ancora del tutto colmata. Le altre, individuate dall'osservazione di vecchie foto aeree, sono state, infatti, riempite del tutto con inerti di edilizia o rocce da scavo a seguito dell'ampliamento urbanistico avvenuto a partire dagli anni 70.

Sulla base, quindi, dell'esperienza acquisita in questi ultimi anni e prima di avviare altre campagne d'indagini geognostiche, è stata realizzata una campagna di esplorazioni di tutti i sistemi sotterranei già noti per consentire una pianificazione degli interventi e delle indagini in funzione dei *target* da individuare. Esaurite le esplorazioni relative a sistemi di gallerie

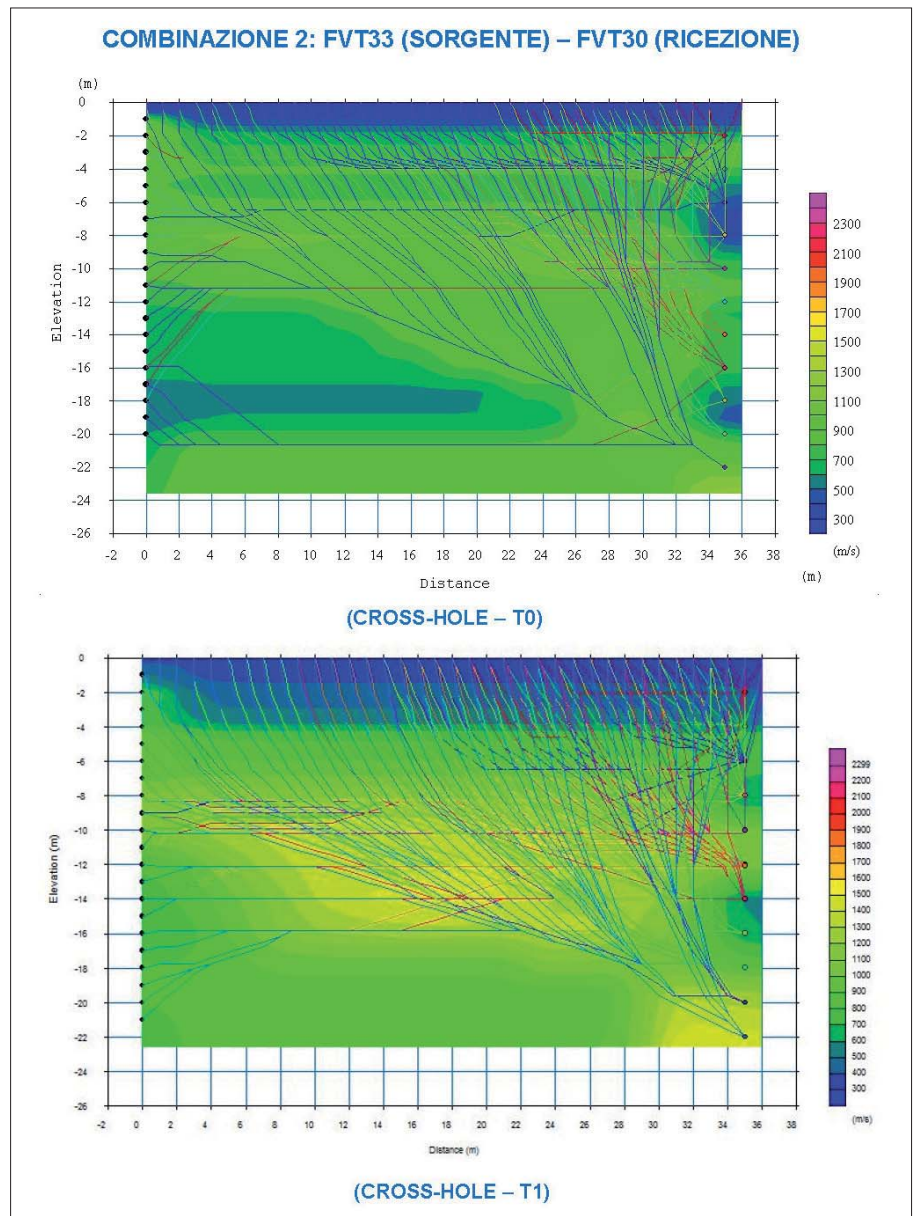




Figura 4 – Tracciamento del contorno delle cavità in superficie finalizzato all'ubicazione dei fori per l'iniezione della miscela



Figura 5 – Fase di rilievo speleologico con posizionamento mire



Figura 6 – Misure speleologiche con DISTO-X

aventi un accesso diretto dalle pareti della cava a cielo aperto, è stata affrontata una successiva problematica: individuare i tratti delle gallerie prive dell'originale accesso, raggiungerle fisicamente, rilevarle e renderne nota la loro posizione sulle cartografie ufficiali. È stata, in questo caso, avviata l'attività d'indagine geognostica con l'ausilio di metodi indiretti e diretti, con la finalità di realizzare altri punti di accesso verticali alle cavità e proseguire, così, con le esplorazioni e i rilievi speleologici (Martimucci *et al.*, 2010a). Questa procedura deriva dalla consapevolezza che nessun altro tipo di attività, come le indagini geognostiche con le

metodologie classiche, avrebbe consentito di ricostruire l'andamento reale delle cavità con una precisione tale da fornire un concreto supporto alle successive attività di progettazione della messa in sicurezza. Questo anche in virtù del fatto che gli Enti preposti all'attivazione di misure di salvaguardia non avrebbero potuto regolamentare l'uso futuro del territorio se privi di questo tipo di informazione.

## 2. I METODI GEOFISICI NEL CONTESTO GEOLOGICO DI ALTAMURA

La metodologia d'indagine adottata per la ricerca delle reti caveali sotterranee è da

ritenersi particolarmente complessa poiché l'interpretazione dei dati ottenuti con le indagini geofisiche - tomografie elettriche 2D e 3D, georadar e tomografie sismiche in foro - non è semplice a causa dell'assetto geologico locale e dell'intensa urbanizzazione delle aree da investigare. L'esperienza acquisita sul campo ha consentito di definire quelle che, a parere degli scriventi, sono le metodologie indirette più attendibili nel contesto in esame. In generale, data la profondità della rete caveale (quasi sempre superiore a 15 metri) e a causa della presenza di litotipi argillosi molto conduttivi sovrastanti le calcareniti, oggetto di



Figura 7 – Tracciamento delle cavità su aree non urbanizzate mediante picchettamento topografico



Figura 8 – Tracciamento delle cavità su strada mediante picchettamento topografico



Figura 9 – Accesso verticale su corda



Figura 10 – Sistema di discesa motorizzato – vista su piano campagna

estrazione, non sono state ottenute risposte attendibili con le metodologie georadar. Risultati migliori sono stati, invece, raggiunti mediante le tomografie elettriche, soprattutto utilizzando sistemi a 96 elettrodi con configurazioni elettrodiche 3D (Morelli e Fischanger, 2008). Tali metodi, comunque, richiedono ampi spazi non sempre disponibili, oltre a particolari attenzioni nel corso delle fasi di acquisizione dati su strade interessate dalla presenza di asfalto e riporti, o con sottoservizi. In mancanza degli spazi necessari, quindi, sono state realizzate tomografie sismiche in foro (Plotrefa module, Seisimager) utilizzando catene d'idrofoni con cui sono stati raggiunti risultati altrettanto soddisfacenti. Tale approccio metodologico, seppur più costoso (poiché richiede la realizzazione di fori opportunamente attrezzati) consente di avere informazioni di maggior dettaglio lungo le sezioni investigate; inoltre, esso risulta efficace per escludere la presenza di cavità non censite dopo le operazioni di bonifica.

La notevole mole di dati acquisiti sul territorio dimostra che le indagini geofisiche consentono di avere indicazioni sulla presenza di cavità, tuttavia è stata raggiunta la consapevolezza che spesso (anche a causa delle caratteristiche dell'ambiente in cui si opera) si ottengono falsi positivi o falsi negativi; per questo le indagini indirette non possono mai indicare con certezza l'assenza di cavità e comunque non possono fornire tutti gli elementi necessari ad una progettazione definitiva ed esecutiva degli interventi di messa in sicurezza. Esse sono invece importanti per raccogliere informazioni su aree estese e, se incrociate con altri dati, possono essere determinanti in fase di supporto alle decisioni.

### 3. IL RILIEVO SPELEOLOGICO E IL SUPPORTO ALLE ATTIVITÀ DI BONIFICA

A seguito degli esiti della campagna di indagini indirette si è potuto procedere alla individuazione di nuovi punti di accesso alla rete caveale per proseguire con le attività di rilievo

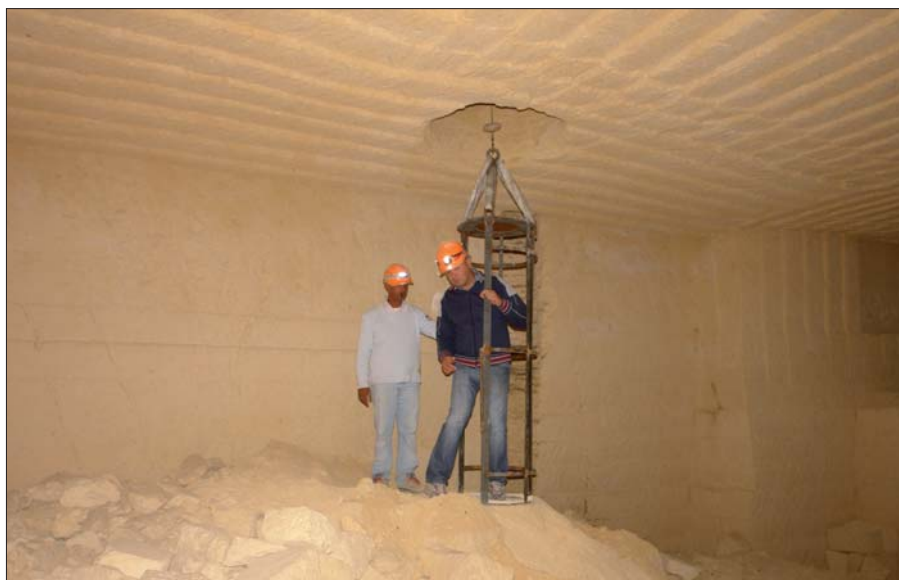


Figura 11 – Sistema di discesa motorizzato – vista in sotterraneo

speleologico. In generale, dove gli spazi l'hanno consentito, si è operato con una trivella per pali in grado di eseguire fori di grande diametro proprio per permettere una rapida apertura degli accessi, opportunamente rivestiti a garanzia della sicurezza degli speleologi, per la verifica immediata sulla possibilità di avviare i rilievi in sotterraneo (Martimucci *et al.*, 2010a). L'attendibilità dei rilievi speleologici ha permesso di riportare non solo le dimensioni e la posizione georeferita dell'intero sistema caveale ma anche la descrizione dello stato di fratturazione delle pareti e delle volte delle cavità. Infatti, all'attività di rilievo è stata sistematizzata una costante attività di documentazione fotografica, anch'essa georeferita e catalogata in funzione dei tempi di acquisizione. Quest'ultimo elemento è indispensabile poiché rappresenta la memoria dell'evoluzione del fenomeno e la testimonianza per quelle cavità poi destinate alla demolizione o al riempimento.

In un contesto così complesso l'attività di supporto in campo rappresenta un elemento rilevante per il buon esito delle operazioni e per l'acquisizione di documentazione delle attività in sotterraneo e non può che essere eseguita da specialisti (geologi-speleologi) che forniscano tutte le informazioni per la gestione di un cantiere complesso anche nel rispetto delle misure di sicurezza.

Particolare attenzione si sta ponendo nelle attività di controllo e monitoraggio. Laddove le condizioni operative lo consentono, si sta procedendo a misure geofisiche prima e dopo la bonifica. Vengono eseguite tomografie elettriche 3D con la metodologia *time-lapse* e misure di Vs30 prima e dopo l'intervento di bonifica. Inoltre, per escludere la presenza di cavità non bonificate, nelle aree d'intervento si procede anche con misure tomografiche del tipo cross-hole.

La mole di dati e informazioni acquisite richiede necessariamente una gestione in

ambiente GIS. Sulla scorta delle pregresse attività e degli studi condotti dall'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IRPI), è stato avviato un progetto di ricerca che vede Apogeo come soggetto attivo finalizzato allo sviluppo di strumenti personalizzati in ambiente GIS sulla pericolosità da *sinkholes*. Il progetto è inserito nell'ambito dell'attività di ricerca promossa dalla Regione Puglia con l'iniziativa di Ritorno al Futuro (Avviso 19/2009) e prevede un censimento generale dei fenomeni di *sinkholes* e un approfondimento nel territorio comunale di Altamura grazie alla mole d'informazioni già georeferite ma non inserite in un sistema di gestione unico che tenga conto dell'assetto geologico originario, della distribuzione della rete caveale e dell'interferenza con l'urbanizzazione, sia presente che in corso di realizzazione.

#### 4. L'IMPORTANZA DELLA SPELEOLOGIA NELLA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE

Le attività di rilievo eseguite nel Comune di Altamura sono state determinanti nelle seguenti fasi di pianificazione e di controllo sull'uso del territorio:

- la vincolistica posta dall'Autorità di Bacino della Basilicata sul territorio ha tenuto conto delle esplorazioni speleologiche;
- il Vice-Presidente del CARS fa parte del Nucleo di Coordinamento Tecnico del Comune di Altamura, istituito in adempimento all'art. 33 delle Norme di Attuazione del Piano di Assetto Idrogeologico dell'Autorità di Bacino della Basilicata;
- la poligonale dei rilievi speleologici ha consentito, insieme ai dati geognostici, di realizzare il Catasto delle Cavità Sotterranee istituito presso il Comune di Altamura sempre in adempimento alle Norme di Attuazione del Piano di Assetto Idrogeologico dell'Autorità di Bacino della



Figure 12-14 – Controlli durante il riempimento

Basilicata, disponibile in rete all'indirizzo [www.adb.basilicata.it](http://www.adb.basilicata.it).

- la poligonale dei rilievi speleologici intersecata con l'uso del territorio ha consentito di classificare le aree urbanizzate come classe di rischio alto (R4) nell'aggiornamento del Piano di Assetto Idrogeologico 2010;
- le esplorazioni e i monitoraggi in sede esecutiva hanno consentito di ottenere informazioni importanti durante le attività di bonifica, oltre a fornire la documentazione necessaria per testimoniare le attività eseguite.

Questo tipo di approccio evita correlazioni, spesso fantasiose, fra le anomalie geofisiche riscontrate e l'effettiva presenza di cavità, e permette inoltre di intercettare in modo puntuale la rete caveale, consentendo una pianificazione degli interventi. I metodi di rilievo e di restituzione dei dati hanno subito, per giunta, un'evoluzione nell'ultimo triennio. La restituzione dei dati a supporto degli addetti ai lavori (professionisti ed imprese) è diversa dalla semplice rappresentazione grafica. In sede esecutiva è, infatti, necessario avere informazioni precise per operare su aree urbanizzate con tutte le interferenze che questa determina (presenza di sottoservizi, abitazioni, fondazioni profonde ecc.). Per tali motivi i rilievi in sotterraneo devono essere associati a una precisa rete topografica materializzata in superficie.



Figura 15 – Realizzazione di sbarramento mediante conci di calcarenite



Figura 16 – Realizzazione di sbarramento mediante cono detritici – fase iniziale



Figura 17 – Realizzazione di sbarramento mediante cono detritici – completamento

Le metodologie acquisite e messe in campo dal CARS e da Apogeo in occasione delle attività connesse alle cave sotterranee di Altamura sono state poi applicate anche ad altri contesti di rilievi speleologici.

Recentemente, ad esempio, il CARS ha avviato una nuova campagna esplorativa e di rilievo della Grotta di Lamalunga in cui furono rinvenuti i resti dell'Uomo di Altamura (Pesce Delfino & Vacca, 1993; Vacca, 1999). In questo caso le operazioni di rilievo sono molto più complesse di quelle all'interno delle cave di calcarenite. Gli ambienti, infatti, sono molto più irregolari ed esiste una esigenza di preservarli che non ha permesso di materializzare mire sulle pareti della grotta (Martimucci *et al.*, 2010b). Allo stesso tempo, va evidenziato che le finalità dei rilievi nelle cave e quelle nella Grotta di Lamalunga sono molto differenti: le cave di calcarenite sono state rilevate per fornire l'elemento principale per la valutazione del rischio di crollo e per avviare le attività di messa in sicurezza che generalmente consistono nel riempimento o nella demolizione delle volte. Per questo motivo, proprio per poter operare e intercettare le cavità mediante la terebrazione di fori per il riempimento è necessario avere un elevato dettaglio planimetrico e creare in superficie numerosi punti di coordinate note che vanno a costituire i riferimenti di controllo dei rilievi. Le attività in corso presso la Grotta di Lamalunga fanno invece parte di un progetto di studio finalizzato alla tutela e conservazione dell'ambiente ipogeo e di ciò che esso contiene, e i rilievi servono anche a far conoscere al pubblico questa eccezionale risorsa. Inoltre, nel caso delle cave di calcarenite di Altamura è stato implementato un sistema di rilievo e rappresentazione atto a rendere fruibile i dati sia ai tecnici coinvolti sia agli addetti ai lavori. Pertanto è stata data maggiore importanza ad alcune informazioni rispetto ad altre. La restituzione planimetrica dei contorni e il loro tracciamento in superficie rappresenta l'elemento finale che consente le operazioni di cantiere: conoscere la posizione esatta di una strettoia consente, ad esempio, di scegliere i punti ottimali per gli sbarramenti.

## 5. CONCLUSIONI

L'esperienza acquisita negli ultimi anni sulle cave sotterranee di Altamura si pone certamente come esempio da seguire per quanto riguarda le varie fasi di conoscenza, di acquisizione, di elaborazione, di gestione dati, e della relativa implementazione ed utilizzo nelle fasi di progettazione e realizzazione di interventi di bonifica. Va inoltre evidenziato come l'accurata cartografazione degli ambienti caveali sotterranei, nonché dei dissesti in essi eventualmente osservati, costituisce la base conoscitiva essenziale per l'implementazione di codici di calcolo numerico fina-

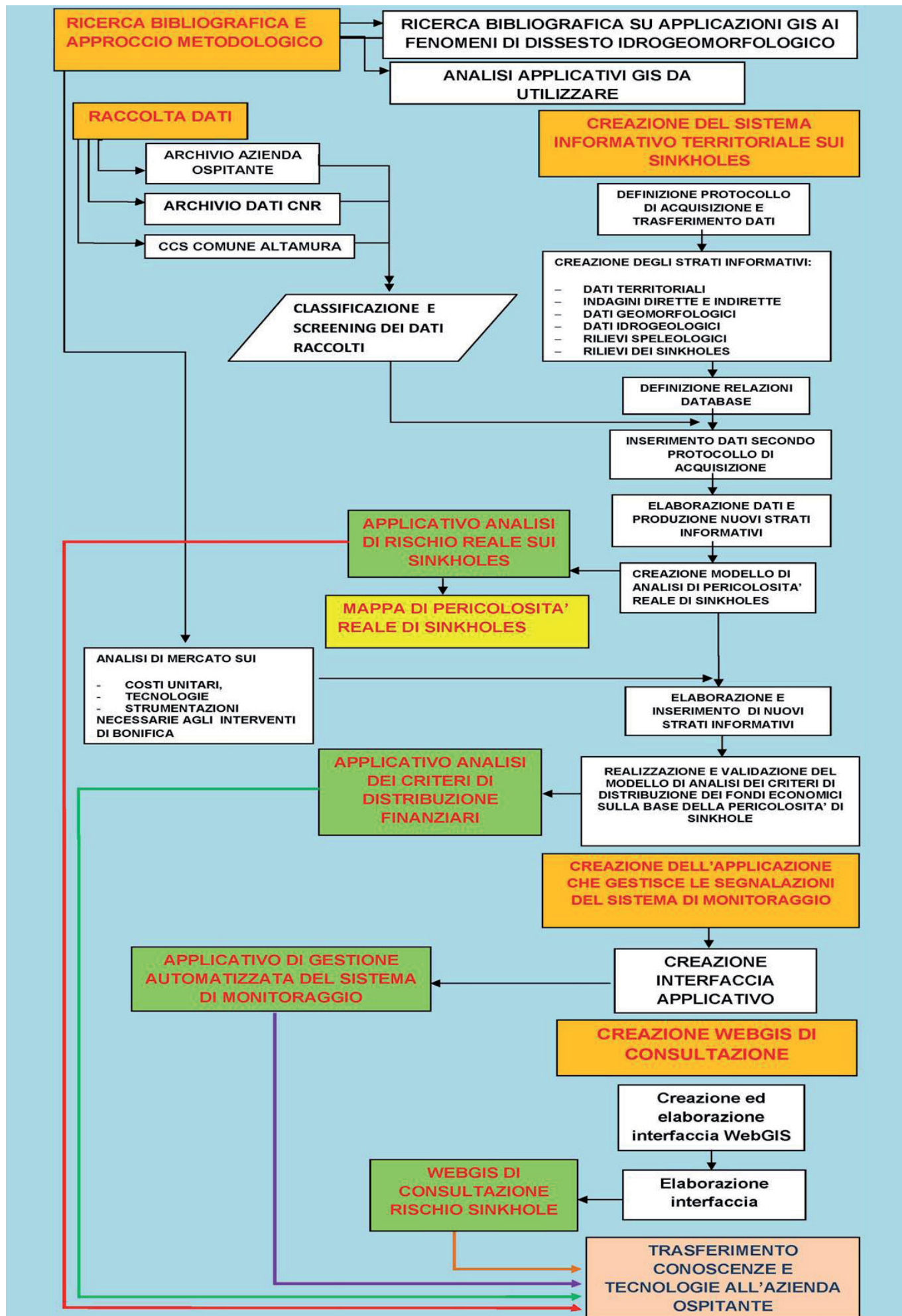


Figura 18 – Diagramma di flusso dell'attività prevista nel progetto di ricerca di Ritorno al Futuro

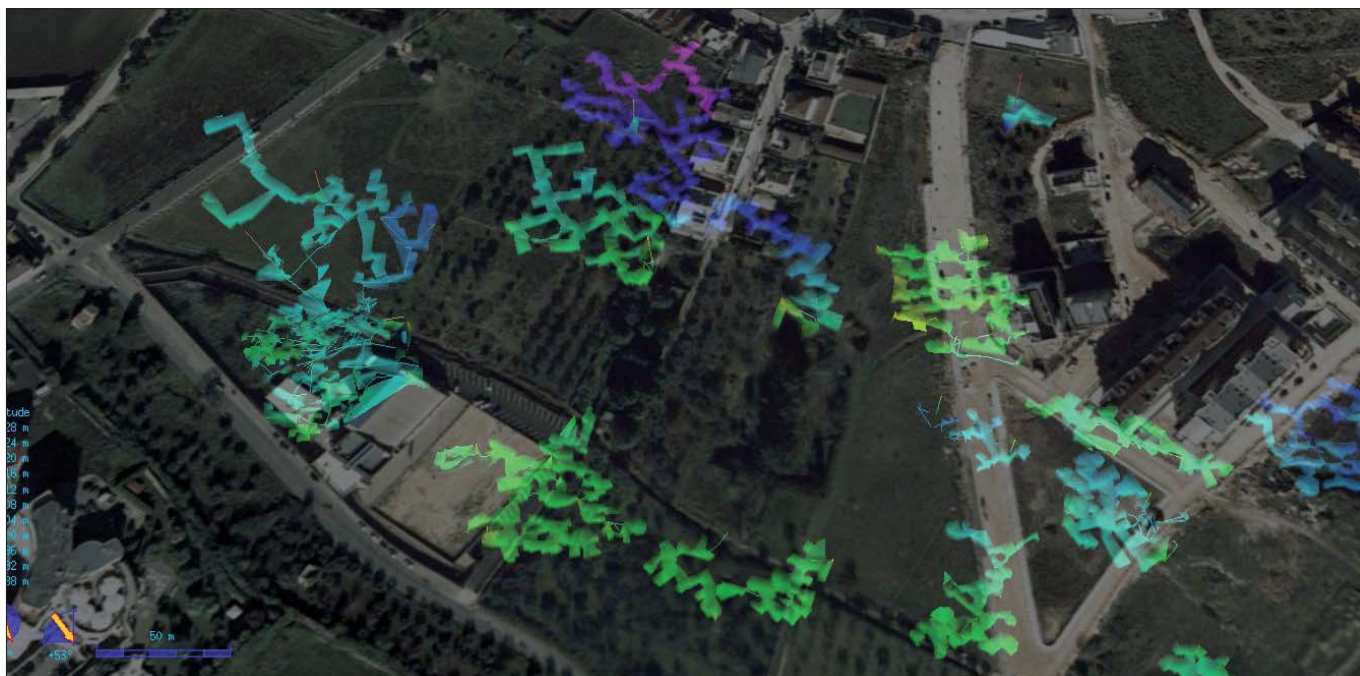


Figura 19 – Rappresentazione 3D delle cave su ortofoto (Vista 3D prodotta con THERION)

lizzati alla valutazione della suscettibilità da sinkhole connessi a cavità sotterranee, come mostrato in recenti lavori (Lollino & Parise, 2010; Parise & Lollino, 2011).

Data la numerosa e diffusa presenza di cave sotterranee in Puglia, al pari di molte altre regioni dell'Italia centro-meridionale (Parise *et al.*, 2010), l'approccio seguito, derivante da un'attenta integrazione di esperienze, con un ruolo fondamentale svolto dall'attività speleologica, può costituire un esempio da esportare anche in contesti diversi da quello di Altamura.

#### RINGRAZIAMENTI

- Comune di Altamura
- Edil Project Simone s.r.l. - Corso Federico di Svevia 112 - Altamura
- Apogeo s.r.l. - Via Caduti di Nassiriya 170, 70022 Altamura (BA)
- CARS – Centro Altamurano Ricerche Speleologiche
- Federazione Speleologica Pugliese

#### BIBLIOGRAFIA

- BARNABA F., CAGGIANO T., CASTORANI A., DELLE ROSE M., DI SANTO A.R., DRAGONE V., FIORE A., LIMONI P.P., PARISE M., SANTALOAIA F. (2010). *Sprofondamenti connessi a cavità antropiche nella regione Puglia*. Atti 2° Workshop Internazionale "I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato", Roma, 3-4 dicembre 2009, p. 653-672.
- BERARDI C., CAGGIANO T., FIORE A. (2009). *Pericolosità geomorfologica da sprofondamenti. L'attività estrattiva storica in sotterraneo: il caso di Altamura (BA)*. 3° Congresso Nazionale AIGA, San Giovanni Valdarno (AR), 25-27 febbraio 2009.
- BRUNO G., CHERUBINI C. (2005). *Subsidence induced by the instability of weak rock underground quarries in Apulia*. *Giornale di Geologia Applicata*, vol. 1, pp. 33-39.
- CAGGIANO T., DI SANTO A.R., FIORE A., PALUMBO N. (2006/2007). *Attività dell'Autorità di Bacino della Puglia per l'individuazione, il censimento e la pianificazione degli interventi per la messa in sicurezza dei territori a rischio sprofondamento per la presenza di cavità sotterranee*. *Geologi e Territorio*, n. 4/2006-1/2007, p. 32-34.
- CALÒ G.C., MELIDORO G., MONTERISI L. (1992). *Recupero tecnico-economico di cave sotterranee in rocce calcarenitiche nella Provincia di Lecce*. Atti 1° Conferenza Europea sulle Cave "Eurocave 92", Courmayeur.
- DE GIOVANNI A., MARTIMUCCI V., MARZULLI M., PARISE M., PENTIMONE N., SPORTELLI D., (2010). *Operazioni di rilievo e analisi preliminare dello sprofondamento in località San Procopio* (Barletta, 2-3 maggio 2010). VII Convegno Nazionale di Speleologia in Cavità Artificiali, Urbino, 4-8 dicembre 2010, vol. Abstracts, p. 38-39.
- DE PASCALIS A., DE PASCALIS F., PARISE M. (2010). *Genesi ed evoluzione di un sinkhole connesso a cavità antropiche sotterranee nel distretto estrattivo di Cutrofiano (prov. Lecce, Puglia)*. Atti 2° Workshop Internazionale "I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato", Roma, 3-4 dicembre 2009, p. 703-718.
- FIORE A. & PARISE M. (2011). *Pericolosità da sprofondamenti antropici e naturali nell'ambiente carsico della Regione Puglia*. Presente volume.
- FIORITO F., ONORATO R. (2004). *Le cave ipogee di Colle S. Lazzaro – Gallipoli. Primi studi*. Atti IX Incontro di Speleologia Pugliese "Spelaion 2004", Lecce, 10-12 dicembre 2004, p. 125-136.
- LOLLINO P. & PARISE M. (2010). *Analisi numerica di processi di instabilità di cavità sotterranee e degli effetti indotti in superficie*. Atti 2° Workshop Internazionale "I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato", Roma, 3-4 dicembre 2009, p. 803-816.
- MARTIMUCCI V., RAGONE G., DENORA A., CRISTALLO F. (2010a). *Le cave di tufo di Altamura – Prima relazione e notizie sulle esplorazioni*. Atti del XII Incontro Regionale di Speleologia "Spelaion 2007", Altamura, 7-9 dicembre 2007, p. 91-102.
- MARTIMUCCI V., GUEGUEN E., RAGONE G. (2010b). *Grotta di Lamalunga. Progetto di ricerca: rilievo topografico speleologico e realizzazione strati informativi*. *Dire in Puglia*, n. 2, BetaGamma editrice, p. 65-69.
- PARISE M. (2010). *The impacts of quarrying in the Apulian karst*. In: CARRASCO F., LA MOREAUX J.W., DURAN VALSERO J.J., ANDREO B. (eds.), *Advances in research in karst media*. Springer, p. 441-447.
- PARISE M. (2011). *Sinkholes caused by underground quarries in Apulia, southern Italy*. Atti 12<sup>th</sup> Multidisciplinary Conference on "Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst", Saint Louis (Missouri, USA), January 10-14, 2011.
- PARISE M., LOLLINO P. (2011). *A preliminary analysis of failure mechanisms in karst and man-made underground caves in Southern Italy*. *Geomorphology*, in stampa.
- PARISE M., DE PASCALIS A., DE PASCALIS F., DONNO G., INGUISCIO S. (2008). *Cavità sotterranee a fini estrattivi, e loro connessione con fenomeni di sprofondamento e subsidenza in agro di Cutrofiano (Lecce)*. Atti "Spelaion 2006", Borgo San Celano (FG), p. 55-69.
- PARISE M., DEL PRETE S., GALEAZZI C., GERMANI C., MARTIMUCCI V. (2010). *Fenomeni di dissesto idrogeologico connessi a cavità sotterranee di origine antropica*. Convegno "Frane e dissesto idrogeologico: consuntivo", X Giornata Mondiale dell'Acqua, Accademia dei Lincei, Roma, 22 marzo 2010, Riassunti, p. 101-104.
- PESCE DELFINO V., VACCA E. (1993). *An archaic human skeleton discovered at Altamura (Bari, Italy)*. *Rivista d'Antropologia*, vol. 71, p. 249-257.
- SANNICOLA G. (1997). *Li Tagghiati e li Zuccaturi. Le cave ed i cavatori (Archeologia industriale a Grottaglie)*. *Lu Lampiune*, n. 2, p. 103-107.
- PILOTRO G., SPECCHIO V., PEPE P. (2010). *L'evento del 07.05.2007 di Via Barcellona, Altamura. Il contributo del CARS alle strategie di intervento di valutazione del rischio connesso (Provincia di Bari, Puglia)*. Atti XII Incontro Regionale di Speleologia "Spelaion 2007", Altamura, 7-9 dicembre 2007, p. 103-107.
- VACCA E. (1999). *La Grotta di Contrada Lamalunga e l'Uomo di Altamura*. *Itinerari Speleologici*, ser. II, n. 8, p. 85-93.



## 1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il centro abitato di Camaiore, in provincia di Lucca, si trova posizionato in una conca naturale incastonata tra rilievi collinari e montuosi che costituiscono le propaggini sud-occidentali delle Alpi Apuane. La piana camaiorese si sviluppa nella parte terminale delle valli del T. Lucese e del T. Lombricese che convergono, da direzioni sub-ortogonali, verso l'abitato del capoluogo. Poco dopo la loro confluenza, ove ha origine il T. Camaiore, la vallata si restringe e sbocca nell'ampia pianura costiera della Versilia che si estende, sulla fascia litoranea, da Capezzano al Lido di Camaiore (Fig. 1).

L'Appennino Settentrionale e le Alpi Apuane, i cui margini lambiscono la piana di Camaiore, possono essere interpretati come il

risultato dell'evoluzione spazio-temporale di una tettonica a tratti compressiva, a tratti distensiva, che ha interessato i bacini sedimentari liguri s.l. e toscani s.l. La collisione con la microplacca Sardo-Corsa durante l'Oligocene può essere vista come la causa principale della formazione, in un regime tettonico compressivo, dell'edificio a falde di ricoprimento sovrapposte che caratterizza i suddetti rilievi [Carmignani, Kligfield, 1990]. A partire dal Miocene Superiore e sino a tutto il Messiniano le strutture compressive sono interessate da una tettonica distensiva a larga scala, collegata, molto probabilmente, al processo di retroarco che ha portato all'apertura del Mare Tirreno e che ha dato origine a strutture tipo "horst" e "graben" in tutta la Toscana. La piana di Camaiore è situata in una depressione

tettonica compresa tra l'alto morfologico delle Apuane a Nord ed rilievi collinari dell'allineamento Monte Magno-Monte Moneta a Sud, formatasi in seguito alla suddetta fase deformativa distensiva. Tale struttura negativa, tipo "graben", si realizza principalmente attraverso faglie dirette sottrattive, a geometria listrica, a direzione appenninica (NW-SE), in associazione a sistemi secondari di faglie a direzione antiappenninica ed a faglie con direzione E-W e N-S (pleistoceniche). Il sistema di faglie dirette, che ha ribassato il substrato roccioso del margine occidentale dei rilievi apuani, ha determinato sia il rapido colmamento della pianura costiera con sedimenti terrigeni e costieri recenti (ghiaie, sabbie, argille e torbe), sia il ringiovanimento dei versanti nell'entroterra collinare e montano (Pleistocene inf.), con la

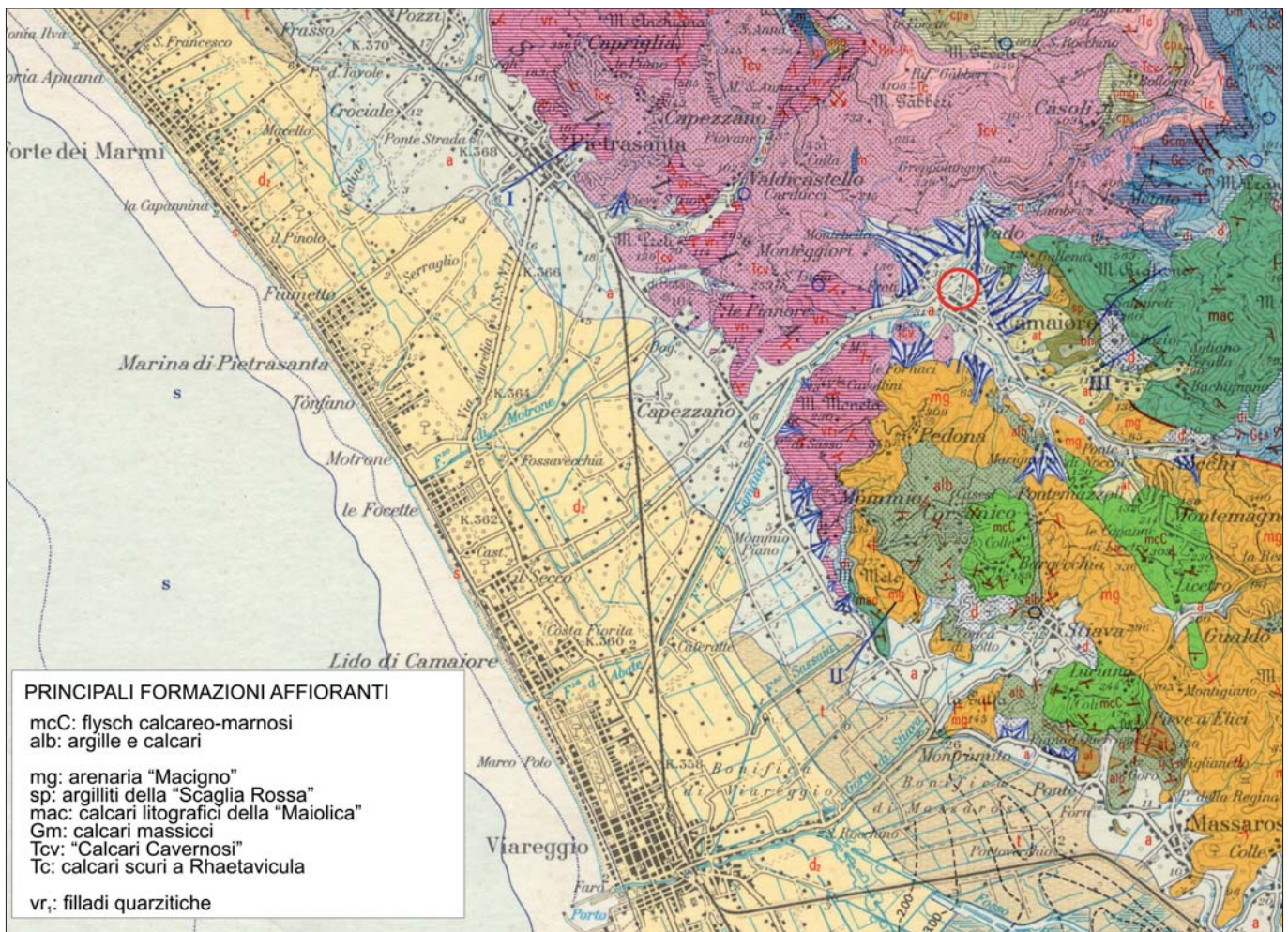


Figura 1 – Inquadramento geologico e corografico dell'area. (Tratto da: Servizio Geologico d'Italia - Carta Geologica 1:100.000 - Foglio 104 – PISA)

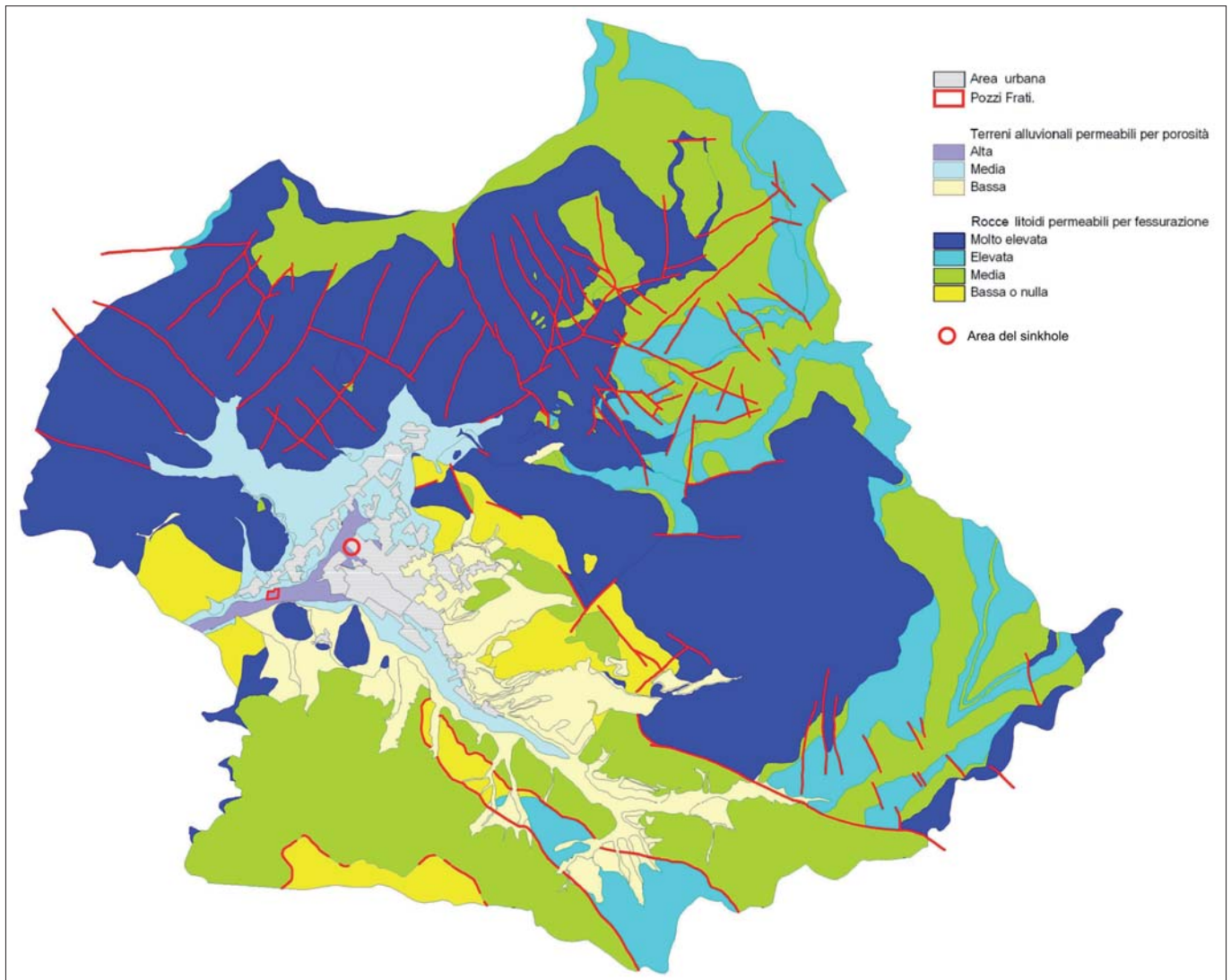


Figura 2 – Carta delle permeabilità delle rocce

formazione delle grandi conoidi di materiale alluvionale. Gli studi effettuati sulla piana in oggetto indicano la presenza di una tettonica attualmente attiva, riconoscibile proprio dalla particolare struttura profonda del “*graben*” della conca di Camaiore.

La fascia collinare-montuosa, che lambisce o contorna le aree di pianura, assume forme diverse nei rilievi che la costituiscono, ovvero forme blande nel settore centro-meridionale, con quote massime che si aggirano intorno ai 500-600 m slm, con versanti a medio-bassa acclività, raramente incisi da valli incassate e ripide; rilievi con asperità più accentuate nel settore settentrionale, sovrastanti la conca del capoluogo, culminanti in corrispondenza dei massicci prevalentemente carbonatici del M. Gabberi, del M. Prana e del M. Matanna (circa 1300 m slm). L'aspetto morfologico di questi ultimi massicci è tipico del paesaggio apuano, con pendii da media-mente acclivi a molto acclivi, con speroni rocciosi e doline, risultato di una evoluzione morfologica di tipo carsico.

Il complesso assetto geologico della zona, con strette anticlinali, laminazioni e sovrascorrimenti, condiziona ovviamente la

morfologia dei versanti, che assumono forme decisamente forti in corrispondenza degli affioramenti delle formazioni prevalentemente calcaree appartenenti alla Successione Toscana (localizzabili a Nord, Nord-Est e Sud-Est della conca con i termini dal “*Calcere cavernoso*” alla “*Maiolica*”), mentre sui più dolci rilievi meridionali e sud-occidentali affiorano terreni argillitici ed arenacei (dalla “*Scaglia rossa*” al “*Macigno*” della Succ. Toscana, alle argilliti caotiche ed i flysch delle Unità liguri). Ad Ovest, in corrispondenza delle colline che separano la valle interna dalla pianura costiera, affiorano le filladi quarzitiche del “*Verrucano*” dell'Unità di Massa (Auctt.).

L'assetto geologico condiziona ovviamente anche il circuito idrogeologico delle acque sotterranee, determinando, nel caso specifico, una situazione particolarmente favorevole al trabocco. Nella zona tra le località Frati e Teneri, in corrispondenza della strettoia che delimita ad W la conca camaioresc, il substrato roccioso è costituito da Filladi quarzitiche a permeabilità molto bassa, mentre il sovrastante Calcere Cavernoso acquifero risulta laminato fino a sparire. Questo determina un effetto soglia al deflusso delle acque

sotterranee che, risalendo dalle fratture nei calcari, fluiscono verso l'uscita del bacino, causandone l'emergenza. In questa zona si trovavano alcune grosse sorgenti, attualmente ancora presenti sia pure con portata ridotta; le maggiori erano alla base delle due colline di calcere cavernoso Monte di Rose a Nord e Colle Donaia a Sud.

Sempre in questa zona si trova una importante batteria di pozzi per uso acquedottistico che viene pertanto alimentata sia dalla falda superficiale che dalle acque che risalgono dall'acquifero carbonatico nella zona della soglia naturale (Fig. 2).

## 2. EVOLUZIONE DELL'EVENTO

Il fenomeno sinkhole, identificato con lo sprofondamento improvviso del terreno, è riconosciuto in diverse parti del mondo ed è considerato come una calamità scarsamente prevedibile e dalla quale non è facile difendersi. In Italia i principali dissesti sono stati registrati lungo la fascia tirrenica, dalla Versilia alla Campania.

Il dissesto verificatosi a Camaiore nell'ottobre 1995 è assimilabile a quelli già noti dell'alto Lazio e della Pianura Pontina, a quel-

lo di Grosseto del 1999 ed a quello avvenuto nel 2001 nell'entroterra romano. La maggior parte di questi fenomeni è caratterizzata dalla notevole profondità del bed-rock carbonatico (100 m ed oltre) e dal fatto che si trovano nella zona di "scarico" delle falde e non nella zona di ricarica.

L'evento di Camaiole è avvenuto nella notte tra il 14 ed il 15 ottobre 1995 con sprofondamento di un'area in Via F.lli Cervi ed apertura di una voragine del diametro di circa 30 metri e profonda, a ridosso del bordo, circa 18 m.

Il dissesto determinò il crollo di un fabbricato quadrifamiliare, mentre altri 5 fabbricati circostanti vennero gravemente lesionati, tanto da essere successivamente demoliti (Foto 1).

Con il Dipartimento di Protezione Civile fu deciso di iniziare immediatamente il riempimento della voragine con inerti lavati, grossolani, al fine di evitare il naturale ampliamento della stessa ed il conseguente coinvolgimento di altri fabbricati (Foto 2), nonché di iniziare gli studi nei dintorni dell'area del dissesto.

Furono immediatamente intraprese le indagini per studiare le cause del fenomeno, per verificare la situazione di rischio sinkhole nella piana camaiolese, notevolmente urbanizzata, e per allestire un sistema di allarme ai fini di protezione civile, con l'obiettivo di prevenire i rischi alla pubblica incolumità derivanti da altri possibili fenomeni dello stesso tipo.

Si deve rilevare che nei primi giorni di ottobre si era registrato un evento sismico di una certa intensità con epicentro in Lunigiana, dopo il quale, a detta dei locali, si erano cominciati a manifestare piccoli dissesti dei cancelli esterni e microlesioni sulle strutture esterne dei fabbricati in corrispondenza della zona del collasso.

Per questo una delle prime ipotesi fatte per spiegare il fenomeno fu quella del

crollo di una cavità ipogea all'interno del complesso carbonatico costituente il bed-rock, crollo innescato dallo *shock* sismico. Fra le ipotesi fu avanzata anche quella dell'eccessivo pompaggio dei pozzi ad uso acquedottistico della VEA e della SEA Acque nella zona dei Frati, un'area posta a circa 850 metri ad WSW dalla voragine, con avvio del processo di *dewatering* nella coltre alluvionale.



Foto 1 – Panoramica della zona colpita dal dissesto



Foto 2 – Operazioni di colmamento della "voragine"

### 3. INDAGINI ESEGUITE

A partire dal momento dell'evento, sono state eseguite, in più fasi, indagini multidisciplinari che hanno consentito di raccogliere una notevole mole di dati geologici, stratigrafici, idrogeologici, geofisici e geochemici, nonché di esaminare una serie di misure relative ai punti di controllo dislocati sul territorio. Di tali indagini si parla con maggiore dettaglio in altre memorie già pubblicate.

In sintesi si può riepilogare che i sondaggi geognostici hanno fatto rilevare frequenti eteropie orizzontali dei sedimenti alluvionali; tali depositi, costituiti da materiali eterogranulari, presentano infatti situazioni stratigrafiche caratterizzate da scarsa omogeneità laterale. Nell'ambito della conca camaiorese si rilevano orizzonti prevalentemente argillosi, a profondità da 40 a 50 metri, che determinano un certo confinamento delle falde acquifere sottostanti. L'aspetto più importante messo in luce dalla geognostica riguarda la presenza di livelli prevalentemente sabbioso-limosi, di consistenza bassa o molto bassa (assimilabili a "vuoti", laddove l'avanzamento delle aste di perforazione avveniva per peso proprio) osservati a diverse profondità in particolare nei sondaggi eseguiti in corrispondenza di anomalie microgravimetriche misurate. Livelli a bassa densità sono stati evidenziati anche dalle indagini sismiche a rifrazione. Si può quindi ipotizzare che i terreni alluvionali al di sopra del *bed-rock* siano localmente poco addensati ed abbiano, in alcuni orizzonti, caratteristiche meccaniche molto scadenti. Le situazioni di decompressione della copertura alluvionale potrebbero nascondere la presenza di "vuoti" in profondità o cavità ipogee.

Le indagini gravimetriche e microgravimetriche (Prof.ri B. Toro e M. Di Filippo, *Uniroma La Sapienza*) hanno messo in luce una serie di anomalie negative, corrispondenti a carenze di massa all'interno della copertura alluvionale; le zone di anomalia negativa sono indicative di volumi di sedimenti nel sottosuolo caratterizzati da valori di densità estremamente bassi, quasi a livello di fanghi plastici (a conferma della geognostica), e dalle caratteristiche geotecniche estremamente scadenti, con elevato valore di compressibilità, e tali da far considerare le aree soprastanti a rischio sinkhole.

Le indagini geochemiche (Prof. S. Lombardi, *Uniroma La Sapienza*) hanno evidenziato zone con tenori anomali di gas endogeni, indici di attività tettonica in atto. La distribuzione areale delle anomalie gassose è contraddistinta da una disposizione preferenziale lungo direzioni definite e allungate, riferibili a discontinuità tettoniche profonde. Il confronto tra l'orientazione delle anomalie e la direzioni delle principali deformazioni fragili dell'area studiata hanno permesso di avanzare l'ipotesi che le direzioni N-S, E-W, e

subordinatamente quelle antiappenniniche, coincidano statisticamente con le fratture più permeabili e probabilmente più attive o recentemente attivate.

Anche la geoelettrica (Dott. S. Rizzo) ha fatto osservare anomalie elettriche in profondità. Tali anomalie, rilevate con tecniche tomografiche sia nel materasso alluvionale, sia nel *bed-rock* carbonatico, sono attribuibili, relazionate alla locale situazione geologico-stratigrafica, ad una maggiore percentuale di indice dei vuoti e quindi probabilmente connesse con cavità, colme di terreni fini poco o nulla addensati, o grosse fratture.

Da tutta questa serie di indagini è emerso il quadro strutturale del substrato profondo della conca camaiorese, con un "basso" allungato NW-SE nella zona del crollo e interessante parte dell'abitato del capoluogo, e con alcune aree nelle quali sono ipotizzabili probabili cavità ipogee (o comunque substrato molto fratturato) a profondità dell'ordine di 100-130 metri dal piano campagna.

In base alle verifiche idrogeologiche effettuate è stata sostanzialmente scartata, come causa scatenante, l'influenza degli emungimenti dal campo pozzi distante circa 850 m dalla zona del crollo; non è stata comunque totalmente esclusa, come concausa, l'incidenza del pompaggio di rilevante entità sui possibili fenomeni di subsidenza dell'area.

Il prelievo medio annuo ai pozzi acquedottistici in loc. Frati rappresenta poco più di un quinto del totale della risorsa idrica disponibile nel bacino (*"Bilancio idrogeologico della conca di Camaiole in relazione alla voragine del 1995"*, G. Pranzini & V. Buchignani, 2001). È evidente, quindi, che a livello di bilancio medio annuo i prelievi sono ampiamente compatibili con la risorsa rinnovabile, ovvero gli emungimenti attuati non vanno ad intaccare le riserve permanenti del complesso bacino che si sviluppa nel *bed-rock* carbonatico e che contribuisce ad alimentare le alluvioni della conca di Camaiole. Dalla strettoia in località Frati sembra quindi transitare, nell'arco dell'anno, un volume d'acqua ampiamente superiore a quello che viene estratto. La situazione critica si viene però a determinare nella fase stagionale in cui gli apporti sono limitati o assenti, ed invece i consumi toccano i loro valori massimi. In questo periodo, generalmente corrispondente ai mesi di luglio e agosto, si registra effettivamente uno squilibrio nel bilancio idrogeologico.

L'analisi integrata dei dati strutturali, geognostici, sismici, idrogeologici, geochemici, geoelettrici e gravimetrici raccolti nel corso delle varie fasi di indagine condotte nel sottosuolo della "conca" di Camaiole dall'ottobre 1995 ad oggi, fa osservare una convergenza di indizi relativi ad anomalie più o meno profonde, tale da far ipotizzare il concentramento

delle anomalie stesse nella zona compresa tra il T. Lombricese a NW, la Via Gusceri a NE ed il centro storico di Camaiole a S e SW.

Si è avvalorata l'ipotesi riguardo alla presenza di zone profonde, nel substrato roccioso, con anomalie elettriche evidenti, attribuibili ad una maggiore percentuale di indice dei vuoti nel carbonatico e quindi probabilmente connesse con cavità o grosse fratture riempite con materiale fine, sature. Il numero elevato e la loro distribuzione in zona urbanizzata indicano una situazione a rischio per quanto concerne la possibilità d'innescare di sinkhole profondi. Le conclusioni delle campagne gravimetriche effettuate sulla parte urbanizzata di piana riconosciuta a maggiore rischio, confermano la situazione sopra indicata ed anzi sono state individuate alcune zone nelle quali le anomalie gravimetriche negative sembrano localizzate anche nell'ambito della copertura alluvionale, entro i primi 60 metri di profondità. C'è una notevole corrispondenza areale tra le anomalie elettriche individuate e le anomalie gravimetriche misurate; addirittura si riscontra la sovrapposizione quasi perfetta delle anomalie rilevate distintamente con i due metodi geofisici, sia per quanto concerne quelle profonde che quelle superficiali. Si osserva inoltre la sovrapposizione delle varie anomalie con le principali intersezioni delle lineazioni rilevate da foto aeree e da satellite.

### 4. SINTESI DEI RISULTATI

Dalle indagini eseguite sono emerse, come cause sostanziali, la fragilità del substrato carbonatico (interessato da paleocarsismo), la collocazione della zona del crollo in area tettonicamente attiva (con un evento sismico di discreta intensità verificatosi circa 8 giorni prima in Lunigiana e con numerosi eventi di bassa magnitudo con epicentro nella zona di Camaiole), la presenza e l'intersezione di grosse lineazioni strutturali, la presenza di elevate quantità di CO<sub>2</sub> di origine endogena.

La sintesi dei dati di campagna, confrontata con il quadro delle varie misurazioni eseguite, mette inoltre in evidenza che anche la piezometria gioca un ruolo fondamentale nell'equilibrio della zona di per sé fisiologicamente fragile per motivi litologici e, soprattutto, tettonico-strutturali. In particolare, nelle zone di intersezione delle principali lineazioni, in corrispondenza delle quali potrebbero peraltro svilupparsi cavità, avvengono le restituzioni più importanti di acqua in pressione durante la ricarica. Le colonne di acqua risalenti da queste cavità o fratture in fase di ricarica possono generare pressioni di alcune decine di atmosfere. I prismi di terreni sedimentari posti sulla verticale di queste zone di risalita sono stressati dai forti sbalzi di pressione verticale cui sono soggetti nel corso dell'alternarsi di ri-

carica e svasso. In queste fasi di intense variazioni di pressioni idrauliche, giocano un ruolo fondamentale anche i gas endogeni, sia come *motori* che come agenti influenti sugli equilibri chimici delle acque. Un ulteriore elemento importante è rappresentato dalla presenza di orizzonti confinanti (nel breve periodo) che contribuiscono a rallentare il riassetto degli equilibri delle pressioni nelle diverse falde. Appare quindi evidente che il fenomeno di dissesto in esame e, più in generale, i dissesti manifestatisi con questa tipologia di recente anche in altre aree sono favoriti anche dagli squilibri idraulici e idrochimici che si innescano all'interno del sistema acquifero delle falde in pressione anche, e forse soprattutto, per il caso in esame, nei momenti di intensa ricarica delle falde stesse.

In sintesi, questi squilibri, prodotti da cause naturali, destabilizzano punti intensamente fratturati o carsizzati del substrato carbonatico e/o del sovrastante materasso alluvionale resi particolarmente fragili dalla persistenza nel tempo di una serie di fattori naturali negativi. Tali fattori, che giocano il ruolo primario sul fenomeno, possono essere quindi riconosciuti nella particolare geometria del sistema acquifero confinato della conca camaiorese, e nella elevata concentrazione acido carbonico di origine endogena circolante in soluzione nelle acque delle falde in pressione che rende particolarmente attiva la dissoluzione carsica nei punti del substrato carbonatico già indeboliti dalla fratturazione tettonica. Anche se allo stato attuale non è possibile stabilire con univoca certezza se le cavità nelle alluvioni sono sempre correlate o meno a cavità del substrato carbonatico sottostante, appare comunque chiaro che le sovra-pressioni idrauliche che si originano nell'ambiente confinato delle falde inferiori in particolari momenti del ciclo idrologico, possono diventare il *propulsore* che nel tempo crea i vuoti in seno al materasso alluvionale e quello che, in particolari momenti e simultaneamente con altre concause, può dar origine ai dissesti. Non deve essere tuttavia trascurata l'influenza del prelievo acquedottistico in loc. Frati nei momenti di minima ricarica e di massima utenza di acque sotterranee (luglio-agosto), periodo in cui potrebbero essere intaccate eccessivamente le riserve permanenti, con innesco di possibili fenomeni di squilibrio nelle pressioni e, probabilmente, nell'idrochimismo delle acque. In occasione di periodi particolarmente siccitosi, se la piezometria dovesse raggiungere minimi al di sotto delle normali oscillazioni stagionali per tempi ragionevolmente lunghi, data la presenza di terreni poco addensati e compressibili, potrebbero innescarsi fenomeni di subsidenza. A fronte di tutto quanto esposto, appare chiaro che i fattori che concorrono al

Anno 1995	
Ottobre	
	Pioggia (mm)
1	0,0
2	0,0
3	0,0
4	0,0
5	15,2
6	0,2
7	0,0
8	0,0
9	0,0
10	0,2
11	0,0
12	0,2
13	0,0
14	0,0
15	0,0
16	6,0
17	0,0
18	0,0
19	3,6
20	1,8
21	119,8
22	23,0
23	0,0
24	13,8
25	42,2
26	0,2
27	0,0
28	0,0
29	0,0
30	0,2
31	0,0
Totale (mm)	
227,2	

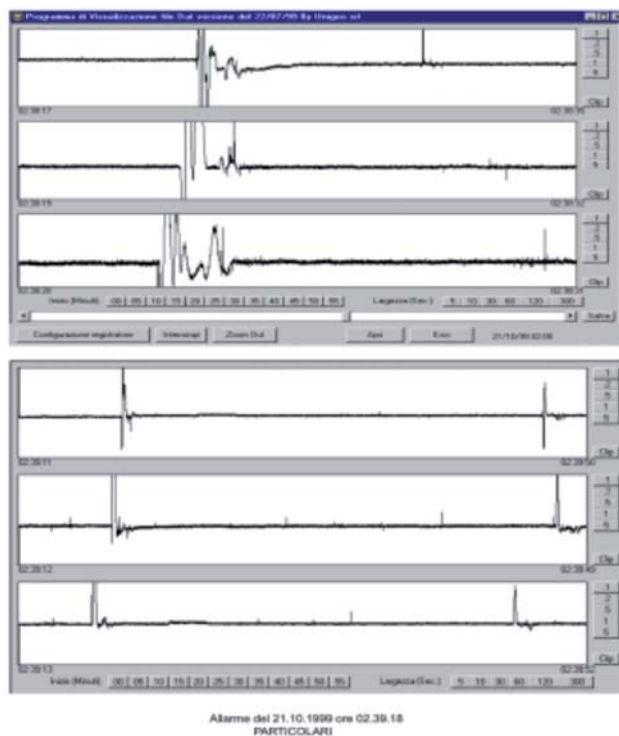


Figura 3 – Segnale di tipo sismico alla centralina in loc. "Le Funi" a seguito di evento meteorico di forte intensità

disequilibrio del sistema sono molteplici e notevolmente complesso appare il processo con cui evolvono i potenziali sinkhole. Fermo restando il fatto che appare ancora improbabile un intervento strutturale di messa in sicurezza dei suoli e delle aree edificate a pericolosità elevata, per mitigare il rischio di crolli nel sottosuolo di Camaiore si è agito sul fronte della prevenzione e cioè sul monitoraggio in funzione di allerta nelle aree ritenute a rischio. Nel caso in oggetto, l'ipotesi del monitoraggio in continuo è la sola risorsa che possa consentire la predisposizione di piani di sicurezza a tutela dell'incolumità pubblica nei confronti del ripetersi di un evento simile. Per questo è stato predisposto un progetto integrato che prevede il controllo degli elementi che caratterizzano l'evolvere di un sinkhole ed in particolare i precursori del fenomeno. I più manifesti tra i vari precursori appaiono le micro-deformazioni del *suolo*, per cui il sistema integrato è stato realizzato con l'installazione di una serie di punti di controllo fisso GPS per il controllo in continuo delle micro-deformazioni morfologiche di punti significativi (in corso di revisione) e con il posizionamento di un interferometro SAR (radar ad apertura sintetica) mobile, a lettura continua e produzione di informazioni in tempo reale immediatamente utilizzabili per l'interpretazione del fenomeno (sistema LISA©). Il sistema è implementato con il controllo del *sottosuolo* attraverso l'osservazione di 3 centraline di rilevazione di segnali sismici per individuare la zona di origine dell'eventuale fonte di "rumore" (attive); l'installazione di rilevatori di deformazioni profonde con sensori inclinometrici a diverse profondità; la realizzazione di una stazione di

monitoraggio per la misura in continuo delle concentrazioni di alcune specie gassose di origine endogena significative per lo studio del fenomeno; l'esecuzione di misure gravimetriche effettuate periodicamente su una serie di punti significativi, e rilevamento di micro-anomalie attraverso la lettura multipla dei capisaldi prescelti.

Il completamento del monitoraggio si attua con il controllo delle *acque sotterranee* attraverso la installazione di trasduttori di pressione per il monitoraggio in continuo delle variazioni del livello di falda e sonde multi-parametriche per l'analisi di parametri chimico-fisici significativi delle acque, con particolare riguardo alla CO<sub>2</sub>, il cui sistema di controllo è attualmente in corso di realizzazione (progetto Prof. S. Lombardi).

## 5. PRIMI RISULTATI DEL MONITORAGGIO

Come primo *step* di allestimento del monitoraggio preventivo, furono messe a punto tre centraline di rilevamento in continuo, in grado di captare segnali di tipo sismico provenienti dal sottosuolo. L'apparato è costituito da un sistema di geofoni, disposti secondo le tre dimensioni, posizionato in corrispondenza del *bed-rock*; il sistema è collegato ad un PC attraverso un convertitore analogico-digitale. A monte del convertitore sono posti i filtri che, oltre che eliminare i possibili disturbi, servono ad amplificare i segnali dai geofoni. I segnali così acquisiti vengono gestiti da uno specifico *software* che, oltre che acquisire i dati, gestisce un modem interno che dà il via ad un sistema che consente di localizzare, in prima approssimazione, la fonte del "rumore" attraverso l'analisi vettoriale degli impulsi.

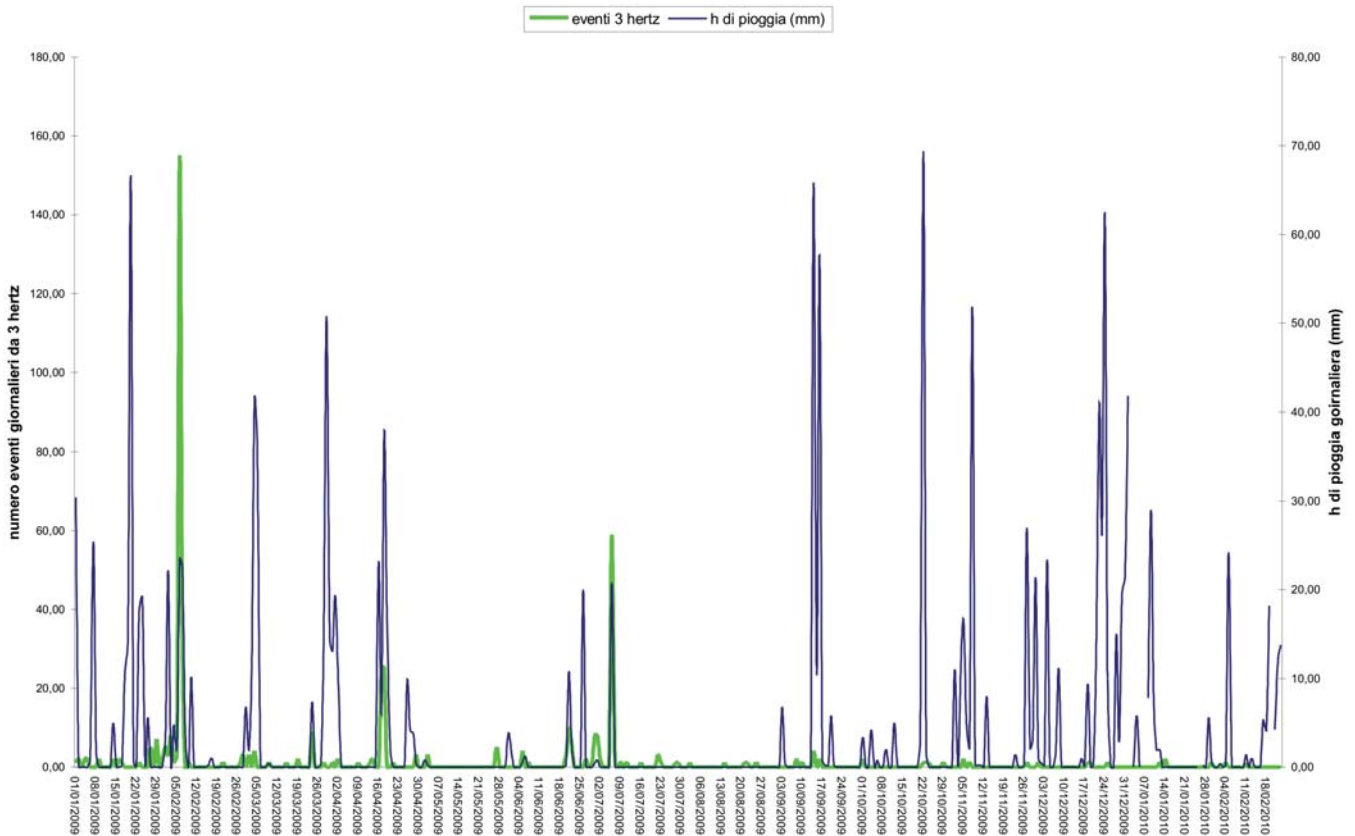


Figura 4 – Grafico di correlazione tra segnali (“eventi”) e piovosità giornaliera (anno 2009)

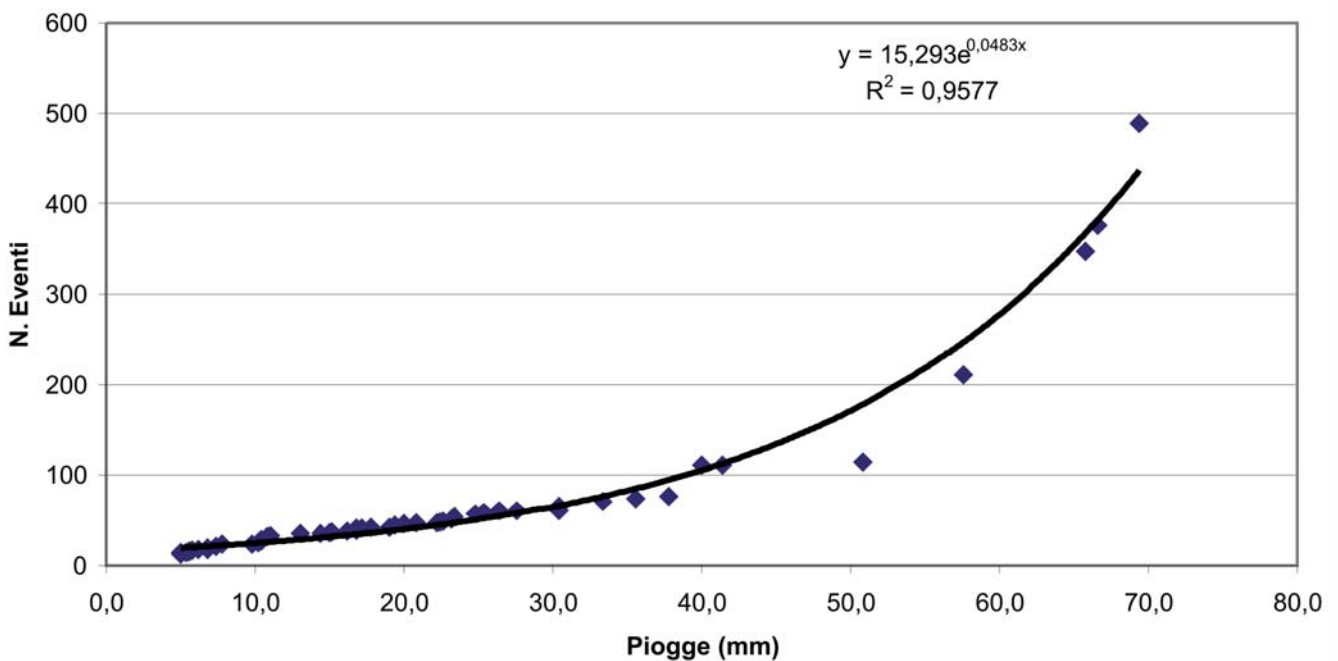


Figura 5 – Grafici di correlazione tra Piogge maggiori di 5 mm ed Eventi, nell'ultimo anno di osservazioni

Uno degli aspetti più interessanti che si è rilevato nel periodo di osservazione delle centraline, è quello rappresentato dal fatto che in corrispondenza di periodi particolarmente piovosi o in occasione di eventi meteorici molto intensi, si osserva in genere una corrispondenza biunivoca con “rumori” sismici ai geofoni, rappresentati per lo più da forme sinusoidali brevi e non dai tradizionali sismogrammi che si osservano invece nel caso di terremoti.

Le registrazioni effettuate dalle centraline, inviate all'unità centrale di controllo, hanno fatto osservare dei segnali di tipo sismico (caratteristici di “rumori” di fondo) soprattutto in concomitanza con eventi meteorici di particolare intensità. Questa coincidenza si è osservata in occasione di vari eventi, con tempi di risposta diversi a seconda che l'evento stesso sia particolarmente intenso (risposte in tempi brevi) o di media intensità (risposte a più lungo termine).

Di seguito (Fig. 3) si riporta l'immagine di uno di questi segnali registrato in occasione dell'evento meteorico verificatosi nella nottata del 21 ottobre 1999, con precipitazione di circa 120 mm concentrata in un'ora e mezzo. Eventi di tale intensità non si sono poi ripetuti, anche se vi sono stati periodi di elevata precipitazione, superiori alle medie finora registrate.

La buona corrispondenza tra segnali alle centraline e piovosità è particolarmente evi-

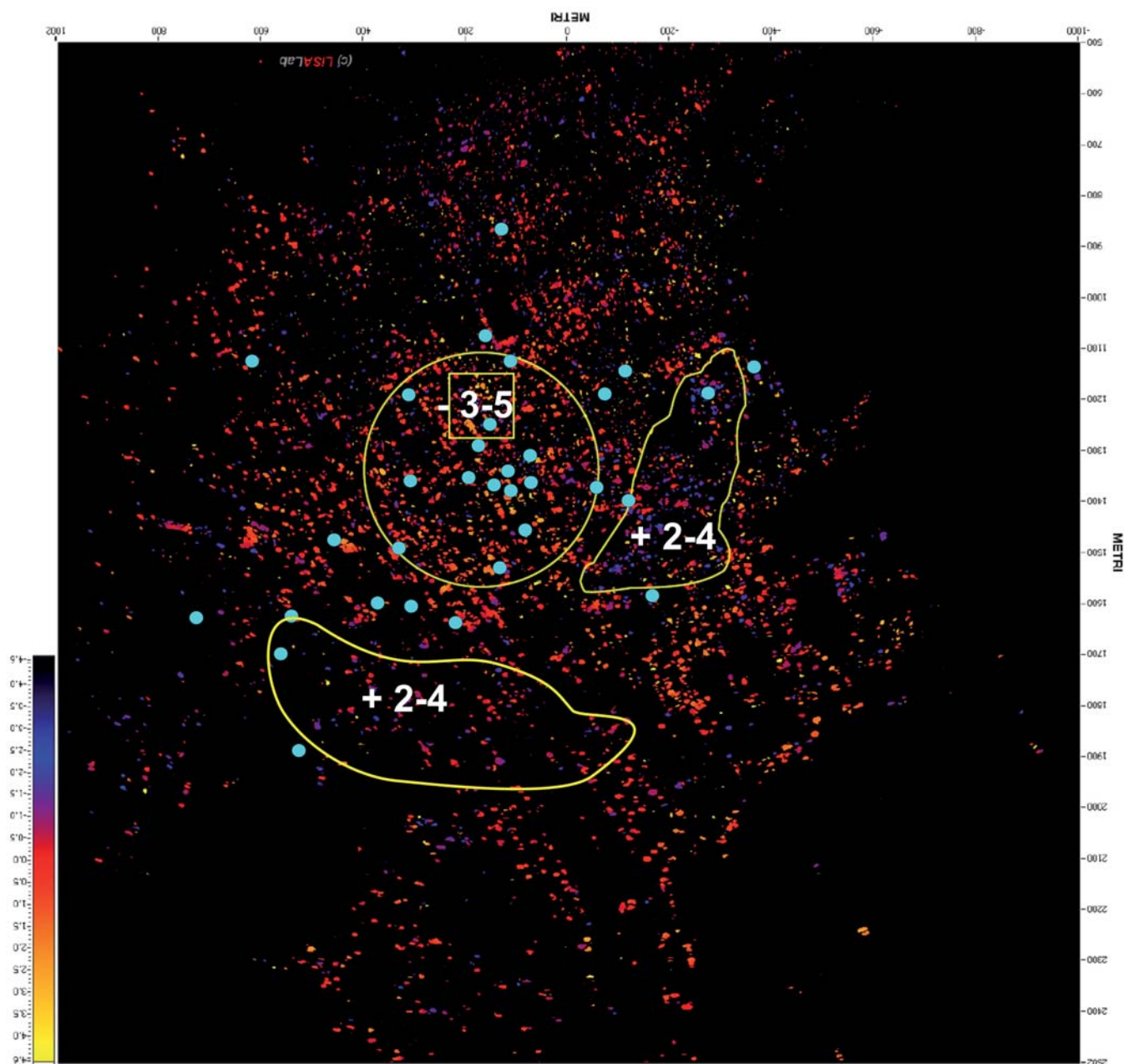


Figura 6 – Confronto tra un interferogramma di comparazione e gli epicentri dei segnali alle centraline

dente se andiamo a considerare tutti i segnali (denominati “eventi” nei grafici) con frequenza di 3 Hz (Fig. 4).

Per frequenze superiori, la corrispondenza è meno evidente. Prendendo inoltre in considerazione gli eventi giornalieri e la pioggia caduta (maggiore di 5 mm), si ottiene il grafico di Figura 5. Si noti che è possibile effettuare una regressione esponenziale con un coefficiente di determinazione elevato ( $R^2=0.9577$ ), ovvero si evidenzia che a piogge più intense corrispondono più eventi. La citata regressione porta a stimare circa 19 eventi/giorno nel caso di piogge con intensità di 5 mm/giorno da confrontare con una stima di 449 eventi/giorno per piogge di intensità pari a 70 mm/giorno.

Lo studio di dettaglio delle frequenze e delle energie in gioco dei segnali in correlazione con la piovosità locale è oggetto di Tesi specialistica della laureanda in ingegneria

Barbara Domenici, unitamente alla creazione di un modello di simulazione dell'evento sinkhole.

Per quanto concerne il controllo delle microdeformazioni del suolo, è in corso la revisione del sistema di lettura e trasmissione dati di punti di controllo GPS ubicati in punti significativi nella conca camaiorese. È invece in funzione il sistema GBInSAR LISALab in grado di produrre un'immagine radar SAR acquisita ogni 12 minuti circa, ad ogni pixel della quale è associato un valore di ampiezza ed un valore di fase. Dal confronto dei valori di fase di due immagini SAR acquisite in tempi diversi, si ottiene, attraverso lo specifico software, l'entità dell'eventuale spostamento avvenuto nel lasso di tempo intercorso tra le due letture di confronto. I dati ottenuti dal 2007 ad oggi fanno osservare una serie di micro-deformazioni del suolo, associate anch'esse agli eventi meteorici, di diversa

entità e di diversa direttrice nell'ambito della stessa conca camaiorese, con spostamenti millimetrici o centimetrici. A zone che si sollevano dopo fasi di pioggia intensa si contrappongono zone che, contemporaneamente, si abbassano. Interessante è notare che alle aree caratterizzate dai movimenti più marcati coincidono gran parte degli epicentri dei segnali alle centraline (Fig. 6).

Dato che le micro-deformazioni del suolo rappresentano uno dei precursori principali del fenomeno sinkhole, l'osservazione delle stesse è fondamentale per una eventuale allerta. Ad oggi le deformazioni osservate hanno avuto una forma di “respiro” legato agli eventi meteorici stagionali, ma nel caso in cui il *trend* di una zona facesse denotare un abbassamento univoco e costante, quello potrebbe essere il segnale di un irreversibile processo di collasso, con conseguente messa in atto del piano di protezione civile.

# L'esperienza della Regione Lombardia nel risanamento di cavità antropiche

ADRIANA MAY  
Regione Lombardia, Direzione Generale Territorio e Urbanistica, Milano

adriana\_may@regione.lombardia.it

Il tema della difesa da rischio idrogeologico viene affrontato in modo organico nel più ampio contesto del governo del territorio, cui Regione Lombardia ha dedicato nel 1995 una legge fortemente innovativa, che sottolinea il tema dello sviluppo sostenibile, introduce principi di compensazione e perequazione, costruisce un modello di pianificazione flessibile e in costante evoluzione.

In particolare affida al Piano Territoriale Regionale PTR, la funzione di strumento di integrazione delle politiche, con l'obiettivo di favorire il raggiungimento di obiettivi condivisi.

Per quanto riguarda la materia oggetto di questo convegno, il principio fondamentale che ispira l'azione regionale è il riconoscimento del ruolo della sicurezza, in tutte le sue declinazioni, come fattore di competitività del territorio.

Un altro fattore di cointesto è rappresentato dal fatto che in questi anni è in corso un processo di revisione sostanziale della normativa del settore, sia a livello nazionale con la graduale messa a punto del Dlgs 152/2006, che si pone l'obiettivo di mettere a sistema la pianificazione e la gestione delle diverse componenti ambientali, sia a livello europeo, con la direttiva acque e la direttiva alluvioni.

Le novità apportate riguardano la priorità assegnata alla struttura fisica del territorio rispetto ai confini amministrativi, l'organizzazione del sistema di pianificazione legato alle entità di bacino e sottobacino, lo sviluppo della gestione integrata delle risorse naturali, l'importanza della conoscenza condivisa.

L'ultimo aspetto riguarda la riorganizzazione in una logica federalista del sistema di governo e amministrativo italiano, iniziato alla fine degli anni '90 con la legge Bassanini e tutt'ora in evoluzione.

Là dove esisteva un numero limitatissimo di soggetti statali (Magistrato del Po, Geni Civili, Corpo Forestale dello Stato), si è assistito da prima a un trasferimento alle Regioni e oggi alla distribuzione delle competenze sugli Enti Locali, fatto che comporta la necessità di acquisire nuove competenze, di condividere le conoscenze, di concertare le azioni, ma anche una maggiore opportunità di sviluppare

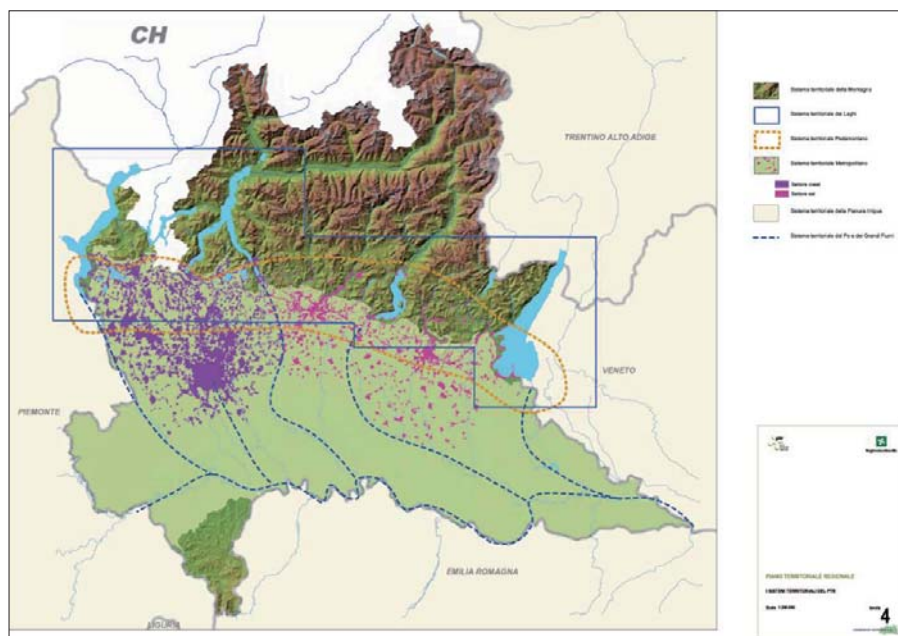


Figura 1 – Sistemi territoriali

soluzioni più organiche ed efficaci, perché intersettoriali.

## LE LINEE DI POLITICA REGIONALE NEL SETTORE

L'azione attivata da Regione Lombardia per la difesa dal rischio idrogeologico è improntata all'integrazione intersettoriale delle politiche attraverso l'attenzione a considerare in modo coordinato gli aspetti geologici, idrogeologici, di qualità delle acque, paesaggistici, al fine di garantire una qualità complessiva del territorio.

Una particolare attenzione viene dedicata alla modulazione delle politiche in funzione delle caratteristiche specifiche del territorio; il riferimento principale è costituito dai sei sistemi territoriali individuati dal PTR, che rappresentano il riconoscimento degli elementi forti che caratterizzano lo sviluppo della Lombardia, e non sono separate da rigidi confini ma si intersecano fra loro in modo dinamico.

Tali sistemi, evidenziati nella Fig. 1, sono:

- Sistema territoriale della Montagna
- Sistema territoriale dei Laghi
- Sistema territoriale Pedemontano
- Sistema territoriale Metropolitan
- Sistema territoriale della Pianura irrigua
- Sistema territoriale del Po e dei Grandi Fiumi

Accanto ai sistemi territoriali, la base per la programmazione delle opere, per la valutazione del rischio, per la definizione delle politiche integrate è rappresentata dai bacini idrografici; con pochissime eccezioni, la val di Lei e il bacino dello Spoel, tutta la Lombardia appartiene al bacino del Po e viene articolata in 7 sottobacini principali come indicato in Fig. 2.

Fra gli strumenti specifici vediamo in prima posizione la valutazione del rischio ai diversi livelli di pianificazione in modo da orientare le scelte di sviluppo secondo criteri di sostenibilità e sicurezza. In particolare in Lombardia tutti gli strumenti urbanistici devono essere accompagnati da uno studio geologico e le scelte di piani devono essere coerenti con le condizioni di fattibilità geologica; tale prassi è stata normata per la prima volta nell'ambito delle azioni del Piano Difesa del Suolo Valtellina, nel 1991; sempre all'inizio degli anni '90 la prescrizione è stata estesa a tutto il territorio regionale e sono stati definiti gli indirizzi metodologici, oggi è parte integrante della legge regionale sul governo del territorio ed è stato elaborato un documento di indirizzi ampio e articolato, che comprende anche la componente sismica.

La realizzazione di opere strutturali per la stabilizzazione dei versanti e la regima-



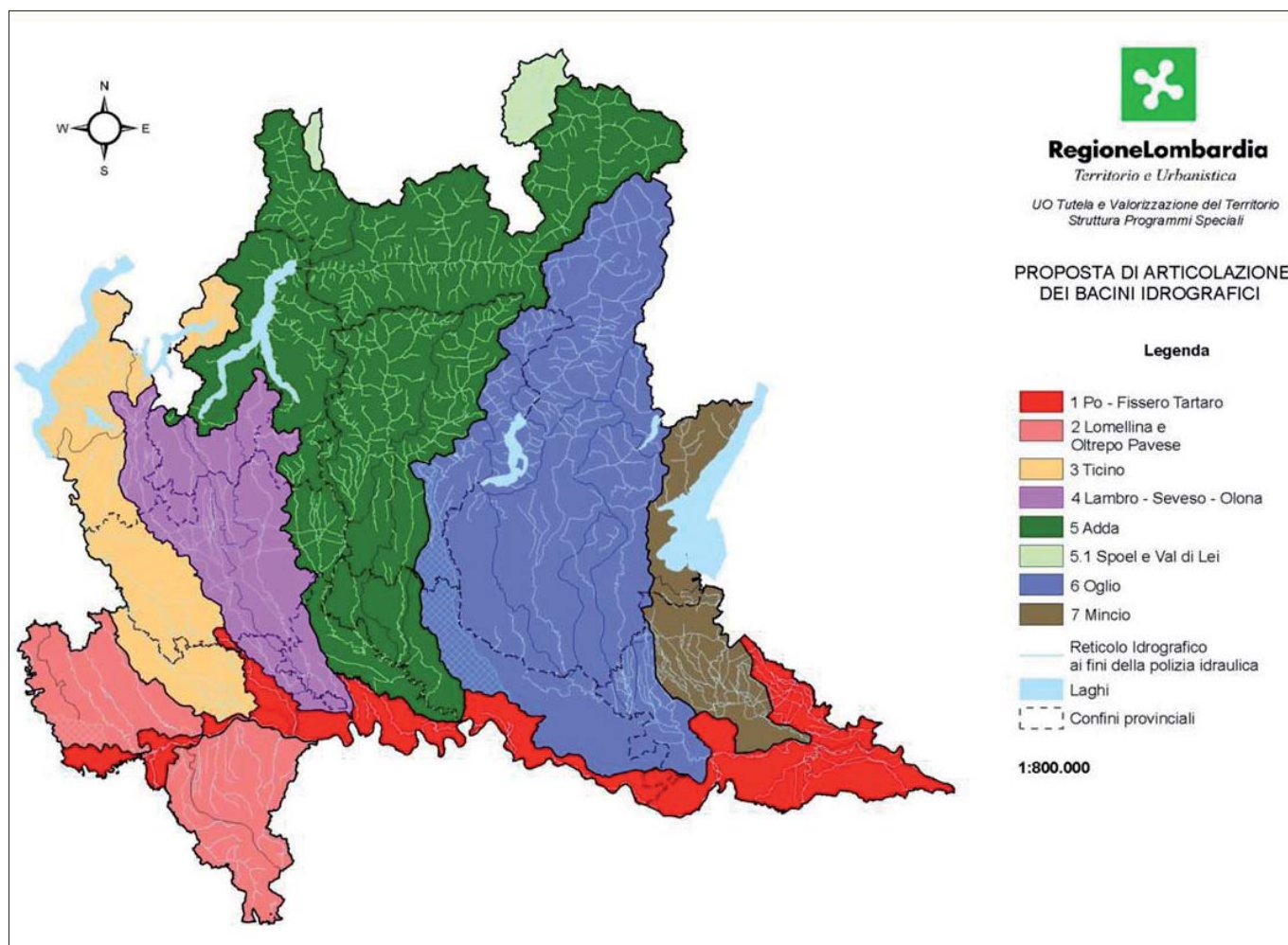


Figura 2 – Bacini idrografici

zione delle acque presenta un'importanza fondamentale ed è oggetto di consistenti investimenti; in questo settore si promuove continuamente l'innovazione, sia attraverso la valorizzazione delle nuove tecnologie e dei materiali sintetici, sia attraverso azioni di elaborazione e diffusione della conoscenza nel settore.

Dall'esperienza maturata negli ultimi vent'anni, sollecitata dalla necessità di affrontare un evento di portata eccezionale come è stata l'alluvione che ha colpito nel 1987 la montagna lombarda, e in modo particolare la Valtellina, è nato un nuovo approccio alla progettazione di queste opere, che non sono più pensate per congelare le dinamiche naturali del territorio, ma per contenerle mitigandone gli effetti.

Un'attenzione particolare viene dedicata al tema della manutenzione, inteso come cura delle opere realizzate, pulizia e mantenimento degli alvei, ma anche e soprattutto come manutenzione del territorio, attraverso la valorizzazione delle attività agroforestali, la promozione della filiera boscolegno, il finanziamento diretto di interventi di manutenzione territoriale diffusa.

Tale aspetto è particolarmente importante nelle aree montane dove l'abbandono del territorio è stato seguito da un aumento dei

fenomeni di dissesto capillari e di piccola dimensione, che rappresentano comunque un rischio significativo anche a causa della loro imprevedibilità puntuale.

Un'altra azione significativa riguarda la realizzazione di un sistema stabile di monitoraggio dei dissesti principali, soprattutto per le frane di maggiore dimensione che non possono essere arrestate, e con le quali è quindi necessario convivere. Il Centro Monitoraggio nato in Valtellina è ora affidato ad ARPA Lombardia e consente di tenere sotto controllo diverse frane nell'area alpina e prealpina, al fine di prevederne il movimento e attivare, se necessario, le misure di emergenza a tutela della popolazione.

Gli ambiti idrici sono ecosistemi complessi che rispondono a tutte le sollecitazioni determinate dalla pressione antropica; per ottenere risultati effettivi di miglioramento della qualità delle acque, dell'equilibrio idraulico e della qualità ambientale complessiva occorre operare in modo organico sviluppando le sinergie fra le azioni intraprese e valutando le ricadute degli interventi sull'equilibrio complessivo.

Politica delle aree dismesse; una grande opportunità di riequilibrio dell'assetto idraulico e idrogeologico è offerta dalla presenza in Lombardia di grandi aree già urbanizzate in

cui sono venute meno le funzioni per le quali erano state realizzate e si deve oggi affrontare il processo di recupero e riqualificazione. È quindi possibile porre rimedio a diverse situazioni in cui lo sviluppo urbanistico rapido e a volte disordinato aveva invaso spazi esposti a condizioni di rischio significative o necessari per l'equilibrio idraulico del territorio, attraverso un attento orientamento della progettazione delle nuove destinazioni d'uso di queste aree.

## IL RISCHIO DI SPROFONDAMENTI IN LOMBARDIA

I fenomeni di sprofondamento in Lombardia non sono frequenti e ancor meno lo sono le manifestazioni che comportano un rischio per insediamenti e infrastrutture; tuttavia la bassa prevedibilità degli eventi e la complessità progettuale e realizzativa degli interventi di mitigazione del rischio rendono necessaria una particolare attenzione, sia in fase di pianificazione dello sviluppo insediativo sia in fase di progettazione di edifici e infrastrutture.

Per quanto riguarda i fenomeni di sprofondamento legati alla presenza nel sottosuolo di rocce solubili, possiamo ricordare il caso degli abitati di Volpino e Castelfranco, borghi storici della bassa Valcamonica, costruiti su

una lente di anidrite di età anisica all'interno di una formazione evaporitica (Carniola di Bovegno); qui all'elemento naturale si è associata l'azione antropica e in occasione della realizzazione di un galleria stradale si sono manifestate importanti lesioni agli edifici.

Un altro caso riguarda il Comune di Esine, sempre in Valcamonica, dove da oltre 250 anni sono segnalati cedimenti, formazione di doline, spesso colmate d'acqua, dovute a sprofondamenti del terreno alluvionale a sua volta richiamato da crolli di cavità sotterranee in rocce evaporitiche localizzate in profondità (anche oltre 100 metri sotto il materasso alluvionale del conoide del torrente Grigna). Non per niente la località di Esine soggetta a questa tipologia di fenomeni prende il nome di zona "Laghetti".

L'altra tipologia rilevante è legata alla presenza di cave e miniere sotterranee, che diventano particolarmente pericolose dopo l'abbandono dell'attività estrattiva, a seguito del progressivo degrado dei pilastri naturali e delle opere di sostegno; qui il parametro particolarmente delicato riguarda la previsione dell'evoluzione nel tempo delle condizioni di stabilità, come nel caso di Campo Frascia, in

Comune di Lanzada (SO) Si tratta di voragini e sprofondamenti, noti da tempo, che si sono formati a seguito delle escavazioni di talco e steatite in filoni all'interno delle formazioni delle pietre verdi della Valmalenco. I fenomeni in superficie sono imponenti e ben visibili e la presenza di antichi livelli di miniera abbandonati e più superficiali ha creato anche qualche problema di instabilità delle pareti rocciose del monte Ciudè, che è stato monitorato per diversi anni al fine di prevenire eventuali crolli che possano interessare la strada di accesso a tale località ed il fondovalle di Lanzada.

La valutazione delle condizioni di rischio e l'attuazione di un intervento di messa in sicurezza particolarmente delicato e attuato grazie a metodologie di studio e soluzioni operative assolutamente innovative è illustrato con riferimento al caso di Santa Brigida (BG).

Un fenomeno molto particolare, noto in Lombardia con il nome di "Occhi Pollini"; è caratterizzato dalla presenza all'interno di depositi prevalentemente ghiaiosi e sabbiosi di origine fluvioglaciale di cavità di dimensioni variabili da alcuni decimetri a diversi metri, ed è diffuso in particolare nella fascia pedemontana fra Ticino e Adda. L'origine di queste

cavità non è unica: alcune sono dovute alla dissoluzione del cemento e dei ciottoli di natura carbonatica all'interno di conglomerati olocenici, altre a fenomeni di piping con dilavamento delle frazioni fini, altri ancora sono attribuiti alla formazione di lenti di ghiaccio quando la zona era caratterizzata da condizioni periglaciali. Date le dimensioni abbastanza ridotte non danno luogo a fenomeni eclatanti, ma possono creare seri problemi di cedimento di parti di manufatti, con danni anche significativi; per questo motivo occorre dedicare molta attenzione alla loro identificazione in sede di caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione e adeguare di conseguenza le scelte relative alla tipologia di fondazioni.

### IL CASO DI SANTA BRIGIDA

In questa sede verrà illustrato in particolare l'intervento di consolidamento della miniera di gesso abbandonata di Santa Brigida, in alta val Brembana (Bergamo) (Fig. 3); il fattore di rischio in questo caso è determinato dalla presenza di due livelli allagati, siti immediatamente a monte dell'abitato; in caso di crollo si verificherebbe l'espulsione di acque in pressione verso le case.

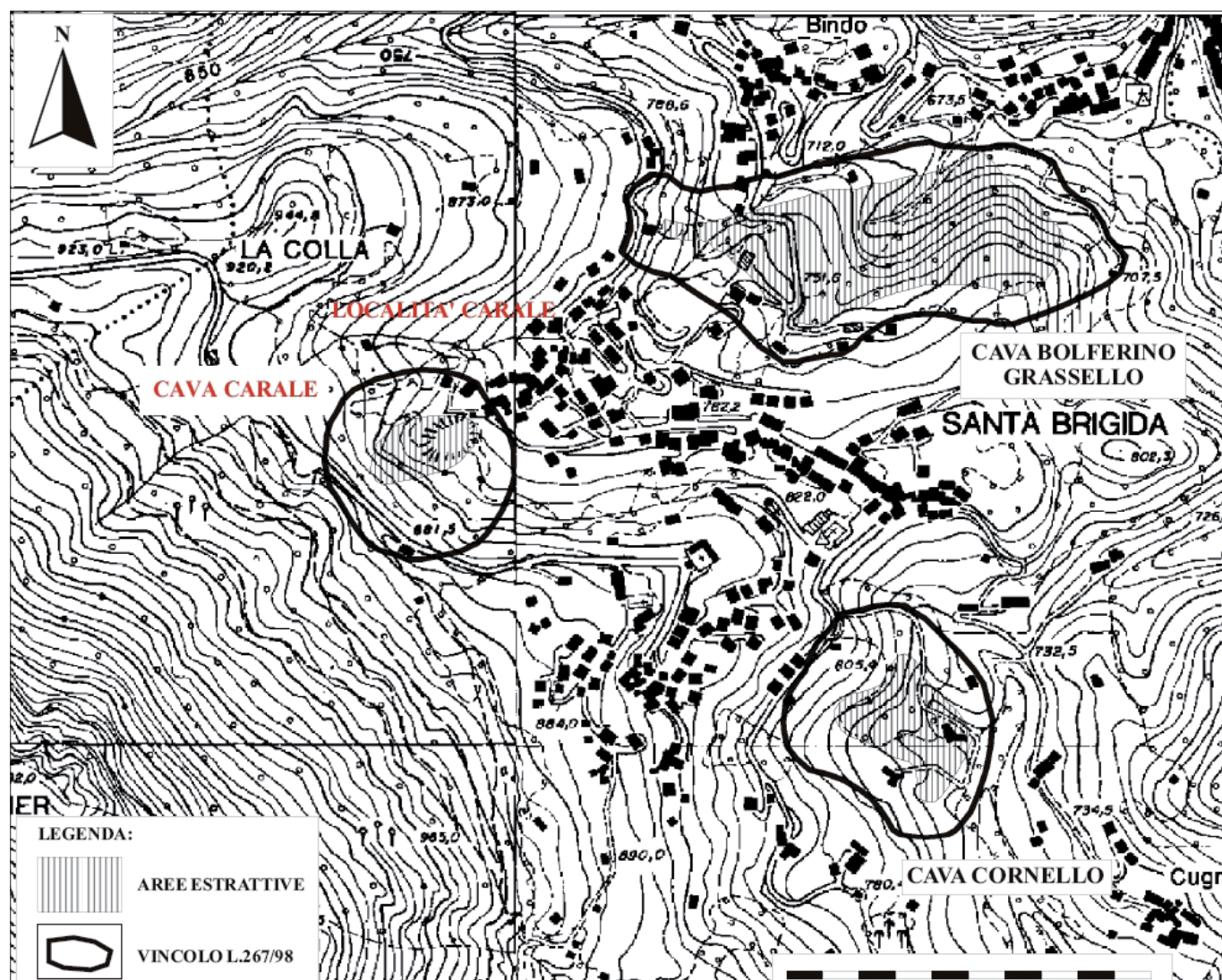


Figura 3 – Ubicazione

Il caso di Santa Brigida ha rappresentato un banco di prova, oltre che sul versante scientifico e tecnologico, anche sul fronte delle modalità di interazione fra soggetti diversi.

L'interesse istituzionale di Regione Lombardia si pone su due piani; acquisire e diffondere best practices nel settore della difesa del suolo, per migliorare l'efficienza e l'efficacia dell'azione pubblica del settore; favorire la collaborazione fra i diversi soggetti coinvolti, in una logica di sussidiarietà ed integrazione fra le componenti scientifiche, tecniche, amministrative, operative, in un contesto in cui la qualità progettuale e l'attenzione agli aspetti di sostenibilità economica sono sempre più necessarie.

stellanza, alla cui presentazione si rimanda per la modellistica sui materiali e sulla previsione del collasso, e con il Dipartimento di Chimica, Minerali e Ingegneria Chimica, nelle persone del Prof. Ing. Luca Bertolini e del Dott. Ing. Maddalena Carsana; e il mondo delle imprese, con le diverse ditte che hanno assunto l'appalto dei diversi lotti e che hanno contribuito in misura significativa alla messa a punto delle tecniche operative di cantiere; la cooperazione fra questi attori ha consentito reperire i fondi necessari, di gestire in modo rapido le procedure amministrative, di mettere a punto i modelli teorici, individuare le soluzioni progettuali e metterle a punto in corso d'opera, realizzando e modificando anche un impianto ad hoc.

fino agli anni Settanta, da una intensa attività estrattiva, inizialmente di gesso e successivamente anche di anidrite.

L'escavazione avveniva inizialmente all'aperto e poi passava in galleria. La tecnica adottata in sotterraneo era del tipo camere e pilastri: i livelli erano fino a 5 e raggiungevano profondità di oltre 40-50 m dal p.c.

Le gallerie avevano notevoli dimensioni (circa 6 m x 6 m) ed erano sostenute da pilastri di dimensioni analoghe.

Il territorio di Santa Brigida ha una natura geologica ed idrogeologica estremamente delicata (Fig. 4): il sottosuolo è costituito da un giacimento evaporitico composto da gessi ed anidriti (Formazione di San Giovanni Bianco),

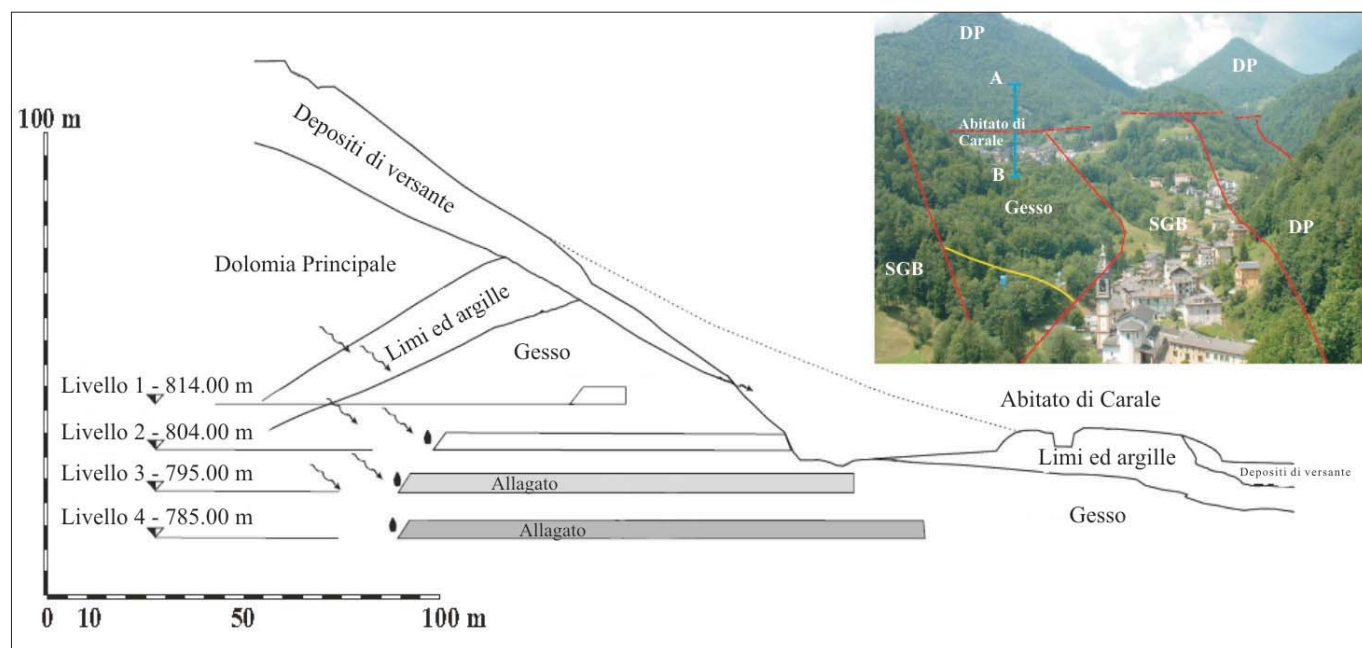


Figura 4 – Sezione e schema geologico

Il modello di cooperazione ha una connotazione fortemente sussidiaria: ha infatti visto il coinvolgimento e l'assunzione di iniziativa da parte di una pluralità di attori che si sono adoperati ciascuno secondo la propria competenza e specificità di ruolo ma nello stesso tempo in una logica di collaborazione che ha portato ciascuno a essere coinvolto con il progetto complessivo per trovare una soluzione praticabile ed economicamente sostenibile a un problema complesso in assenza di modelli di riferimento.

Questi attori, visti in opera nel caso di Santa Brigida, comprendono la Pubblica Amministrazione, Comune, Provincia, Regione Lombardia e Ministero dell'Ambiente, i professionisti incaricati dello studio e della progettazione: Studio Associato di Geologia Spada, nelle persone del Dott. Geol. Mario Spada, del Dott. Geol. Gian Marco Orlandi e della Dott. Geol. Susanna Bianchi, il mondo dell'Università: Politecnico di Milano, con il Dipartimento di Ingegneria Strutturale, nelle persone del Prof. Ing. Roberto Nova e del Dott. Ing. Riccardo Ca-

Si tratta di un'esperienza praticamente unica a livello mondiale; in letteratura è stato possibile trovare solo la descrizione di due casi che presentano forti analogie con il caso di studio presentato in questo convegno: si tratta di due esperienze effettuate in Giappone da Sakamoto et. al. (2006). Anche nei casi giapponesi si è in presenza di cavità nel sottosuolo invase dall'acqua e si è proceduto al riempimento con miscele iniettate dalla superficie; è diverso il tipo di deposito sfruttato dalla coltivazione mineraria, in quanto si tratta di lignite che non presenta le caratteristiche di solubilità che hanno reso così complesso il caso di Santa Brigida e la morfologia dell'area interessata, qui montana mentre in Giappone si tratta di aree prevalentemente pianeggianti, rappresenta un ulteriore fattore di maggiore complessità sia a livello di valutazione dei rischi sia nelle fasi di gestione delle attività di cantiere.

#### INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA

Il territorio di Santa Brigida è stato interressato, a partire dagli ultimi anni del 1800

in contatto tettonico con rocce carbonatiche (Dolomia Principale).

L'attività estrattiva in sotterraneo ha rotto la zona di contatto impermeabile tra carbonati ed evaporiti: le acque che uscivano a giorno con sorgenti sono state drenate all'interno del giacimento stesso.

Questa situazione, ha accelerato in modo esponenziale e progressivo i fenomeni di alterazione e dissoluzione, in precedenza limitati.

La situazione a maggior rischio è quella della ex Cava Carale, per la presenza dell'abitato omonimo immediatamente a valle e della strada provinciale ubicata a monte. In questo cantiere l'estrazione è avvenuta su quattro livelli, di cui tre al di sotto della superficie di falda, per cui l'acqua veniva pompata fuori durante i lavori.

Il cantiere è stato chiuso alla fine degli anni Sessanta e la situazione si è aggravata nel tempo, dato che i due livelli inferiori sono ancora completamente allagati per un volume dell'ordine di 60.000-70.000 mc.

## METODOLOGIA DI LAVORO

Le fasi iniziali del lavoro hanno previsto una serie di indagini e verifiche geologiche ed idrogeologiche.

Si è poi proceduto ad una intensa campagna di laboratorio (Fig. 5) sulle caratteristiche del gesso e dell'anidrite, con particolare riferimento ai fenomeni di degrado; questa fase ha lo scopo di mettere a punto un modello

e di consolidare nel tempo per sostenere le cavità stesse.

È stato quindi necessario procedere alla progettazione di una miscela specifica, con caratteristiche tecniche molto precise ed entro stretti vincoli economici, nonché alla messa a punto di un'impiantistica e di una metodologia di cantiere totalmente nuova per realizzare l'intervento.

## STUDI SULLA MISCELA DI RIEMPIMENTO

Il riempimento delle gallerie (Figg. 6, 7 e 8) è ostacolato dalla inaccessibilità dei tre livelli inferiori a causa del loro allagamento, del degrado che hanno subito le pareti delle gallerie e del materiale fangoso che si è conseguentemente depositato sul fondo. L'unica soluzione praticabile per il riempimento delle gallerie è l'introduzione dalla superficie



Figura 5 – Tavolo con provini; degrado gesso ed anidrite

per stimare i tempi di collasso delle gallerie basandosi su una vasta e puntuale sperimentazione dell'incidenza delle condizioni ambientali, con particolare riferimento alla presenza di un flusso idrico, sul comportamento dei materiali naturali (gesso e anidrite) che costituiscono i pilastri; di sviluppare un modello per valutare le modalità e gli effetti di un eventuale collasso; di fornire indicazioni in merito alle caratteristiche geotecniche minime di eventuali materiali di riempimento.

Al termine di tutte queste analisi è stata definita l'idea progettuale per il consolidamento: riempire le cavità con iniezione di miscele cementizie fluide dall'esterno, in grado di sostituire l'acqua, per rallentare il degrado,

La messa a punto della miscela è stata curata con un'ampia campagna di prove di laboratorio. Il passo finale è stato quello di trasporre le esperienze di laboratorio alla scala del cantiere, realizzando un'impiantistica che fosse in grado di riprodurre una miscela con le stesse caratteristiche di quelle studiate e che consentisse una gestione operativa ed economica corretta del cantiere.

Dovevano inoltre essere attuate tutta una serie di controlli e di monitoraggi, sia sulla qualità delle miscele, che sui fattori ambientali, per verificare e validare le opere in atto.

Proprio queste fasi operative hanno rappresentato per i Progettisti e Direttori Lavori delle opere, la sfida di maggiore complessità.

esterna (Fig. 6a) di un materiale fluido che possa successivamente far presa, indurire e mantenersi stabile anche a contatto con una soluzione di solfati.

La tubazione di pompaggio deve poter essere calata fino al fondo della galleria, per far in modo che il materiale fluido crei un cumulo che si accresce dal fondo della galleria e allontani l'acqua che riempie le gallerie, senza miscelarsi con essa (Fig. 6b). La miscela deve avere una elevata fluidità che deve essere mantenuta nel tempo per consentire al materiale già iniettato di spostarsi sotto l'azione del materiale successivamente introdotto dal fondo. Quando la fluidità della miscela diminuisce e non consente più l'iniezione di

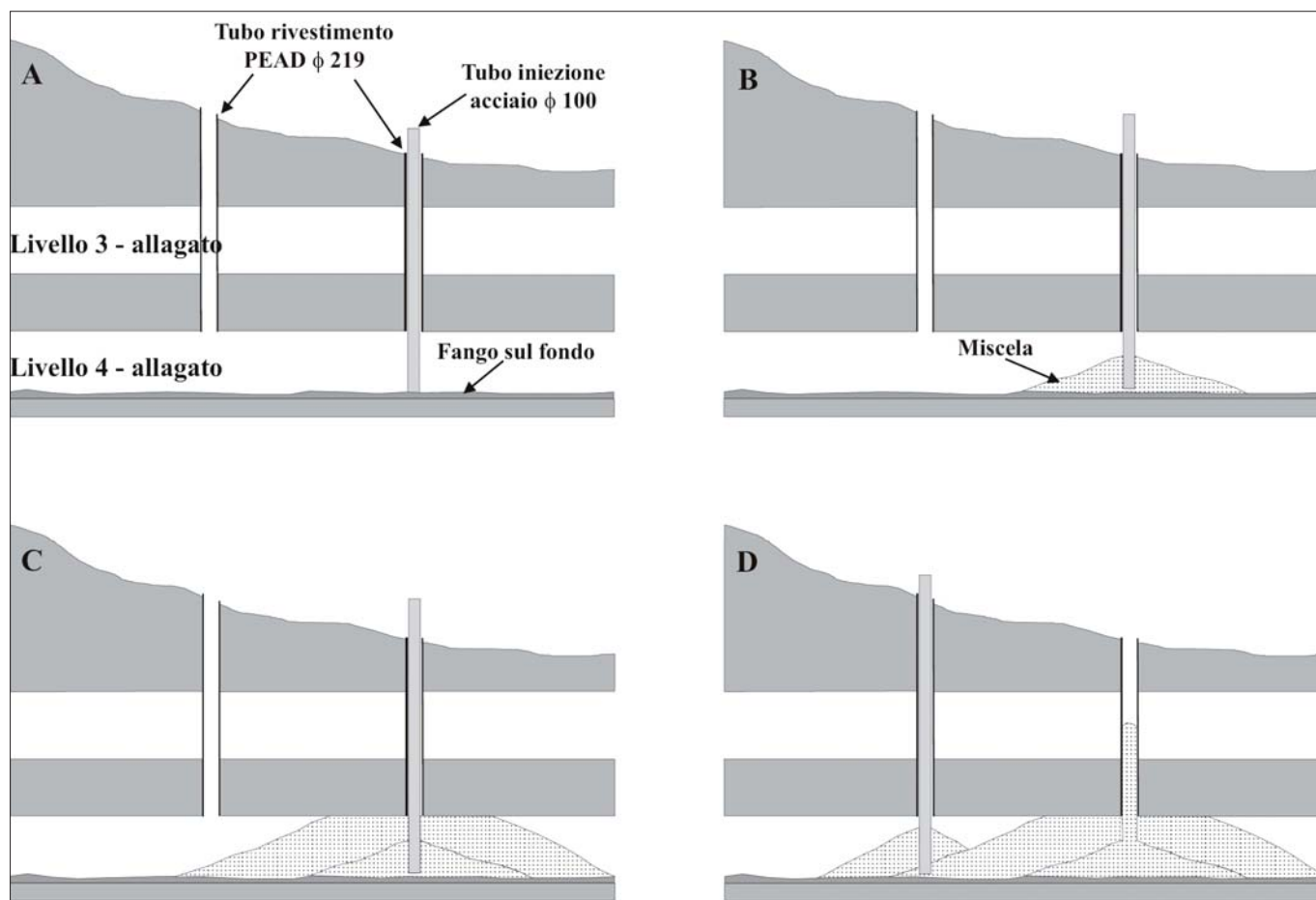


Figura 6 – Schema fasi di riempimento



Figura 7 – Impianto di cantiere

nuovo materiale, è necessario passare ad un altro foro di iniezione (Fig. 6c). Oltre ad essere colabile, coesiva e stabile a contatto con l'acqua solfatica, la miscela deve, una volta che ha fatto presa ed è indurita, essere stabile a contatto con le acque solfatiche e garantire

una resistenza a compressione dell'ordine di 0.5-1 MPa.

La necessità di avere un materiale fluido che successivamente indurisce, ha reso praticabile solo il ricorso a materiali cementizi. Per minimizzare i costi del materiale di riem-

pimento e garantire una maggiore stabilità al contatto con l'acqua si è deciso di considerare miscele cementizie ottenute con aggiunta di terreno (ACI, 1997, Sakamoto, 2005) e un ridotto contenuto di cemento. Si sono utilizzati terreni prevalentemente limosi-argillosi che

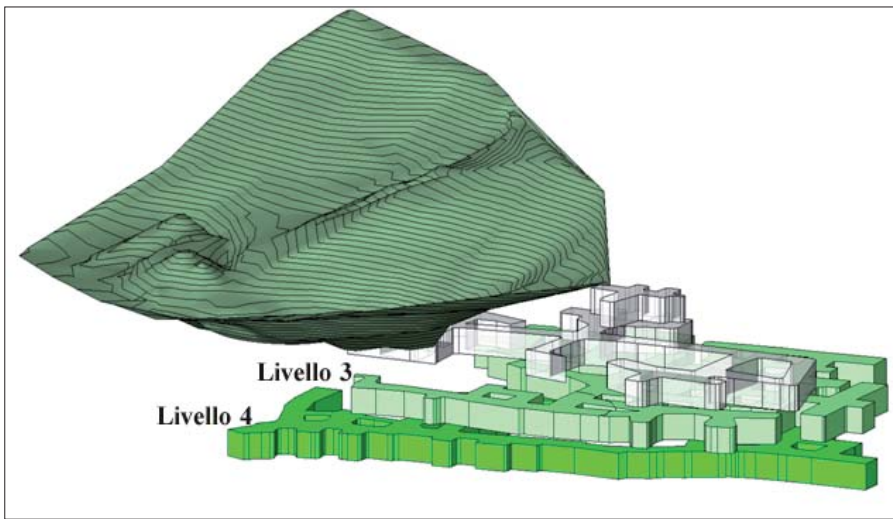


Figura 8 – Riempimento alla fine del lotto 4

si distinguono dalle sabbie per il fatto che, quando sono miscelati con acqua, sono caratterizzati da forze coesive che tengono insieme le particelle. Un contenuto di acqua modesto dà luogo ad un impasto plastico, ma non certo fluido e inadeguato all'esigenze di colabilità nell'operazioni di riempimento delle gallerie. Tuttavia, aumentando il dosaggio di acqua e rimaneggiando il terreno con un'energica miscelazione che sminuzzi le particelle di argilla e le faccia entrare in intimo contatto con l'acqua, è possibile ottenere miscele fluide molto stabili. Nel tempo, l'idratazione del cemento consente all'impasto di far presa (divenendo un materiale solido).

#### LA REALIZZAZIONE DELL'INTERVENTO

La trasposizione in cantiere delle esperienze di laboratorio è stata complessa ed ha comportato la realizzazione di un'impiantistica in grado di riprodurre le caratteristiche tecniche della miscela e di contenere al massimo i costi.

Dal momento che vi erano esperienze precedenti la soluzione è stata testata attraverso la realizzazione di un intervento pilota a carattere sperimentale, per cui è stato necessario strutturare il cantiere come un "campo prove".

Sono stati realizzati i fori (tubo in PEAD  $\phi$ est 250 mm e profondità da 20 a 25 metri circa da p.c.) con una maglia regolare, con una distanza media di 10 metri: alcuni fori sono stati utilizzati per l'iniezione e gli altri per controllare sia il raggio di influenza dell'iniezione che l'addensamento della miscela nel tempo.

L'impianto di cantiere è stato creato appositamente, sulla scorta delle indicazioni di laboratorio ed in modo da consentire una corretta produttività, per la sostenibilità economica dell'intervento.

Il materiale utilizzato è stato il seguente: terreni limoso-argillosi di recupero da scavi locali, acqua solfata prelevata direttamente dalle gallerie e cemento Portland ( $150 \text{ kg/m}^3$  di miscela). Il tutto veniva prelaborato, miscelato e mescolato secondo passaggi successivi per

ottenere una miscela fluida ed in grado di consolidare nel tempo ( $R_c > 1 \text{ MPa}$  a 28 giorni). Il tutto ad un costo omnicomprensivo di  $30 \text{ €/m}^3$ .

La fase più complessa della miscelazione è stata quella di prelaborazione del materiale, cioè dei trattamenti a cui sottoporre i terreni prima di immetterli nella vasca di miscelazione, per evitare la formazione di grumi. Dopo varie prove si è creata una vasca in terra, in cui due escavatori mescolavano i terreni con acqua, in modo da creare una miscela omogenea che veniva poi facilmente lavorata nella vasca di fluidificazione.

Per la fase di iniezione sono stati adottati una serie di accorgimenti: l'iniezione è avvenuta sempre dal fondo e la testa della tubazione è stata tenuta immersa all'interno del materiale stesso, per evitare la separazione in acqua dei diversi componenti e per permettere al materiale di percorrere la massima distanza possibile; la colonna di iniezione veniva fatta risalire lentamente solo quando la massa perdeva in termini di consistenza; il materiale è stato pompato senza alcuna pressione e la mobilità era garantita dalla fluidità. Il materiale si è espanso nelle cavità estrattive per oltre 20 metri da ogni foro e nei fori intermedi tra quelli utilizzati per le iniezioni si è osservata una risalita delle miscele, a conferma del riempimento totale della zona.

Al fine di verificare i risultati dell'intervento campione sono state effettuate delle campagne sistematiche d'indagine, che hanno compreso:

- *Indagini geofisiche* (tomografia elettrica 3D) per investigare in ampio la zona iniettata, individuare il riempimento e valutare la presenza di vuoti consistenti. Le indagini non hanno evidenziato vuoti.
- *Sondaggi a carotaggio con prelievo campioni*. Lo scopo era duplice: verificare direttamente il grado di riempimento e campionare il materiale per le prove di laboratorio. I sondaggi sono stati eseguiti tra i fori di iniezione, per investigare le

situazioni più critiche. Il grado di riempimento è risultato totale in tutte le sezioni investigate ed il materiale, visivamente, si presentava consolidato ed omogeneo.

- *Analisi e prove di laboratorio sui campioni di miscela*: i campioni di miscela prelevati in sondaggio sono stati sottoposti, presso il laboratorio di meccanica dei terreni del Politecnico di Milano a prove di caratterizzazione, di compressione monoassiale e, soprattutto, a prove edometriche, per ricavare i parametri di rigidità, deformabilità e permeabilità.

#### CONCLUSIONI

Le verifiche effettuate sull'intervento pilota hanno permesso di stabilire che la soluzione tecnologica messa a punto risponde alle esigenze di messa in sicurezza che il sito di Santa Brigida presenta. Il materiale è defluito nelle cavità, senza subire dilavamenti da parte dell'acqua presente, e le ha riempite completamente; le caratteristiche meccaniche e di permeabilità sono risultate adeguate e permettono di ridurre in modo efficace i cedimenti, diluendoli nel tempo, ed eliminando il rischio di un collasso catastrofico. I costi d'intervento sono decisamente contenuti, mantenendosi dell'ordine dei  $30 - 40 \text{ €}$  per ogni metro cubo di materiale iniettato.

Al termine dell'intervento pilota, visto l'esito positivo della sperimentazione, Regione Lombardia e Ministero dell'Ambiente hanno messo a disposizione le risorse finanziarie per proseguire con la messa in sicurezza del sito minerario, sviluppata per successivi lotti funzionali; a oggi è stato realizzato il riempimento di circa  $13.000 \text{ mc}$  di gallerie e sono in corso di realizzazione i lavori per altri  $15.000$ , a fronte di un totale di circa  $65.000$ . La spesa complessiva è di  $3 \text{ milioni €}$ .

Si ritiene inoltre che la soluzione adottata, fortemente innovativa, possa essere applicata in altre situazioni con notevoli vantaggi. In particolare, in termini di know how trasferibile, la sperimentazione di Santa Brigida ha permesso di ottenere:

- una serie di modelli per la valutazione della perdita di capacità portante dei pilastri e per la predizione delle modalità e dei tempi di collasso di una miniera abbandonata,
- una soluzione innovativa per quanto riguarda la predisposizione e l'iniezione di una miscela adatta a riempire i vuoti, anche in presenza di acqua, e con costi ragionevoli,
- soluzioni impiantistiche e di processo per la lavorazione in cantiere, un modello di collaborazione fra Pubblica Amministrazione, Università, Professionisti e Imprese che ha permesso di sviluppare la soluzione e metterla in atto.

# Risposta sismica locale in aree con presenza di cavità

TITO SANÒ  
Consulente del Dipartimento Nazionale della  
Protezione Civile

55

## SOMMARIO

In questo rapporto è studiato l'effetto delle cavità sotterranee sulla risposta sismica locale in presenza di onde piane di volume e di superficie. La soluzione numerica è ottenuta mediante il metodo degli elementi di contorno con il programma BESOIL (Sanò, 1996), che permette l'analisi bidimensionale con qualsiasi angolo di incidenza delle onde, sia di volume, sia di Rayleigh, e geometria arbitraria della cavità e della superficie del terreno. Sono esaminati i parametri principali che governano il fenomeno dell'amplificazione e forniti i criteri per determinare l'importanza degli stessi. Alla fine è riportato, per esempio, l'esame di una cavità realistica, e quindi di forma irregolare, al variare sia della profondità sia delle dimensioni della stessa.

## 1. INTRODUZIONE

A seguito di terremoti distruttivi è frequente osservare distribuzioni anomale del danneggiamento alle costruzioni, con forti differenziazioni fra zone contigue anche di dimensioni piccole. Tali anomalie sono in generale da mettere in relazione con una va-

rietà di cause, spesso concomitanti, tra cui la differente vulnerabilità intrinseca delle costruzioni, le diversità delle caratteristiche dinamiche medie delle tipologie edilizie prevalenti, ma la causa principale è spesso dovuta alle modificazioni delle caratteristiche del moto al suolo indotte da condizioni geologiche e geomorfologiche locali. La risposta locale è il risultato di interazioni molto complesse tra le onde sismiche e le condizioni locali, cioè l'insieme delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche di depositi di terreno ed ammassi rocciosi e delle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono. Essa rappresenta un elemento importante e, spesso, fondamentale nella caratterizzazione del moto sismico. Già da parecchi anni si è cercato di studiare l'effetto delle cavità sul moto sismico a partire dai lavori di Pao e Mow, 1973. Dravinski (1982, 1983) ha fatto una revisione dei lavori relativamente all'effetto delle irregolarità sotterranee. Lee (1988) ha affrontato in particolare l'effetto delle cavità sferiche, mentre altri studi, ben più numerosi, si sono concentrati sulle cavità cilindriche spinti

spesso dalle esigenze pratiche di studiare le sollecitazioni su tunnel e strutture metropolitane sotterranee. Si riportano i riferimenti solo di alcuni dei numerosi lavori in questo campo: Lee & Karl, 1992; Moore and Guan, 1996; Rodriguez-Castellanos *et al.*, 2006; Sanò *et al.*, 2008; I. Liao *et al.*, 2008; Smerzini *et al.*, 2009. Ultimamente, in seguito del terremoto de L'Aquila del 2009, nella cui area epicentrale è stato rilevato un gran numero di cavità, sono incominciati degli studi di amplificazione sismica; si citano i lavori di Paolucci *et al.*, 2010 e di Rotili, 2010.

In questo rapporto si affronta il problema della risposta sismica locale in presenza di cavità sotterranee puntando l'attenzione sulla propagazione delle onde sismiche ed ignorando i problemi della resistenza e del collasso delle cavità stesse che richiedono una lunga trattazione (vedi 'RELUIS-DPC-Linea di ricerca n.6- Geotecnica Sismica- Costruzioni in Sottterraneo, Gallerie e Caverne in Roccia').

Sono affrontati i seguenti aspetti:

- Il fenomeno generale dell'amplificazione sismica locale
- Aspetti normativi.

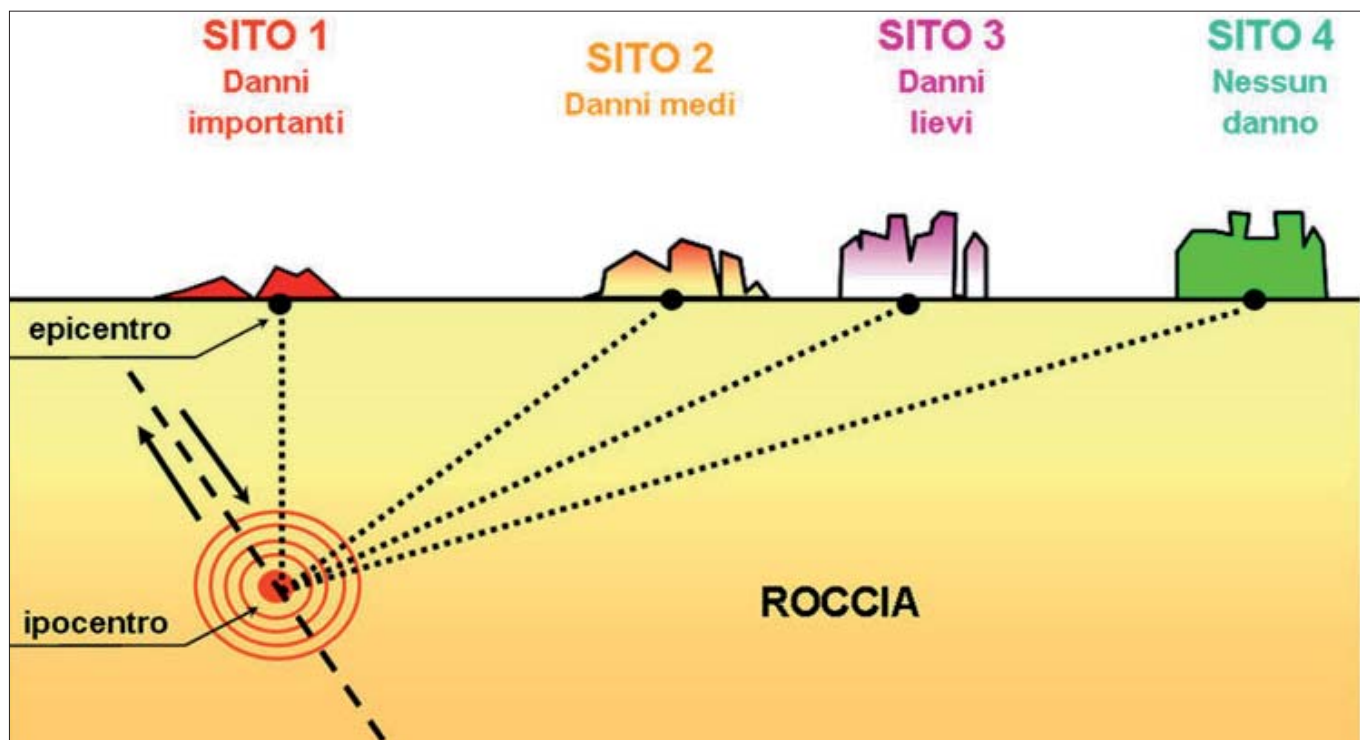


Figura 1 – Rottura della crosta terrestre e generazione delle onde sismiche

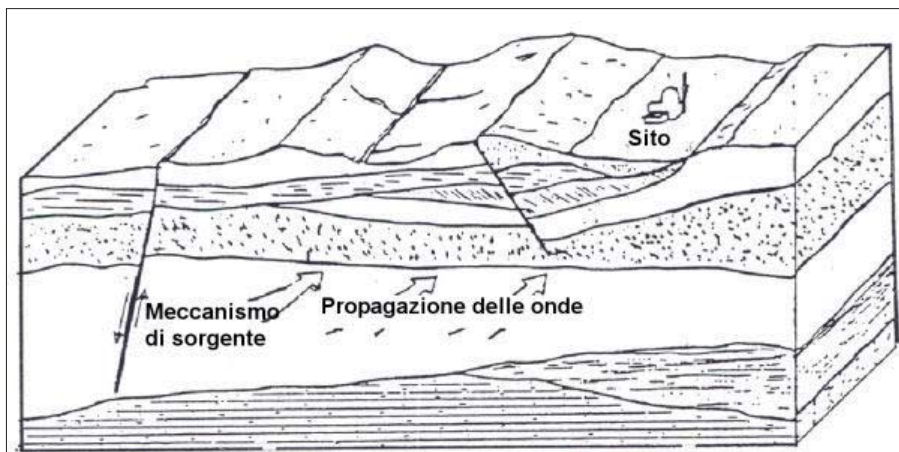


Figura 2 – condizioni reali di propagazione delle onde sismiche

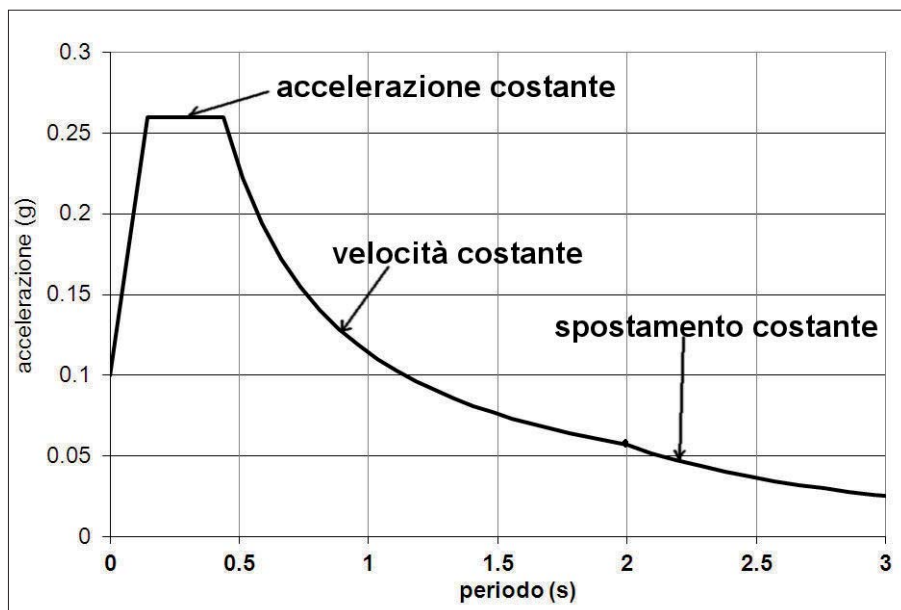


Figura 3 – Forma dello spettro di risposta della normativa su terreno rigido (tipo A) con accelerazione orizzontale massima 0.1g

- Descrizione del fenomeno e dei parametri che più influenzano l'amplificazione.
- Esempi di amplificazione su di un caso reale.

## 2. AMPLIFICAZIONE SISMICA LOCALE

Un terremoto è causato, come è noto, da un processo di rottura fragile delle rocce cristalline che trasforma in energia cinetica, mediante produzione delle onde sismiche verso l'esterno, parte dell'energia di deformazione lentamente accumulatasi in precedenza a seguito di movimenti differenziali di parti della litosfera. Le onde così generate comportano una perturbazione dello stato di quiete del materiale circostante e si propagano in forme e proprietà a seconda delle caratteristiche meccaniche dei materiali attraversati. Nel caso di un ipotetico terreno piano ed omogeneo, come raffigurato nella figura 1, il moto in superficie dipende essenzialmente dal tipo di rottura del terreno, quindi dalla sua geometria e dalle caratteristiche meccaniche del terreno stesso, e dalla distanza dalla sorgente. Nelle condizioni reali, mostrate nella figura 2, il territorio può essere rappresentato come un

insieme di formazioni superficiali, interessate dai loro fenomeni evolutivi tipici, poggiati su formazioni più profonde, i cui andamenti possono essere stati resi complessi fino alla creazione di affioramenti dai fenomeni tettonici ed orogenetici. Prevalentemente, le formazioni profonde sono costituite da rocce ignee o metamorfiche di origine sedimentaria, mentre quelle superficiali sono di natura sedimentaria più recente, coerenti od incoerenti, e quindi di caratteristiche meccaniche ben differenziate rispetto alle prime. Le onde sismiche che si sono generate in profondità subiscono una serie di modificazioni ulteriori (riflessioni e rifrazioni) nell'attraversare la crosta terrestre e giungere fino alle formazioni di base per il sito. Ad una certa distanza dall'epicentro il moto sismico appare come un fronte d'onda uniforme propagantesi dal basso verso l'alto, con una certa angolazione rispetto alla verticale, che viene trasmesso dalle formazioni di base a quelle superficiali. Il moto al suolo tende a non dipendere più solamente dal tipo di rottura della sorgente, ma sempre di più dalle caratteristiche meccaniche e geometriche degli strati di terreno più

superficiali. Tutto ciò comporta una non omogeneità del moto vibratorio in superficie che può cambiare da punto a punto anche a breve distanza. Al variare delle condizioni locali, il moto alla superficie risulta quindi differente per l'ampiezza, il contenuto in frequenza e la durata. Si osserva che tutti e tre questi caratteri sono significativi e concorrono a causare il danneggiamento delle strutture e l'instabilità dei terreni (frane, cedimenti, liquefazioni). Le onde di volume provenienti dalla sorgente, arrivate in superficie possono trasformarsi parzialmente in onde di diverso tipo ed in particolare in onde superficiali chiamate così perché viaggiano in superficie attenuandosi rapidamente con la profondità.

Il problema dell'amplificazione sismica locale consiste nel determinare sulla superficie del sito in esame il moto sismico una volta noto il moto proveniente dalla stessa sorgente su un ipotetico terreno rigido e pianeggiante nello stesso luogo.

## 3. ASPETTI NORMATIVI

Le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008) contemplano i fenomeni di amplificazione del moto sismico nella definizione stessa delle azioni sismiche di progetto, attraverso cui progettare o valutare la resistenza delle strutture. Sono definiti per ogni punto del territorio italiano, quindi per ogni comune, i parametri dello spettro di risposta su terreno rigido piano affiorante (moto di riferimento) a seconda della probabilità dell'evento sismico. La forma dello spettro di riferimento è mostrata nella figura 3. Come si vede esso è formato da un tratto lineare ascendente, da un tratto ad accelerazione costante (plateau) e da due altri discendenti, il primo come  $1/T$  (a velocità costante) ed il secondo come  $1/T^2$  (a spostamento costante). Il valore di accelerazione iniziale, corrispondente a  $T=0$ , è uguale all'accelerazione di picco del terreno.

La normativa non fornisce direttamente lo spettro di risposta su terreni che non siano piani e rigidi, ma dice: *'Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi, .... In assenza di tali analisi, per la definizione dell'azione sismica si può fare riferimento a un approccio semplificato.'* L'approccio semplificato riguarda solo la definizione dei fattori di amplificazione a seconda del tipo di terreno (classificato in A,B,C ecc) oppure la topografia e non contempla il caso di cavità. È necessario quindi in questo caso ricorrere ad analisi specifiche di amplificazione sismica locale rispetto allo spettro su suolo rigido che necessariamente non sono convenzionali, cioè con propagazione monodimensionale, in quanto richiedono analisi numeriche in campo bi o



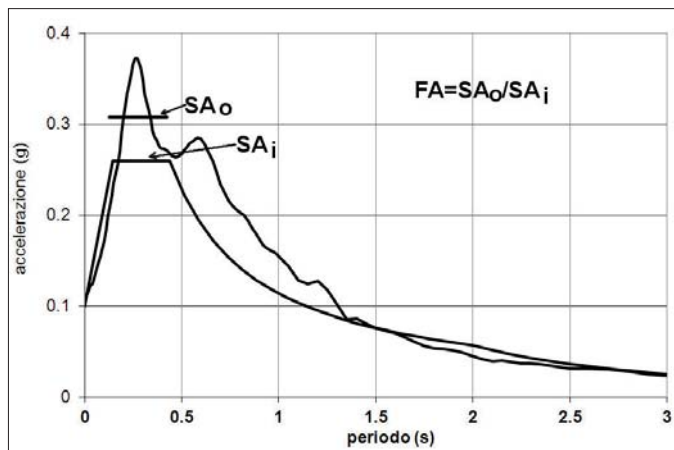


Figura 4a – Fattore di amplificazione FA

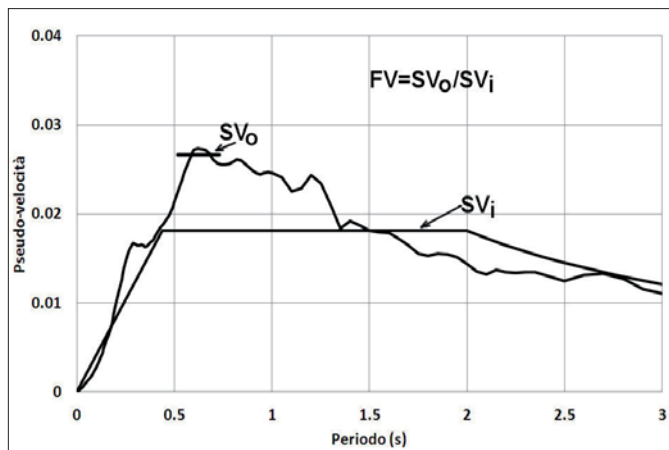


Figura 4b –

tridimensionale. Dall'analisi di amplificazione sismica locale è possibile ricavare i fattori di amplificazione FA e FV, come indicato dagli Indirizzi e Criteri sviluppati dal Dipartimento della Protezione Civile, sufficienti a ricostruire lo spettro amplificato (o deamplificato) sul sito in esame. Nelle figure 4a e 4b è mostrato il significato di tali parametri: Fa rappresenta il rapporto tra il valore massimo SAo dello spettro di accelerazione calcolato al sito, mediato su un definito intervallo di periodi, e quello Sai dello spettro di riferimento su suolo rigido piano ed FV l'analogo rapporto per gli spettri di velocità.

**4. DESCRIZIONE DEL FENOMENO**

Per esigenza di chiarezza di esposizione si considera il caso semplice di onde sismiche provenienti dalla sorgente in direzione perpendicolare alla superficie topografica, piana e orizzontale, e si suppone quindi che siano formate da onde di volume cioè onde di taglio S oppure di compressione P. Come illustrato dalla figura 5 esse, non potendosi propagare nell'aria, vengono riflesse, rifratte oppure girano intorno all'ostacolo rappresentato dalla cavità, che per semplicità abbiamo rappresentato in forma circolare.

Per la presenza dell'ostacolo le onde che arrivano in superficie e che si riflettono più volte tra di essa e la cavità stessa, tendono a concentrarsi in corrispondenza dei bordi piuttosto che al centro della cavità stessa. Tale effetto è già noto da parecchi anni infatti, come si vede nella figura 6, estratta da Rodriguez-Castellanos (2006), sono mostrati gli spostamenti in funzione del tempo per differenti cavità e per un'onda semplice P incidente. Sono mostrate le risposte in 61 punti (stazioni) egualmente spaziate in superficie e si vede che tali risposte non dipendono dalla forma della cavità e lo spostamento in superficie ha lo stesso andamento anche se la cavità si riduce ad una fessura. Come già detto la risposta in corrispondenza del centro, stazione 31, è minima.

Il fenomeno dipende dalle dimensioni della cavità D e dalla sua profondità H oppure

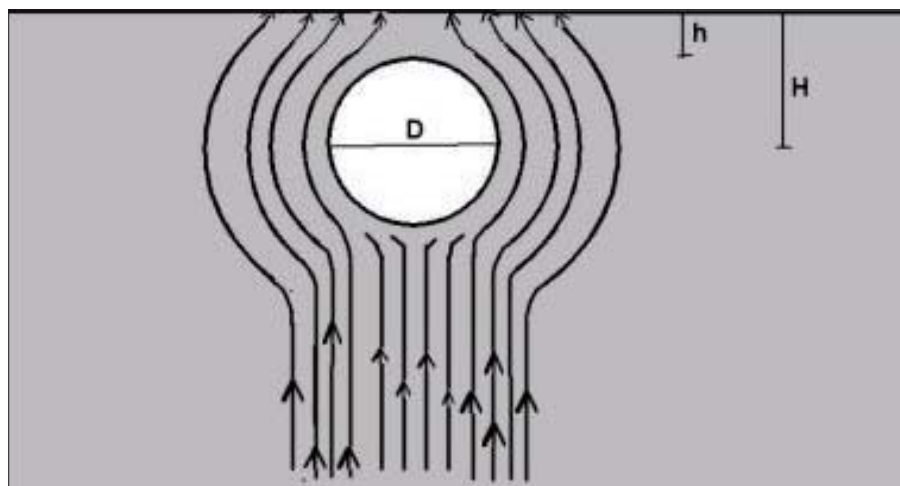


Figura 5 – Propagazione delle onde di volume in presenza di cavità

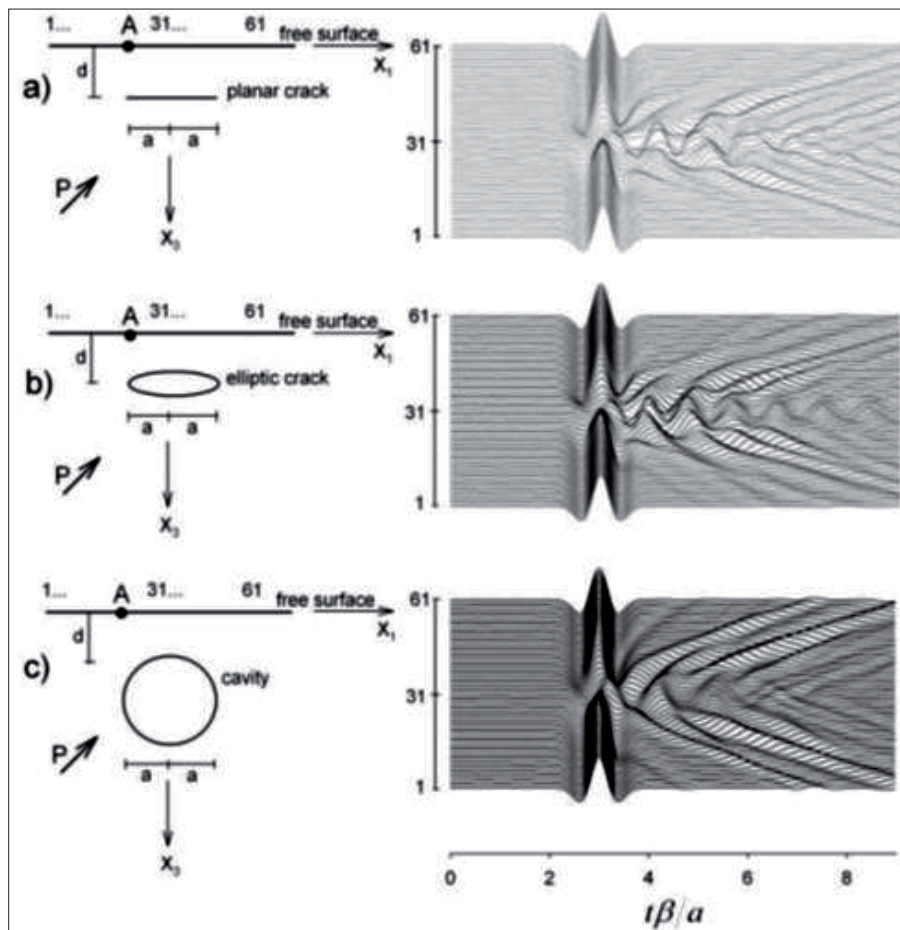


Figura 6 – Spostamenti in superficie per differenti tipi di cavità e per onde P incidenti, da Rodriguez-Castellanos (2006)

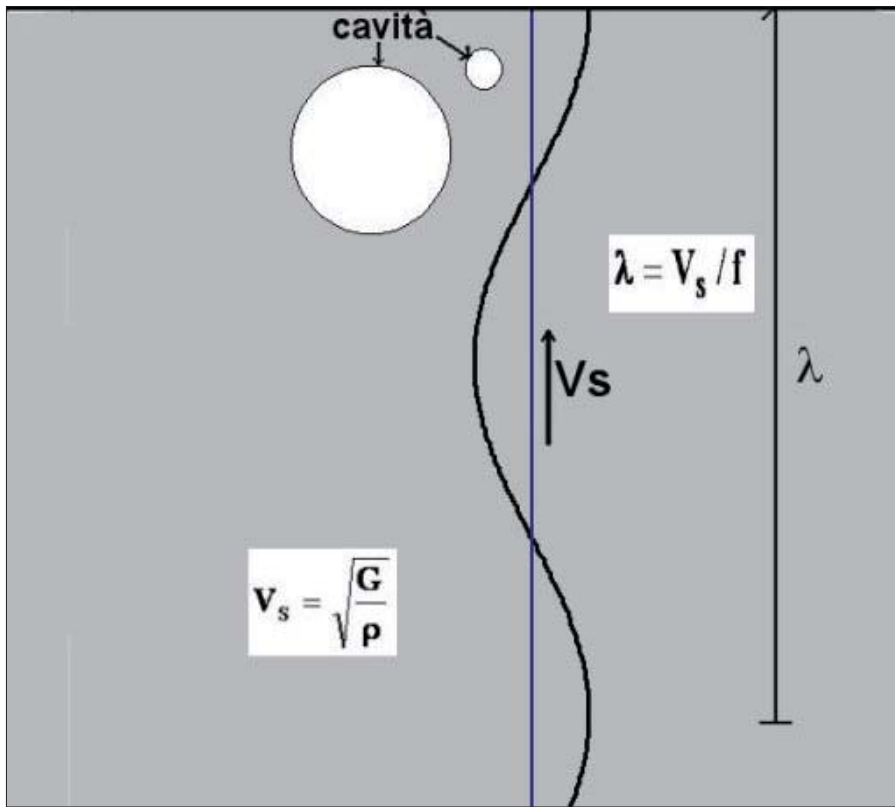


Figura 7 – Rappresentazione dell'ampiezza del moto in funzione della profondità per un'onda di frequenza  $f$

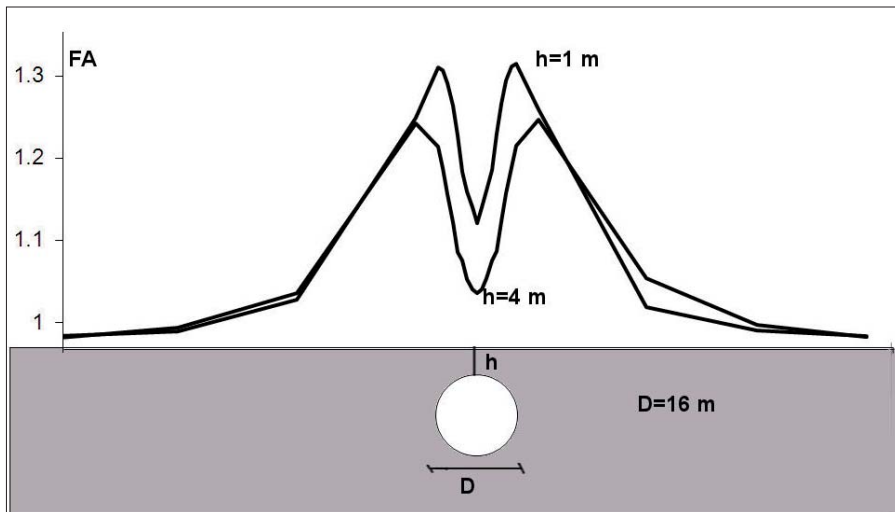


Figura 8 – Fattore di amplificazione in funzione dello spessore della copertura.

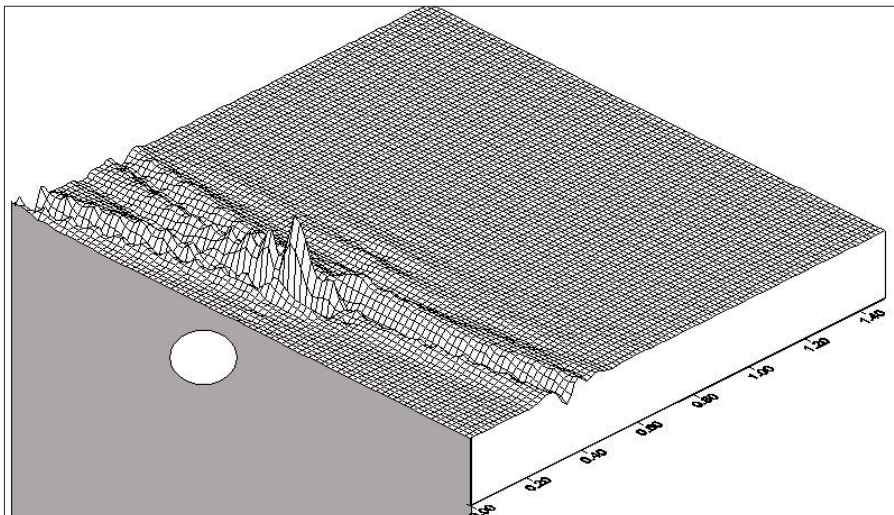


Figura 9 – Spostamenti per un'onda di Rayleigh proveniente da sinistra

dallo spessore della copertura. Tale affermazione viene illustrata dallo schema della figura 7.

Il moto sismico può essere considerato come somma di onde sinusoidali di differente frequenza, ampiezza e fase. Nella figura 7 è mostrata una sola onda di una determinata frequenza  $f$  in un terreno di rigidità corrispondente ad una  $V_s$  (velocità delle onde di taglio). Essa è rappresentata da una curva cosinusoidale che indica l'ampiezza del moto vibratorio in funzione della profondità. Il valore massimo di tale moto è sempre in superficie e la sua ampiezza si riduce a zero (nodo) in corrispondenza ad un quarto della sua lunghezza d'onda  $\lambda = V_s / f$

Si osserva, anche visivamente, che se la dimensione della cavità è minore di un quarto della lunghezza d'onda la cavità stessa non altera sensibilmente la propagazione dell'onda.

È possibile pertanto avere un ordine di grandezza delle dimensioni che non alterano il moto sismico in superficie utilizzando una semplice espressione:

$$D < \lambda / 4 < \frac{V_s}{4f}$$

Ponendo per esempio valori di  $f$  pari al massimo che interessa nel moto sismico, cioè 10-15 Hz, e  $V_s$  intorno a 400 m/s risulta, in tali condizioni, che le cavità delle dimensioni minori di 5 m non alterano il moto sismico.

Va però detto che c'è un altro parametro che va controllato e cioè lo spessore della copertura. I diagrammi della figura 8 mostrano l'importanza della profondità sul fattore di amplificazione FA. Le due curve sono relative a due spessori delle coperture e si vede che il valore massimo dell'amplificazione si riduce da 1.31 a 1.24 al crescere dello spessore  $h$  da 1 a 4 m.

La figura 8 mostra anche l'andamento del fattore di amplificazione FA sulla superficie del terreno e mette in rilievo sia la grande variabilità spaziale della risposta sismica sia, come detto precedentemente, la grande amplificazione in corrispondenza dei bordi e la riduzione in corrispondenza del centro della cavità.

A differenza delle onde di volume provenienti direttamente dalla sorgente il comportamento del terreno per onde di superficie, in particolare quelle di Rayleigh, è differente. In genere per terremoti lontani il contenuto energetico delle onde di superficie può essere dominante e il loro comportamento è simile alle onde del mare in quanto: il moto delle particelle ha una forma ellittica e si riduce al crescere della profondità. A differenza delle onde del mare il moto è retrogrado nel senso che in superficie avviene in senso contrario a quello di propagazione.

La cavità rappresenta un ostacolo (scoglio) che l'onda supera innalzandosi. Nella fi-

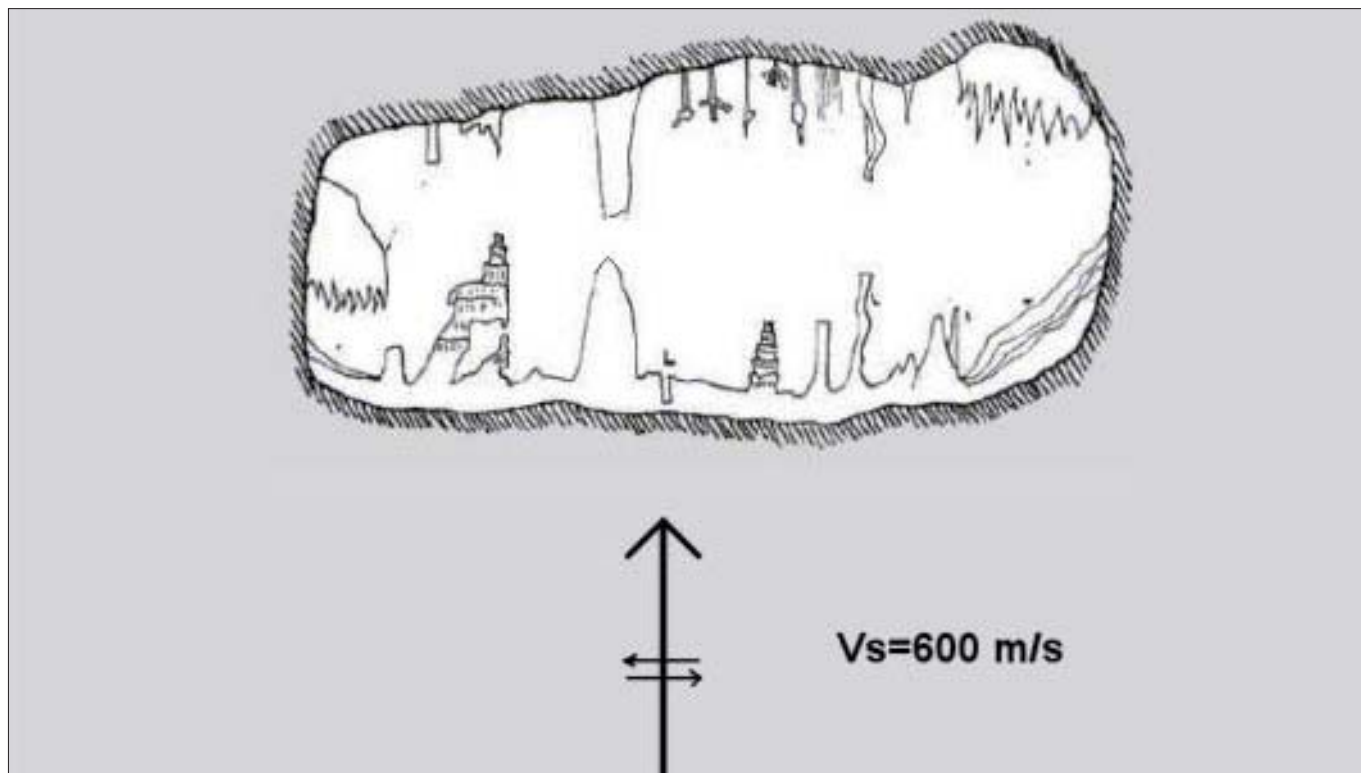


Figura 10 – Cavità presa in considerazione nell'esempio

gura 9 sono rappresentate le storie temporali di un'onda (wavelet) di Rayleigh proveniente dalla destra in varie stazioni egualmente distanziate sulla superficie intorno all'area con una cavità circolare. In prossimità della cavità l'amplificazione aumenta rapidamente per poi attenuarsi dopo trasformandosi in tre onde più piccole dovute ad effetti di riflessioni ed interazioni reciproche. In realtà le analisi convenzionali di amplificazione sismica non comportano il caso di onde di superficie anche se in realtà esse possono fare parte in maniera consistente del moto sismico.

## 5. ESEMPI DI AMPLIFICAZIONE

Nella figura 10 è mostrata una cavità di forma realistica che è stata analizzata come esempio. È larga circa 17m ed alta 7m in un terreno roccioso omogeneo caratterizzato da una  $V_s$  pari a 600 m/s ed una densità di  $2 \text{ t/m}^3$ . È stato assunto in superficie, in assenza di cavità, un accelerogramma compatibile con lo spettro mostrato nella figura 3 con una accelerazione di picco di 0.1g (Fig. 11).

Si è fatta l'ipotesi che il moto sismico arrivi dalla sorgente in direzione perpendicolare alla superficie e che sia formato solo da onde di taglio  $S_v$ , cioè che il moto delle particelle di terreno avvenga nel piano della figura. Per l'analisi è stato utilizzato il codice BESOIL (Sanò, 1996/) che è stato intensamente utilizzato per la microzonazione sismica delle regioni Umbria, Marche ed Abruzzo. Esso è basato sul metodo degli elementi di contorno e, a parte le caratteristiche meccaniche del terreno:  $V_s$  e densità, richiede solo la descrizione della superficie e del contorno della cavità. È possibile considerare

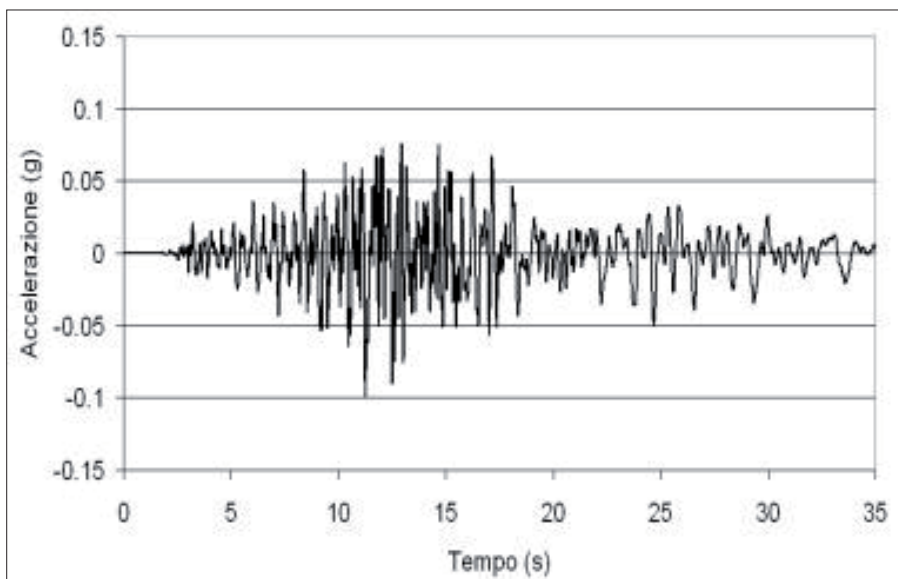


Figura 11 – Accelerogramma di input per le analisi

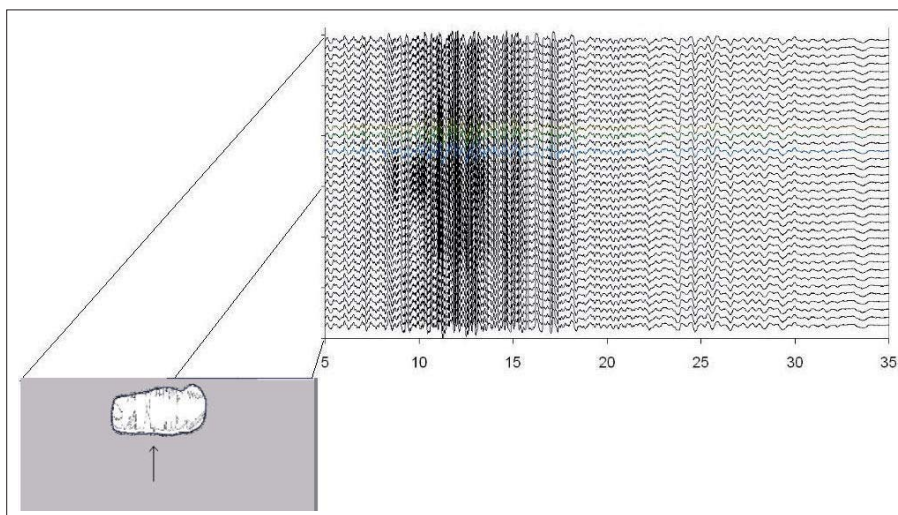


Figura 12 – Accelerogrammi in superficie alterati dalla presenza della cavità

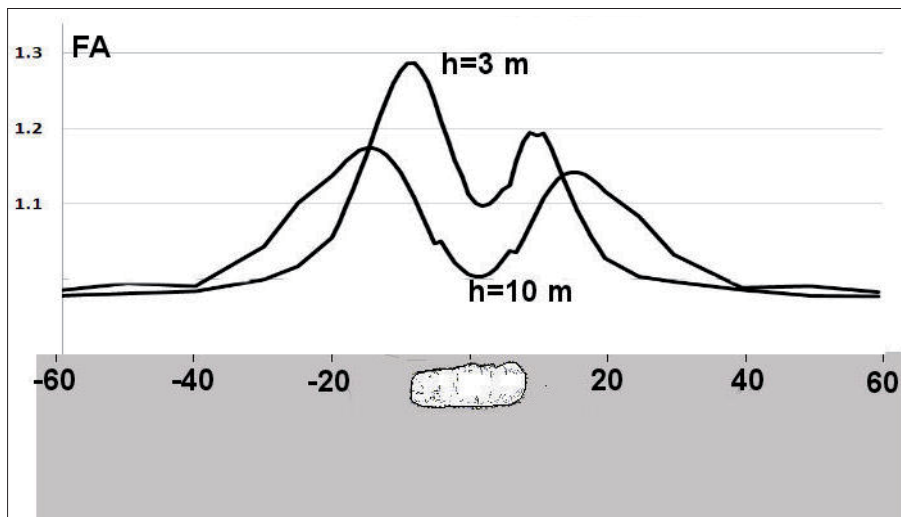


Figura 13 – Influenza dello spessore  $h$  della copertura sul fattore di amplificazione  $FA$

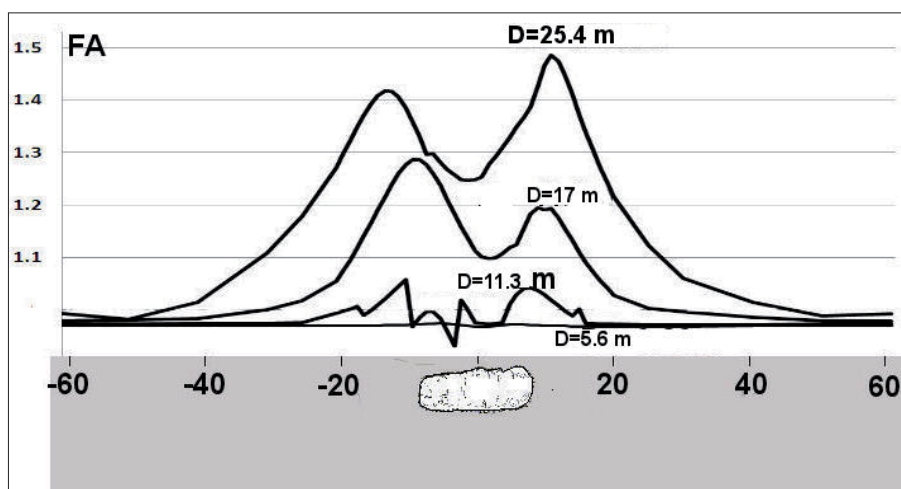


Figura 14 – Effetto delle dimensioni della cavità sull'amplificazione

onde di qualsiasi tipo, di volume o di superficie con qualsiasi angolo di incidenza. Il calcolo è effettuato nel dominio delle frequenze e l'applicazione della teoria della dinamica probabilistica, "random vibration theory", permette di tenere conto della aleatorietà del moto su roccia affiorante (Sanò & Pugliese, 1991; Sanò *et al.*, 1993). In tal maniera si è possibile definire in superficie un moto vibratorio, oltre come storia temporale, anche come spettro di risposta che sia rappresentativo di famiglie di storie temporali e quindi più adatto per una progettazione.

È necessario considerare, nell'ambito della teoria esposta, sistemi bidimensionali, cioè che le cavità abbiano forma cilindrica o almeno, in prima approssimazione, che siano allungate in direzione perpendicolare alla figura. Il calcolo tridimensionale che tenga conto dell'effettiva geometria è ancora molto difficile in quanto richiede modelli di calcolo, memoria e velocità di calcolo non facilmente disponibili.

Sono state fatte differenti analisi numeriche allo scopo di indagare sull'effetto della variazione dei due parametri geometrici: lo spessore della copertura e le dimensioni della cavità. Nella figura 12 sono mostrati gli accelerogrammi calcolati sulla superficie in stazioni egualmente distanziate nell'ipotesi che lo spessore della volta  $h$  sia di 2 m e risulta evidente la maggiore amplificazione in corrispondenza della cavità. Nella figura 13 è mostrata l'influenza dello spessore della copertura sui fattori  $FA$  di amplificazione che passano da 1.18 per  $h=10$  a 1.3 per  $h=3$  m.

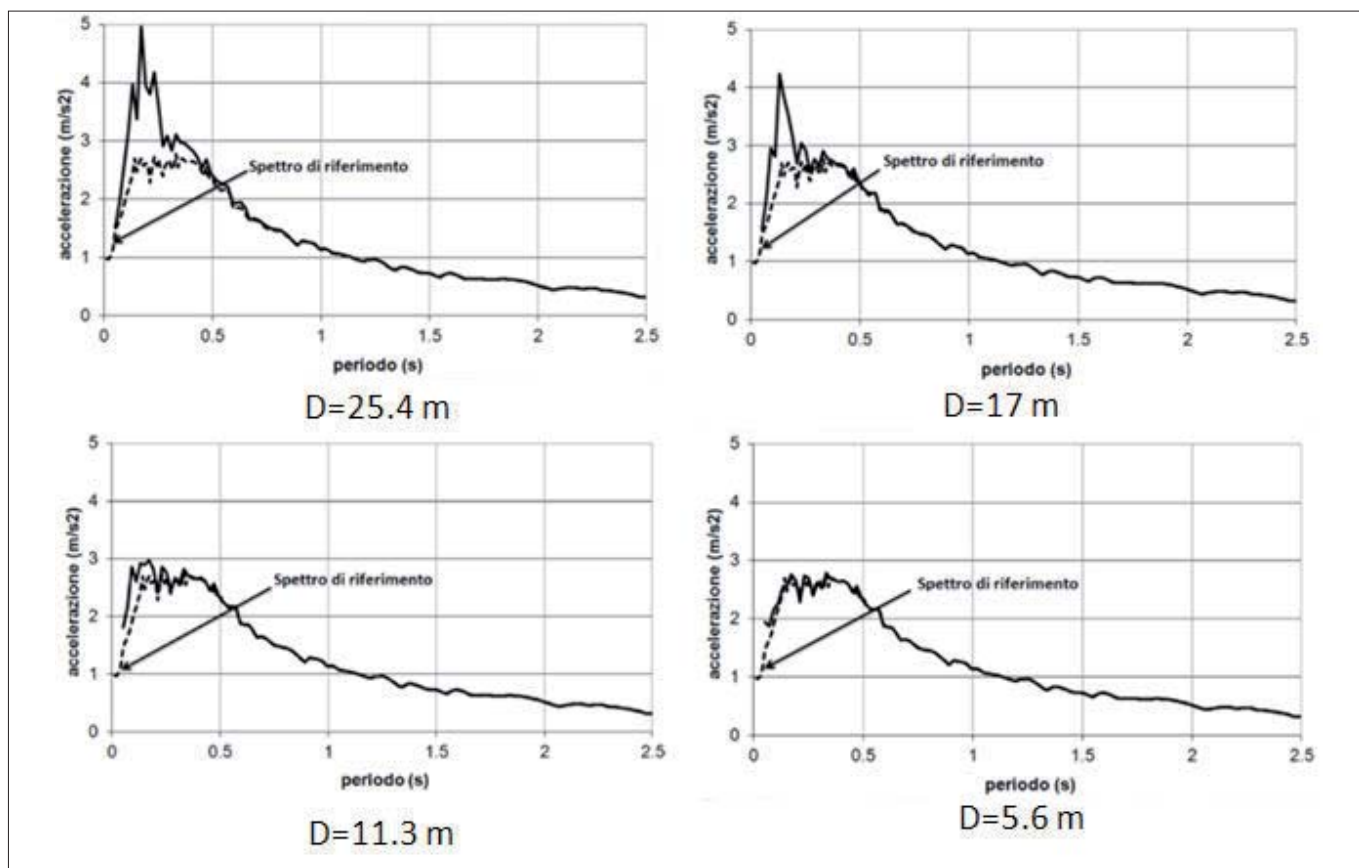


Figura 15 – Spettri di risposta in superficie per le 4 dimensioni della cavità

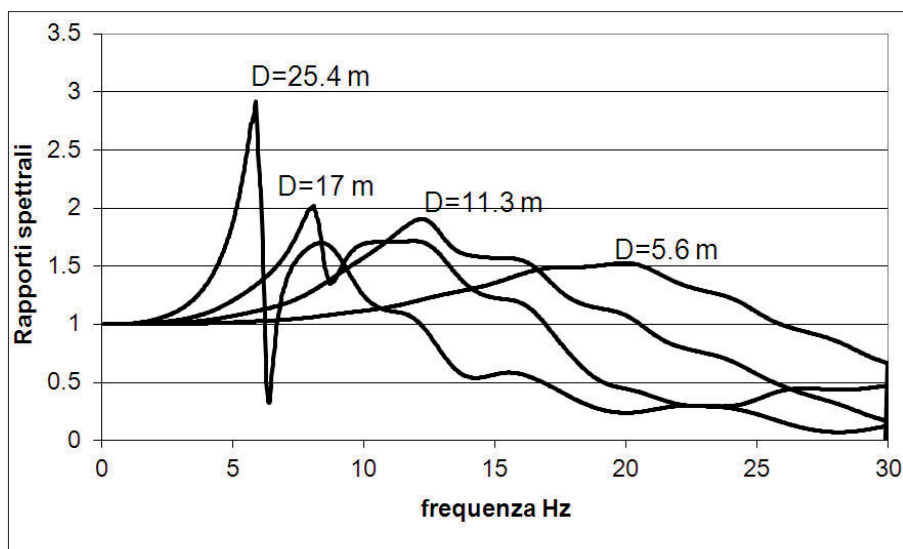


Figura 16 – Funzioni di amplificazione per le 4 dimensioni esaminate

D	De	F Hz	Vs/6De
25.4	17.2	5.9	5.8
17	11.5	8.1	8.7
11.3	7.7	12	13.
5.6	3.8	20	26.

Successivamente è stata effettuata un'indagine parametrica per esaminare l'effetto della dimensione, a parità dello spessore della copertura:  $h=3\text{m}$ . Sono stati lasciati inalterati tutti i parametri e sono state aumentate in scala le dimensioni della cavità di 1.5, cioè la dimensione orizzontale D diventa pari a 25.6m e ridotte ad 1/3, cioè  $D=5.7\text{ m}$ , ed a 2/3, cioè  $D=11.3$ . I risultati sono mostrati come fattori di amplificazione nella figura 14.

L'amplificazione si riduce fino a diventare trascurabile per dimensioni di 5.6m, ma più ancora ciò è evidente considerando gli spettri di risposta del moto calcolati nel punto della superficie più amplificato cioè nella parte terminale a sinistra della cavità. Essi sono mostrati nella figura 15 per i quattro casi esaminati dove sono confrontati con lo spettro di riferimento.

Al diminuire delle dimensioni diminuisce il massimo degli spettri ed il corrispondente periodo (cresce la frequenza). Per dimensioni inferiori a 5.6m le frequenze delle onde amplificate sono superiori ai 20 Hz e pertanto sono nel campo a bassissima energia del moto incidente ed inoltre sono al di fuori del campo di interesse per le costruzioni. In tal caso lo spettro risultante in superficie difficilmente si distingue da quello di riferimento.

Allo scopo di evidenziare le frequenze di massima amplificazione sono riportate nella figura 16 le funzioni di amplificazione dei quattro casi analizzati.

Nella tabella seguente sono confrontate le frequenze di massima amplificazione con

il parametro  $Vs/6De$  dove De è il diametro equivalente:

$$De = 2 \sqrt{\frac{\text{Area}}{\pi}}$$

e Area è l'area della cavità.

Si nota che tale parametro rappresenta un'indicazione della frequenza propria e quindi della frequenza di massima amplificazione. I risultati fanno riferimento solo al caso di onde SV incidenti, viceversa, nel caso di onde SH per le quali il moto delle particelle di terreno avviene in direzione perpendicolare alla figura, la frequenza di massima amplificazione può essere approssimata da  $Vs/6H$ , dove H è la profondità del centro della cavità stessa (Smerzini *et al.*, 2009).

## 6. CONCLUSIONI

Sono stati indagati gli effetti delle cavità sul moto sismico in superficie e l'influenza e l'importanza di alcuni parametri utilizzando delle analisi numeriche nel campo bidimensionale. Le cavità si comportano come un ostacolo alla propagazione delle onde che devono aggirarle oppure scavalcarle procurando in superficie moti differenziati in pochissimo spazio. La profondità e la dimensione delle cavità agiscono in maniera contraria l'una rispetto all'altra nel senso che la prima riduce l'effetto perturbante, mentre l'altra la amplifica. L'importanza della dimensione è legata alla lunghezza d'onda del moto incidente tanto che per cavità con dimensioni inferiori a 5m il moto è perturbato solo alle frequenze molto alte. Le onde di superficie

danno risposta differenti rispetto a quelle di volume, ma non rientrano nelle analisi standard di amplificazione sismica locale.

Il calcolo dell'amplificazione sismica locale non presta difficoltà superiori a quelle convenzionali monodimensionali e permette di avere un'accurata descrizione dell'andamento della risposta sismica sulla superficie.

## BIBLIOGRAFIA

- DRAWINSKI M. (1982), *Scattering of sh waves by subsurface topography*, Journal of the engineering mechanics division, (asce), 108(1):1-17
- DRAWINSKI M. (1983), *Ground motion amplification due to elastic inclusions in a halfspace*, earthquake engineering and structural dynamics, 11(3):313-335
- LEE V.W. & KARL J. (1992), *Diffraction of S V waves by underground, circular, cylindrical cavities*, soil dynamics and earthquake engineering 11, 445-456.
- LIAO W. I., YEH C.S., TENG T.J., (2008), *Scattering of elastic waves by a buried tunnel under obliquely incident waves using t matrix*, journal of mechanics, vol. 24, No. 4.
- MOORE I.D. AND GUAN F., (1996), *Three-dimensional dynamic response of lined tunnels due to incident seismic waves*. Earthquake engineering and structural dynamics, vol. 25, 357-369.
- PAO H.Y, MOW C.C, (1973), *The diffraction of elastic waves and dynamic stress concentrations*, crane-russak: new york.
- PAOLUCCI R., SMERZINI C., (2010), *Strong ground motion in the epicentral region of the mw 6.3 Apr 6 2009, L'Aquila earthquake, Italy*. Fifth international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics, may 24-29.
- PRESIDENZA DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI, D.P.C.; 2008: *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*; 3 vol. E 1 dvd.
- RODRIGUEZ-CASTELLANOS A., SANCHEZ-SESMA F.J., LUZON F. AND MARTIN R. (2006), *Multiple scattering of elastic waves by subsurface fractures and cavities*, bulletin of the seismological society of America, vol. 96, No. 4A, pp. 1359-1374.
- ROTILI F. (2010), *Risposta sismica locale nel territorio di Castelnuovo (Aq)*, tesi di laurea all'università del sannio con la prof. Stefania sica.
- SANÒ, T. AND PUGLIESE, A. (1991). *Pshake - analisi probabilistica della propagazione delle onde sismiche*. Enea rt/disp/91
- SANÒ T., PUGLIESE A., G. DI PASQUALE (1993), *Aleatorietà del moto sismico nell'amplificazione locale*, atti del 6o convegno nazionale "l'ingegneria sismica in italia", vol. 1, Pagg. 65-74.
- SANÒ, T., (1996), *Besoil: un programma per il calcolo della propagazione delle onde sismiche*, rapporto tecnico ssn/rt/96/9.
- SANÒ T., VITIELLO E., (2008), *Aseismic design for cut-and-cover tunnels: criteria and practical applications*, the 12th international conference of international association for computer methods and advances in geomechanics (iacmag) 1-6 october, 2008, goa, India.
- SMERZINI C., AVILES J., PAOLUCCI R. AND SANCES-SESMA F.J. (2009), *Effect of underground cavities on surface earthquake ground motion under sh wave propagation*, earthquake engineering and structural dynamics, 38, 1441-1460.

# Il recupero del percorso militare sotterraneo “tunnel borbonico” realizzato da Ferdinando II di Borbone (Napoli)

GIANLUCA MININ  
INGEO S.r.l. Ingegneria e geologia, Napoli

ENZO DE LUZIO  
Geologo, Libero Professionista

PAOLO MARIA GUARINO  
ISPRA - Dipartimento Difesa del Suolo. Servizio Geologico d'Italia

## ABSTRACT

**T**he “Tunnel Borbonico” is a 430 m long gallery that passes beneath the Pizzofalcone hill (Naples, Italy), which was built between 1853 and 1855.

The excavation of the tunnel was marked by several interruptions, due to the finding along the path of a complex network of cavities and tunnels, and was never completed.

After the interruption of the excavation, the gallery was abandoned, only to be used during the WW2 as an air-raid shelter, and later as deposit of cars and motorbikes.

Since 2005 the cleaning and recovery by the Cultural Association *Borbonica Sotterranea*, have enabled the removal of over 300 m<sup>3</sup> of debris and waste, carrying out the works carried out by engineers and workers from the Bourbon and returning to public use the monument, as extraordinary example of cultural stratification of the city of Naples.

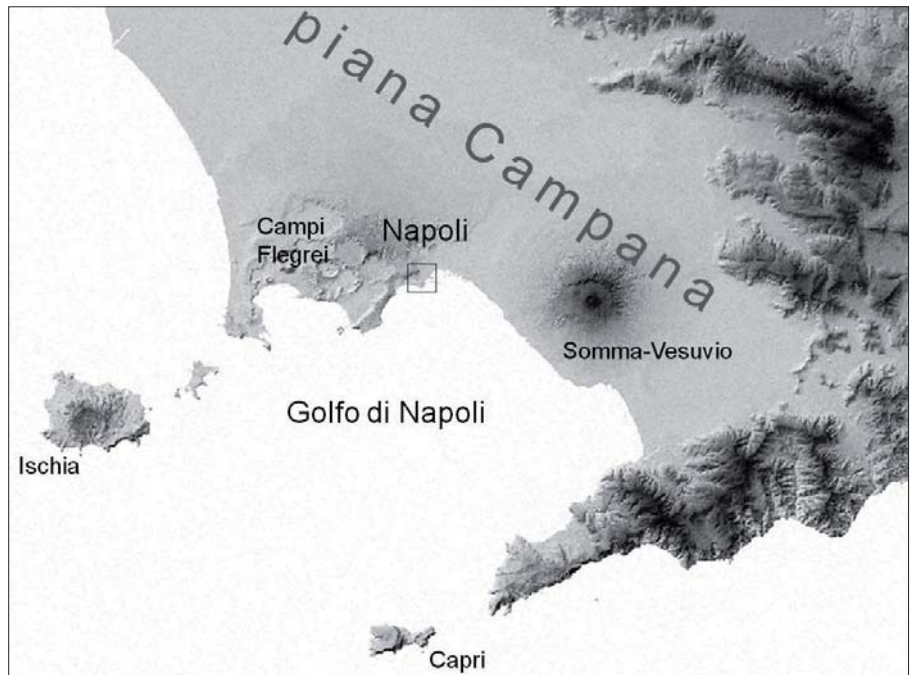


Figura 1 – Il settore centrale della piana Campana, Napoli e i distretti vulcanici del Somma-Vesuvio e dei Campi Flegrei. Il riquadro indica l'area di studio

## 1. INTRODUZIONE

Il “Tunnel Borbonico” è una galleria sotterranea che attraversa la collina di Pizzofalcone (Napoli), realizzata intorno alla metà dell'800, allo scopo di consentire un rapido accesso a difesa della residenza reale borbonica delle truppe accasermate nei quartieri della Vittoria, San Pasquale e Ferrandina e, in alternativa, come via di fuga verso il mare della famiglia reale residente a Palazzo Reale.

Siapure realizzata con finalità strategico-militari, la galleria venne scavata contestualmente al vasto programma di riassetto urbano e dotazione di infrastrutture che Ferdinando II di Borbone, salito al trono nel novembre 1830, avviò e realizzò nei quasi trent'anni del suo regno, allo scopo di rendere la città di Napoli al passo con le altre grandi capitali europee.

Dopo che vennero completati gli interventi intrapresi sotto i napoleonici e la restaurazione, a partire dal 1840 venne realizzato un programma di interventi elencati in un documento a firma del Re, noto come “*Appuntazioni per lo abbellimento di Napoli*”, che comprendeva la creazione di un quartiere operaio ad oriente (in vista dell'ampliamento del porto e di nuovi insediamenti industriali), la costruzione di quartieri residenziali ad occidente e lungo le colline di Posillipo e del Vomero, il rapido collegamento

tra il centro antico e le nuove aree di espansione mediante gallerie scavate nelle colline e funicolari e radicali interventi nella parte più antica della città, con la creazione e sistemazione di nuove arterie stradali (Buccaro A., 1985).

Lo scavo della galleria fu contrassegnato da diverse interruzioni, legate al rinvenimento lungo il tracciato di cunicoli e cavità appartenenti alla rete dei rami seicenteschi dell'acquedotto della Bolla e del Carmignano, e non ebbe mai un definitivo compimento, anche per il sopraggiungere degli eventi legati alla caduta del regno borbonico.

Parte degli ambienti appartenenti al tunnel borbonico è stata utilizzata nel corso della seconda guerra mondiale come ricovero antiaereo e, successivamente alla guerra, per lo scarico di materiali di risulta o come deposito giudiziario.

Dopo alcuni decenni di abbandono pressoché totale, i rilievi effettuati nell'ambito delle attività di verifica delle condizioni statico-conservative delle cavità censite sul territorio del comune di Napoli hanno riportato all'attenzione della opinione pubblica il monumento, per troppi anni trascurato nell'indifferenza delle istituzioni.

## 2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il Tunnel Borbonico attraversa alla base la collina di Pizzofalcone, piccolo rilievo che si erge nel settore centrale del territorio del comune di Napoli.

Tale rilievo, noto anche con l'appellativo di Monte Echia, pur elevandosi soltanto di poco più di 50 m sul livello del mare, costituisce una netta soluzione di continuità della fascia litoranea, separando il settore occidentale della Riviera di Chiaia da quello orientale (porto e zona industriale).

L'assetto geologico dell'area risulta strettamente correlato a quello del territorio cittadino di Napoli, a sua volta fortemente condizionato dalla storia eruttiva dei Campi Flegrei e del Somma-Vesuvio (Caliro S. *et al.*, 1997).

Il territorio del comune di Napoli ricade, infatti, nel settore centrale del graben della Piana Campana (Fig. 1), depressione tettonica individuata a partire dal Pliocene sup. e interessata nel corso del Quaternario da un'intensa attività vulcanica (D'Argenio *et al.*, 1973; Ortolani F., Aprile A., 1979; Bartole *et al.*, 1984; Ortolani F., Pagliuca S., 1987).

Nel sottosuolo del territorio del comune di Napoli e in affioramento prevalgono i prodotti

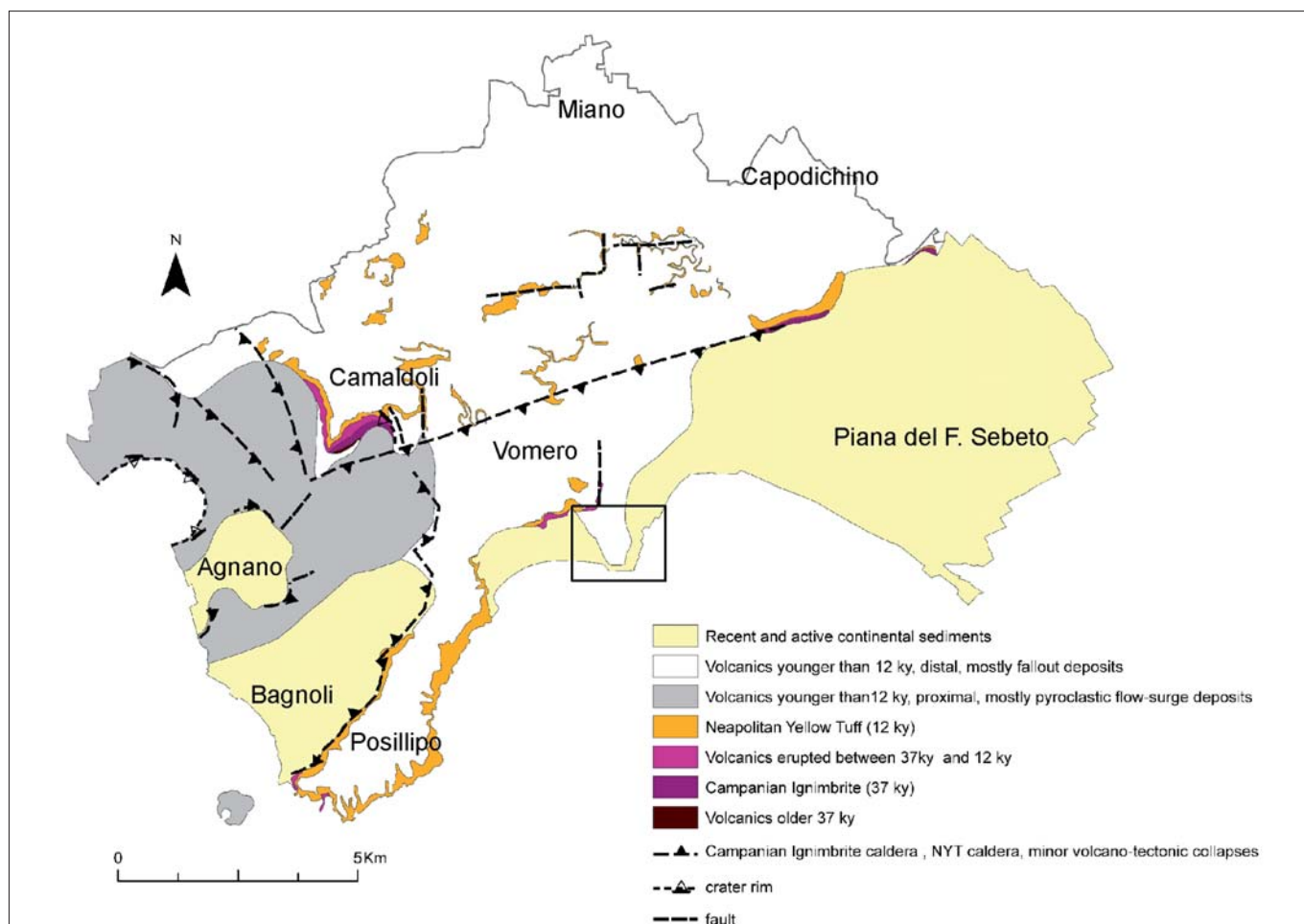


Figura 2 – Carta geologica schematica del territorio del comune di Napoli (da Orsi G. *et al.*, 2001, modificato). Il riquadro fa riferimento allo stralcio di Fig. 3

dell'attività vulcanica dei Campi Flegrei; in minor misura si rinvergono i prodotti dell'attività vesuviana. Depositi di ambiente continentale, di transizione e marini sono presenti nella piana del F. Sebeto, nella piana di Bagnoli-Fuorigrotta, nella conca di Agnano e lungo la fascia costiera (Fig. 2).

Per quanto riguarda il vulcanesimo flegreo, i prodotti più antichi in affioramento hanno un'età non più antica di 60 ka anni; relativamente a questo intervallo di tempo e in relazione ai due principali eventi eruttivi, l'attività dei Campi Flegrei viene suddivisa in fasi (Di Girolamo *et al.*, 1984; Orsi *et al.*, 1996): l'eruzione dell'Ignimbrite Campana (IC) segna la fine della I fase (37 ka); l'eruzione del Tufo Giallo Napoletano (TGN) segna la fine della seconda fase (12 ka). La terza fase comprende gli ultimi 12 ka.

Relativamente alla attività più antica dell'IC, nel territorio di Napoli sono noti alcuni modesti affioramenti al piede della collina dei Camaldoli (unità di Torre Franco).

Maggiormente estesi risultano i depositi di Breccia Museo e Piperno appartenenti alla formazione dell'IC, la cui eruzione costituisce l'evento a più alta magnitudo dell'area mediterranea degli ultimi 200 ka, nel corso della quale furono emessi non meno di 200 km<sup>3</sup> di magma, che diedero origine a depositi che ricoprirono un'area di circa 30.000 km<sup>2</sup> (Bar-

beri *et al.*, 1978, Civetta *et al.*, 1997). Alla fine di questa eruzione si formò una depressione calderica su un'area di oltre 200 km<sup>2</sup>.

L'intervallo di tempo che intercorre tra l'eruzione dell'IC e l'eruzione del TGN è stato caratterizzato da eruzioni esplosive che hanno prodotto estese coltri di depositi piroclastici e coni di tufo, alcuni dei quali localizzati nella porzione centrale della città di Napoli, dando origine a una morfologia molto articolata, successivamente sepolta dal TGN.

L'eruzione del TGN costituisce, a sua volta, la seconda per importanza nell'area campana; nel corso dell'eruzione furono emessi oltre 40 km<sup>3</sup> di magma, che ricoprirono un'area di circa 1000 km<sup>2</sup>.

Anche tale eruzione fu accompagnata da un collasso calderico, il cui bordo è visibile in affioramento soltanto in corrispondenza del versante occidentale della collina di Posillipo (Fig. 2).

Per quanto riguarda l'attività successiva all'eruzione del TGN, essa viene suddivisa dagli Autori in tre epoche di attività: da 12 a 9,5 ka; da 8,6 a 8,2 ka, da 4,8 a 3,8 ka, separate da periodi di quiescenza (Di Vito *et al.*, 1999).

I prodotti dell'attività successiva al TGN sono presenti diffusamente, in giacitura primaria o rimaneggiata, nel territorio di Napoli.

Riempimenti, depositi di origine antropica e accumuli di sedimenti alluvionali antichi si rinvergono frequentemente, con spessore

anche superiore alla decina di metri, all'interno dell'area urbana.

L'assetto strutturale del territorio del comune di Napoli è pertanto condizionato dalla presenza di una struttura calderica complessa, formatasi a seguito di due episodi di collasso, che controlla fortemente anche l'assetto morfologico, ad eccezione del settore orientale, dove si estende la depressione tettonica di Volla sede della piana alluvionale del F. Sebeto (Bellucci *et al.*, 1993; Bellucci F., 1994).

L'assetto idrogeologico è caratterizzato dalla presenza di un acquifero superficiale non confinato ospitato nelle piroclastiti a letto del TGN.

In generale, la falda si trova a elevata profondità dalla superficie, dell'ordine di alcune decine di metri fino a oltre 200 m, ad eccezione delle aree morfologicamente depresse, come la piana del fiume Sebeto e le aree vicino alla costa, dove risulta subaffiorante.

### 3. ASSETTO GEOLOGICO DELL'AREA

L'assetto geologico del Monte Echia risulta strettamente correlato a quello del territorio di Napoli precedentemente descritto ed appare sostanzialmente noto.

Il nucleo del rilievo è dato dalla formazione del Tufo Giallo Napoletano, affiorante alle pendici occidentali della collina di Pizzofalcone, alle spalle di vico S. Maria a Cappella

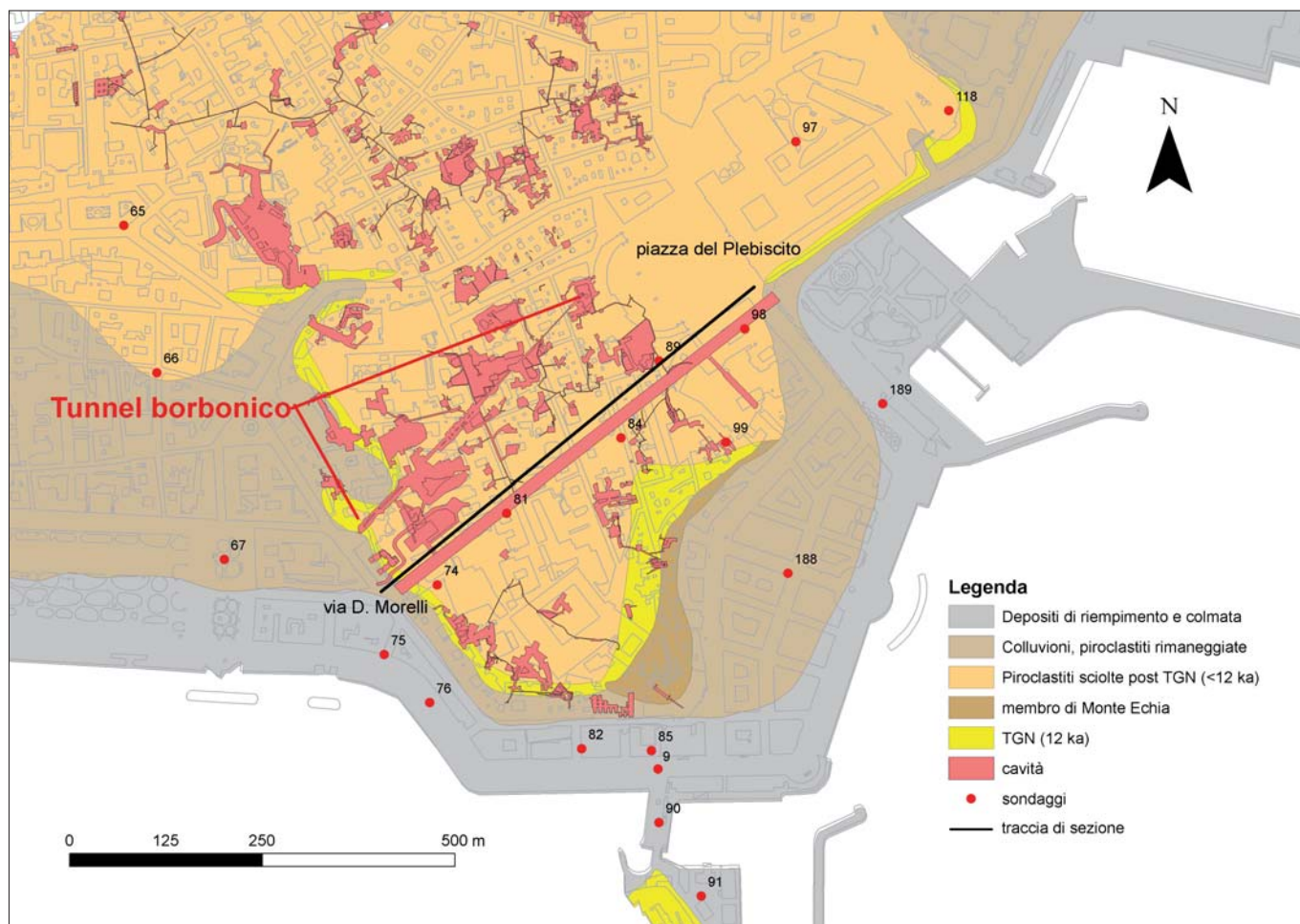


Figura 3 – Geologia dell'area di Monte Echia

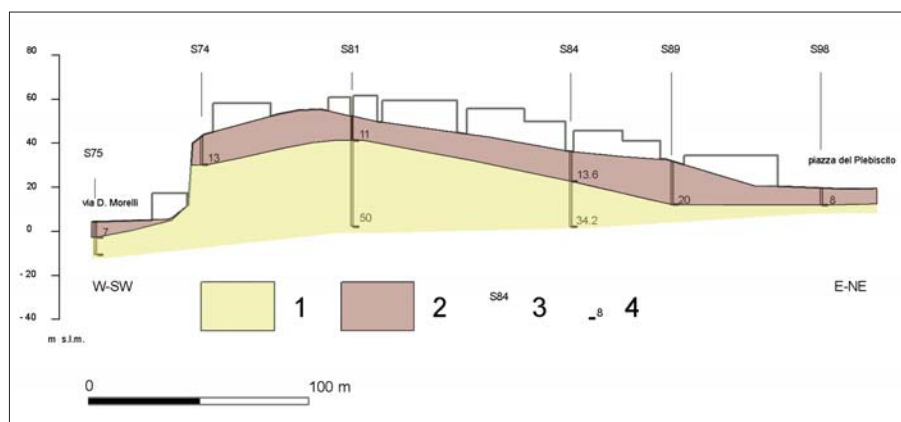


Figura 4 – Sezione geologica della collina di Pizzofalcone. Legenda: 1) Tufo Giallo Napoletano (12 ka); 2) depositi piroclastici incoerenti (età < 12 ka); 3) sondaggio; 4) profondità (m) riferita al piano campagna. Ubicazione della sezione in Fig. 3

vecchia e di via D. Morelli e rinvenuto in sondaggio ad una profondità compresa tra 11 e 20 metri dal piano campagna (Fig. 3).

Tali terreni appartengono al membro superiore del TGN, caratterizzato dal prevalere di depositi di flusso (Orsi *et al.*, 1992). Lo spessore massimo del tufo è di circa 100 m, come evidenziato dai sondaggi eseguiti in prossimità dell'area di studio nel corso delle indagini finalizzate alla realizzazione della Linea tranviaria Rapida.

A tetto della formazione tufacea poggiano i prodotti dell'attività più recente di 12 ka (Fig. 4). Nelle stratigrafie dei sondaggi riportati in letteratura tale successione viene descritta in maniera alquanto sommaria, costituita in prevalenza da pozzolane e intercalazioni di livelli di pomici (Guadagno M., 1928).

Studi recenti effettuati nell'area poco distante di Castel Nuovo consentono una più accurata descrizione della successione stratigrafica a tetto del TGN (Orsi *et al.*, 1998).

Gli Autori riconoscono, a partire dalla base della sequenza, i prodotti delle eruzioni di Paradiso, Soccavo 1, Pomici Principali, Soccavo 3 e 4, Minopoli 2, generate nella caldera dei Campi Flegrei durante la I epoca di attività, tra 12 e 9.5 ka (Di Vito *et al.*, 1999).

La sequenza è tagliata da una superficie erosionale, sulla quale si è sviluppato un paleosuolo ricoperto dai prodotti delle eruzioni di Agnano Monte Spina e degli Astroni, entrambe riferite alla III epoca di attività. La successione è chiusa, verso l'alto, da depositi cineritici a tessitura da piano-parallela a laminazione incrocia-

ta, a grado di coesione variabile, appartenenti all'eruzione vesuviana nota come di Eruzione di Avellino (Lirer *et al.*, 1973; Arnò *et al.*, 1987) avvenuta circa 3000 anni dal presente.

Non del tutto chiari risultano i rapporti geometrici e stratigrafici che legano la formazione del TGN ad alcuni depositi piroclastici semicoerenti che affiorano lungo il settore meridionale della collina.

Lo spessore di tali depositi è di circa 6 m, anche se è probabile che l'affioramento avesse in passato una potenza maggiore in corrispondenza dell'attuale muro di contenimento realizzato a seguito del crollo avvenuto nel 1862.

La sequenza dell'attuale comprende, dal basso, depositi cineritici finemente laminati, con laminazioni planari, ondulate e incrociate a basso angolo. Verso l'alto, seguono strati di lapilli di spessore decimetrico, intervallati con depositi a granulometria fine e strutture da impatto prodotte da blocchi di dimensioni fino a 40 cm.

In letteratura tali depositi sono attribuiti al membro di Monte Echia, considerato, dubitativamente, antecedente al Tufo Giallo Napoletano e correlato con i depositi della formazione di Chiaia (Nicotera P., 1950; Scherillo



A., 1957) e con il vulcano di S. Lucia (Scherillo A., Franco E., 1967).

Un elemento caratteristico del sottosuolo dell'area è dato dalla presenza di numerose cavità (Di Stefano R., 1967; Albertini *et al.*, 1988 e bibliografia citata).

La formazione del Tufo Giallo Napoletano è stata infatti oggetto, sin dall'antichità, di una imponente attività estrattiva, al punto da giustificare il toponimo di "regione megarense" (da "ta megara" in greco = abitazioni sotterranee). Anche il Pontano da notizia di grotte scavate nel tufo, le cosiddette grotte Platamone, antiche cave ora nascoste dai fabbricati del Chiatamone, presenti nella zona di S. Lucia, ove sono ricordate dal toponimo di Vico Grotta a S. Lucia sino a Palazzo Salerno. Numerose altre cavità sono presenti nel sottosuolo della collina, appartenenti all'antico acquedotto della Bolla all'interno delle quali, dopo la seconda metà del '600, giunse l'acqua legata all'acquedotto del Carmignano (Terracciano S., 1967).

Per quanto riguarda la circolazione idrica sotterranea, la formazione del TGN esercita una importante azione di confinamento di una falda profonda altamente mineralizzata, che risale lungo le principali linee di frattura nel tufo dando origine a sorgenti solfuree e ferruginose (sorgenti di via Chiatamone e di Palazzo Reale).

#### 4. IL "TUNNEL BORBONICO"

La prima idea di costruire un tunnel sotto il Monte Echia fu dell'arch. Antonio Nicolini nel 1850, ma non si ha nessuna notizia di un suo iniziale progetto. Ferdinando II nel 1853 dispose la costruzione della galleria sotterranea affidandone l'incarico a Errico Alvino, architetto e urbanista del regno (Buccaro A., 1985; Catapano F., 2010).

Ad oggi non sono noti gli elaborati grafici del progetto di Alvino, per cui si è a conoscenza delle sue intenzioni progettuali solo da fonti bibliografiche postume, risalenti agli inizi del '900 e agli studi del Buccaro.

Secondo il progetto di Alvino, il traforo doveva essere largo 11.70 m, di cui 7.94 m per la carreggiata e 1.88 per i due marciapiedi laterali; esso doveva essere coperto da una sola volta a botte alta 12 m ed avere due corsie, una per senso di marcia.

Ciascuna corsia era ampia circa 4 m e la separazione fra le due corsie doveva essere realizzata mediante un sottile parapetto per sostenere i lampioni dell'illuminazione a gas. Il tunnel si sarebbe chiamato "Galleria Reale" e, in particolare, Strada Regia la corsia recante a Chiaia e Strada Regina quella in senso contrario.

Gli accessi previsti erano lungo via D. Morelli e alle spalle dell'odierna piazza del Plebiscito.

Le numerose varianti apportate in corso d'opera, per motivi soprattutto tecnici, fecero optare per una galleria unica con due corsie

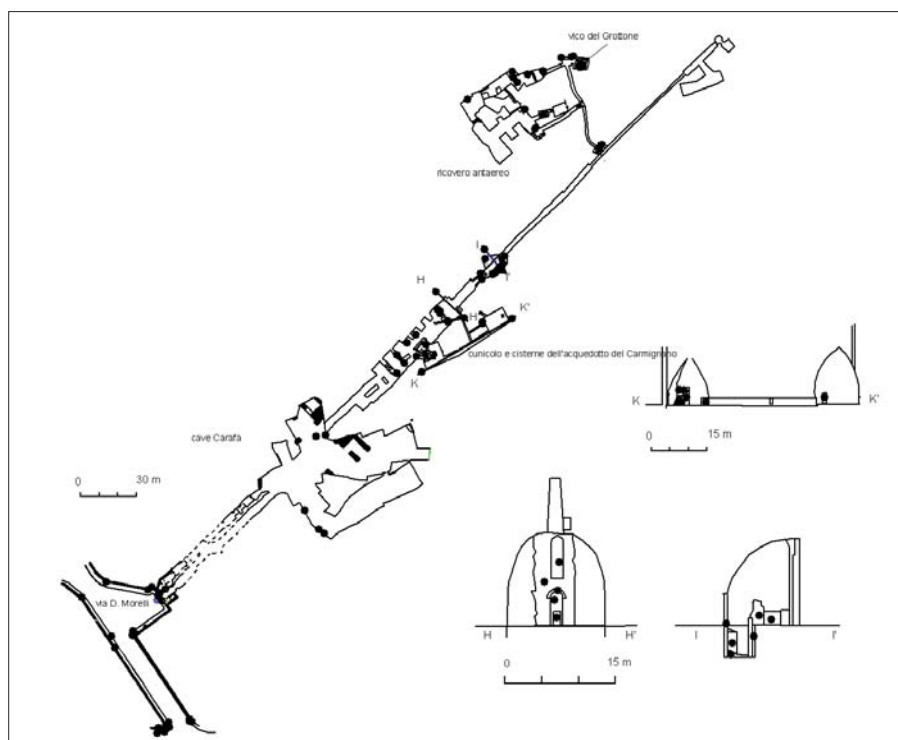


Figura 5 - Planimetria del Tunnel Borbonico

divise da un unico marciapiede centrale, anziché i due laterali e fu abolito il progetto di aprire delle botteghe lungo il percorso del tunnel.

Oltre ai lavori per il tunnel stesso, l'ultimo progetto di Alvino prevedeva anche la ricostruzione della parete posteriore del porticato di S. Francesco di Paola dove c'era l'ingresso del tunnel a monte.

Di seguito è riportata la descrizione del percorso del tunnel ad oggi recuperato, la cui planimetria è riportata in figura 5.

Il tunnel ebbe inizio dal piazzale di alcune cave preesistenti lungo via Morelli, ad una quota assoluta di 5.1 m s.l.m.

Esso comprendeva due gallerie parallele, una per il passaggio pedonale ed una carrabile. La divisione in tufo tra le due corsie è interrotta in tre punti, due dei quali sono murati; la larghezza dei due passaggi è pressoché uguale, mentre è diversa l'altezza: 3 m per il percorso pedonale, 12 m per quello carrabile.

Dopo circa 80 m, vennero incontrate le antiche cave Carafa, già note perché da esse era stato estratto agli inizi del XVI secolo il tufo per la costruzione dell'attuale sede della sezione militare dell'Archivio di Stato di Napoli e del palazzo Carafa e, ancora, nel 1588 quello per costruire la chiesa della Nunziatella, poi trasformata per volere di Ferdinando IV in Collegio Militare nel 1787.

Dalle cave Carafa parte uno scavo rettilineo (Fig. 5) che comincia con una sezione trapezoidale larga alla base 4 m e alta 8 m, di cui si osserva un raddoppiamento dell'altezza, legato all'abbattimento del diaframma che separava il tunnel da un cunicolo, preesistente, che conduceva ad alcune cisterne poste più avanti (Fig. 6).

Procedendo in direzione di piazza Carolina, si incontrano sul lato sinistro rientranze, scavate probabilmente per consentire la sosta delle carrozze.

In questo tratto sono stati realizzati 5 archi in conci di tufo e mattoni in laterizio; trattandosi di archi spingenti lungo le pareti laterali e non a tutt'altezza, si ritiene che il tufo della volta veniva considerato sufficientemente compatto, mentre era temuto il cedimento delle pareti laterali (Fig. 7).

A 245 m dall'ingresso lo scavo incontrò una grande cisterna; per non privare d'acqua gli utenti della zona, Alvino pensò di attraversare l'acquedotto, sormontando il livello dell'acqua mediante un ponte, posto a 6 m dal suo fondo e costruendo pareti che separassero il tunnel dalle cisterne. Le due pareti sono state realizzate mediante filari di pietre di tufo e laterizi e rappresentano opere murarie di mirabile fattura (sezione I-I' in Fig. 5 e Figg. 8 e 9).

Successivamente al ponte, la sezione del tunnel diventa di nuovo di forma trapezoidale, larga 2,60 e alta 3,60 m.

Dopo circa 35 m si passa sopra una seconda cisterna mediante un altro ponte, le cui pareti laterali sono rivestite in muratura per tutta la loro lunghezza (circa 15 m).

All'incirca da questo punto, la sezione del tunnel si riduce ulteriormente (circa 1,4 m di larghezza per 2 m di altezza), con pareti in muratura di tufo e copertura a botte (Fig. 10), per poi aumentare nuovamente, in corrispondenza dell'ultimo tratto (prossimo a piazza Carolina) nuovamente scavato nel tufo che, tuttavia, non raggiunse mai la superficie.

Gli scavi, infatti, nel 1855 vennero interrotti probabilmente per l'insorgere di nuove



Figura 6 – Raddoppiamento dell'altezza della sezione della galleria legato all'abbattimento del diaframma in tufo che separava lo scavo da un cunicolo preesistente



Figura 7 – Archi in conci di tufo e laterizi realizzati per il contenimento delle pareti laterali



Figura 8 – Ponte di attraversamento di una cisterna dell'acquedotto del Carmignano

difficoltà, forse legate alla presenza di materiali incoerenti e non furono più ripresi per il sopravvenire degli avvenimenti che portarono alla caduta dei Borbone.

Alla descrizione del tunnel borbonico risulta necessario affiancare la descrizione di alcuni ambienti che sono accessibili dal tunnel, anche se non ne fanno parte.

Essi comprendono innanzitutto, un ricovero antiaereo, indicato col numero 19 dell'Elenco dei Ricoveri Antiaerei del 30/4/1943, di cui sono noti due accessi; il primo è ubicato in via Egiziaca a Pizzofalcone all'interno di un negozio di carni bianche, mentre il secondo è raggiungibile da vicolo del Grottone, mediante una scala realizzata nel '600 dai pozzari, che parte dai locali di un ex ambulatorio veterinario.

Il ricovero venne realizzato ampliando e modificando alcune cisterne dell'acquedotto della Bolla. Inoltre, durante gli anni della guerra furono costruiti grandi pilastri di sostegno alle volte di tufo e alcuni barbacane addossati alle pareti. Le pareti e le volte furono intonacate di bianco per ridurre il senso di oppressione e claustrofobia derivante dalla vita nella semioscurità.

Procedendo a ritroso in direzione di via Morelli, superato il ponte borbonico con le pareti in opera mista, è possibile raggiungere, sia sulla sinistra che sulla destra, alcune cisterne dell'acquedotto della Bolla, aventi volta a campana e pozzi per il prelievo dell'acqua dagli edifici soprastanti (sezione K-K' in Fig. 5).

## 5. LE VICENDE SUCCESSIVE ALLO SCAVO E IL RECUPERO: IL PROGETTO "BORBONICA SOTTERRANEA"

Al momento della interruzione dello scavo, il traforo aveva una lunghezza di circa 430 m e si interrompeva sotto piazza Carolina.

I lavori avevano subito una serie di rallentamenti, non soltanto a causa delle difficoltà tecniche che erano state incontrate durante l'esecuzione dello scavo, ma anche a seguito di altri avvenimenti, come lo sprofondamento avvenuto nel cortile del palazzo del duca di S. Cipriano ubicato sulla verticale della galleria, che travolse parte del fabbricato contenente le rimesse per le vetture col piano superiore, e per una serie di difficoltà legate alle procedure di approvazione delle modifiche al progetto del tunnel che eventi come quello appena descritto rendevano necessarie.

La realizzazione delle opere pubbliche, infatti, era subordinata all'approvazione del Consiglio Edile e affidate al Corpo dei Tecnici Comunali.

Nel 1871 l'assessore alle opere pubbliche Gambardella ebbe l'idea di riprendere l'opera. Fu interpellato l'Alvino, il quale rifece il progetto e lo presentò; ma nonostante tutto i lavori non furono mai ripresi.

Nel 1908 fu nominata dall'assessore comunale Orilia una commissione per lo studio dei progetti presentati per la migliore e più facile comunicazione tra oriente e occidente

della città. Anche in questo caso non si ebbero iniziative concrete.

Nei decenni successivi allo scavo, l'opera venne abbandonata, per poi essere utilizzata durante la seconda guerra mondiale come ricovero antiaereo e, successivamente, come deposito di macchine e moto d'epoca.

Accanto agli effetti connessi all'abbandono, vi sono quelli ancora più evidenti di vero e proprio degrado, connesso allo scarico abusivo di rifiuti dalle abitazioni del quartiere soprastante e ai danni riportati durante i lavori per la realizzazione della Linea Tranviaria Rapida, nel corso dei quali, agli inizi degli anni '90, per consolidare il sottosuolo venne tentato il riempimento delle cavità attraverso l'iniezione di speciali resine.

Il recupero del tunnel è iniziato successivamente ai rilievi che alcuni degli Autori hanno realizzato nell'ambito delle attività di verifica statica e lavori di messa in sicurezza delle cavità presenti nel sottosuolo di Napoli, per conto del Commissariato di Governo per l'Emergenza Sottosuolo di Napoli.

Quando ebbero inizio i rilievi, il tunnel si presentava in uno stato di totale degrado ed abbandono, invaso da detriti e materiali legati ai lavori di scavo del LTR.

I lavori di pulizia e recupero, intrapresi a partire dal 2005 e proseguiti dalla Associazione Culturale Borbonica Sotterranea, hanno consentito lo sgombero di oltre 300 m<sup>3</sup> di



Figura 9 – Particolare di una delle pareti del ponte di attraversamento della cisterna



Figura 10 – Riduzione della sezione dello scavo nel tratto terminale della galleria

detriti e rifiuti, portando in evidenza le opere realizzate dagli ingegneri e dalla manodopera borbonica e restituendo alla fruizione pubblica questo straordinario esempio di stratificazione culturale della città di Napoli.

#### BIBLIOGRAFIA

- ALBERTINI V., BALDI A., BARTOLI L., COLLINI F., ESPOSITO C., GUERRA V., MIRAGLINO P., SCHIATTARELLA F., VALLARIO A., 1988. *Le cavità sotterranee del napoletano: pericolosità e possibili utilizzazioni*. Geol. Tec., 3 (1988), 54-63.
- ARNÒ V., PRINCIPE C., ROSI M., SANTACROCE R., SBRANA A., SCHERIDAN M., 1987. *Eruptive History*. CNR, Quaderni di la Ricerca Scientifica, Vol. XIII: 53-103.
- BARBERI F., INNOCENTI F., LIRER L., MUNNO R., PESCATORE T., SANTACROCE R., 1978. *The Campanian Ignimbrite: a major prehistoric eruption in the Neapolitan area (Italy)*. Bull. Volcanol., 41 (1): 1-22.
- BARTOLE R., SAVELLI D., TRAMONTANA M., WEZEL F., 1984. *Structural and sedimentary features in the Tyrrhenian margin of Campania, Southern Italy*. Marine Geol., 55, 163-180.
- BELLUCCI F., 1994. *Nuove conoscenze stratigrafiche sui depositi vulcanici del sottosuolo del settore meridionale della Piana Campana*. Boll. Soc. Geol. It., 113, 395-420.
- BELLUCCI F., CORNIELLO A., DE RISO R., 1993. *Geology and Hydrogeology of the Somma-Vesuvio volcano (Southern Italy)*. I.A.H. Memoires, 24 (1), 137-149, Oslo.
- BRUNO G., DE FUSCO R., 1962. *Errico Alvino, architetto e urbanista napoletano dell'800*. L'arte tipografica, Napoli, pp. 126.
- BUCCARO A., 1985. *Istituzioni e trasformazioni urbane nella Napoli dell'Ottocento*. Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli, pp. 273.
- CALIRO S., FRANZESE G., GALATERI C., IMPERATO M., MILIA A., MONETTI V., NARDI G., ORTOLANI F., PAGLIUCA S., PUTIGNANO M.L., STANZIONE D., TOCCACELI R.M., 1997. *Area urbana di Napoli: principali caratteristiche geologiche, stratigrafiche ed ambientali*. CNR, Atti Conv. Geologia delle Grandi Aree Urbane, Bologna, 4-5 novembre 1997, 119-144.
- CATAPANO F., 2010. *Percorsi nel tufo giallo napoletano: storia e struttura del traforo borbonico del Monte Echia. Da stratagemma del re a viaggio nella memoria storica di una capitale*. Tesi di laurea, a.a. 2009-2010, Univ. Federico II, Napoli, pp.85.
- CIVETTA L., ORSI G., PAPPALARDO L., FISHER R.V., HEIKEN G., ORT M., 1997. *Geochemical zoning, mingling, eruptive dynamics and depositional processes – The Campanian Ignimbrite*. Campi Flegrei caldera, Italy. J. Volcanol. Geotherm. Res, 75: 183-219.
- D'ARGENIO B., PESCATORE T.S., SCANDONE P., 1973. *Schema geologico dell'Appennino Meridionale*. Acc. Naz. Lincei, Quad. 183: 49-72.
- DI GIROLAMO P., GHIARA M.R., LIRER L., ROLANDI G., STANZIONE D., 1984. *Vulcanologia e petrologia dei Campi Flegrei*. Boll. Soc. Geol. It., 103: 349-413.
- DI STEFANO R., 1967. *Distribuzione delle cavità rispetto al territorio urbano di Napoli*. In: Relazione della Commissione di Studio "IL Sottosuolo di Napoli". Tip. A.G.I.F., Aversa, Napoli, pp. 143-173.
- DI VITO M.A., ISAIA R., ORSI G., SOUTHON J., DE VITA S., D'ANTONIO M., PAPPALARDO L., PIOCHI M., 1999. *Volcanism and deformation in the past 12 ka at the Campi Flegrei caldera (Italy)*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 91, 2-4: 221-246.
- GUADAGNO M., 1928. *Monte Echia, geologia ed antiche escavazioni. Contributo alla conoscenza del sottosuolo cittadino*. Stab. Tip. G. Barca, Napoli, pp. 20 Atti del R. Istituto d'incoraggiamento di Napoli.
- LIRER L., PESCATORE T.S., BOOTH P., WALKER G.P.L., 1973. *Two plinian pumice-fall deposits from Somma-Vesuvius, Italy*. Geol. Soc. of Am. Bull., 84: 759-772.
- NICOTERA P., 1950. *Osservazioni geologiche sulla collina di Posillipo e sulla zona urbana occidentale di Napoli*. Boll. Soc. Geol. It., 69, 335-362.
- ORSI G., D'ANTONIO M., DE VITA A., GALLO G., 1992. *The Neapolitan Yellow Tuff, a large magnitude trachytic phreatoplinian eruption: eruptive dynamics, magma withdrawal and caldera collapse*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 53: 275-287.
- ORSI G., DE VITA A., DI VITO M., 1996. *The restless, resurgent Campi Flegrei nested caldera (Italy): constraints on its evolution and configuration*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 74: 179-214.
- ORSI G., DI VITO M., ISAIA R., 1998. *Volcanic Hazards and Risk in the Parthenopean Megacity*. Field excursion guidebook. Osservatorio Vesuviano, Napoli.
- ORTOLANI F., APRILE A., 1979. *Nuovi dati sulla struttura profonda della Piana Campana a Sud-Est del fiume Volturno*. Boll. Soc. Geol. It., 98 (4).
- ORTOLANI F., PAGLIUCA S., 1987. *Principali caratteristiche stratigrafiche e strutturali dei depositi superficiali della Piana Campana*. Boll. Soc. Geol. It., 104: 195-206.
- SCHERILLO A., 1950. *Petrografia chimica dei Campi Flegrei: il Tufo Giallo, mappa monte, pozzolana*. Rend. Acc. Sc. Fis. Mat., Napoli, 22, 345-370.
- SCHERILLO A., FRANCO E., 1967. *Introduzione alla carta stratigrafica del suolo di Napoli*. Atti Acc. Pontaniana, Napoli, 16: 27-37.
- TERRACCIANO S., 1967. *L'acquedotto e il sottosuolo di Napoli*. In: Relazione della Commissione di Studio "IL Sottosuolo di Napoli". Tip. A.G.I.F., Aversa, Napoli, pp. 242-254.

# Analisi e confronto delle procedure tecnico-amministrative per la gestione delle aree a pericolosità geomorfologica per presenza di cavità sotterranee in Puglia, nell'ambito dei territori di competenza delle Autorità di Bacino interregionali di Puglia e Basilicata

ANTONELLO FIORE  
Autorità di Bacino della Puglia  
antonello.fiore@adb.puglia.it

DANILO STEFANELLI  
Autorità di Bacino della Puglia  
danilo.stefanelli@adb.puglia.it

## ABSTRACT

**L**e Autorità di Bacino di Puglia e Basilicata, al fine di garantire un costante processo di aggiornamento del quadro conoscitivo territoriale relativo alle situazioni di maggiore criticità, avviare adeguate campagne di monitoraggio, effettuare idonee valutazioni tecniche preventive agli interventi di trasformazione nelle aree a potenziale pericolosità geomorfologica per la presenza di cavità naturali ed antropiche nel sottosuolo, sia in ambito urbano che extraurbano, hanno predisposto apposite procedure ed Atti di indirizzo finalizzati alla messa in sicurezza dei territori nell'ambito degli strumenti di Pianificazione per l'Assetto Idrogeologico (PAI). La pericolosità legata alla presenza di cavità nel sottosuolo, siano esse legate a processi naturali che interessano rocce solubili (calcarei e gessi), o ad attività antropiche che interessano rocce tenere, facilmente lavorabili e cavabili (areniti, calcareniti e tufi vulcanici), si manifesta attraverso l'apertura improvvisa in superficie di voragini, anche di notevoli dimensioni, capaci di causare gravi danni a persone e cose (Caggiano T. *et al.*, 2007). Gli archivi nazionali sui fenomeni da crollo di cavità sotterranee, gestiti rispettivamente dal Dipartimento di Protezione Civile (Corazza A., 2004) e dall'ISPRA (Nisio S., 2010), evidenziano come tali fenomeni siano diffusi sull'intero territorio nazionale. Un nuovo approccio dal punto di vista tecnico-amministrativo si rende necessario, analogamente a quanto già previsto per la pericolosità da frana e da esondazione di

corsi d'acqua dai Piani di Assetto Idrogeologico (PAI), e relativi programmi di intervento. I PAI, infatti, sono piani territoriale di settore, dalla duplice valenza, conoscitiva e programmatica, che individuano nel bacino idrografico, e non nei limiti amministrativi regionali, l'ambito fisico di riferimento. Per i comuni della regione Puglia bisogna riferirsi a quattro Autorità di Bacino interregionali distinte, due delle quali, quella della Puglia e della Basilicata, hanno già avviato apposite procedure per la ottimale gestione e previsione dei rischi connessi alla pericolosità da cavità sotterranee.

## PREMESSA

La presenza diffusa di cavità nel sottosuolo sull'intero territorio nazionale e regionale della Puglia, ha spinto il Dipartimento di Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri a promuovere nel 2000, una prima ricognizione sui casi di dissesto derivanti da cavità sotterranee. Tale studio è consistito nel censimento e catalogazione, tramite apposite schede, dei dissesti legati allo sprofondamento di cavità sia antropiche che naturali presenti nel sottosuolo. Il censimento è stato avviato attraverso la raccolta di informazioni dai principali organi di comunicazione, dagli Enti locali e da fonti bibliografiche (Corazza A., 2004). Il censimento è stato aggiornato ed è confluito nel Progetto Sinkholes dedicato ai fenomeni catastrofici italiani che, nel 2004, ha visto la pubblicazione su piattaforma informatica di oltre 1000 casi, censiti con l'ausilio del Gruppo Nazionale per la Difesa delle Catastrofi

Idrogeologiche. Lo studio, che ha individuato in Puglia numerosi comuni (Corazza A., 2004), ha incoraggiato l'AdB Puglia in collaborazione con il CNR-IRPI ad avviare un primo censimento delle cavità antropiche (Barnaba F. *et al.*, 2010). Tale attività vede una prosecuzione con l'aggiornamento del catasto delle cavità naturali ed antropiche previsto dalla recente legge regionale della Puglia n. 33/2009 ed affidato alla Federazione Speleologica Pugliese.

L'AdB della Puglia, con competenza sulla maggioranza dei comuni pugliesi, ha nel 2006 approvato un apposito Atto di indirizzo (Autorità di Bacino della Puglia, 2006; Fiore A., 2006), al fine di prevenire eventi catastrofici, informando circa la diffusione e pericolosità di tali fenomeni, per aumentare la consapevolezza su tutto il territorio di competenza, e avviando le procedure di concertazione con gli Enti Locali che avevano per primi affrontato la gestione del risanamento e bonifica del sottosuolo, quale ad esempio il Comune di Canosa di Puglia (BT). Tale Atto interessa anche alcuni comuni della regione Basilicata e Campania, ricadenti nell'ambito dei bacini idrografici di competenza dell'AdB Puglia, e risulta oggi di fondamentale importanza nelle fasi di definizione degli strumenti urbanistici comunali in adeguamento alla pianificazione di bacino; pensiamo ad alcune aree di origine vulcanica del Monte Vulture in Basilicata (Rionero in Vulture, Rapolla, Barile, Atella) o nella fascia appenninica della Campania (Ariano Irpino).

L'AdB della Basilicata, all'indomani dell'evento del 7 maggio 2007 occorso in via

Barcellona ad Altamura (BA), che lambì finanche alcune opere di fondazione di un fabbricato per civile abitazione, ha predisposto nel 2008 una integrazione alle Norme di Attuazione (Autorità di Bacino della Basilicata, 2008; Berardi C. *et al.*, 2009). Tale direttiva risulta interessare tutti i Comuni della Basilicata, ed alcuni della Puglia e della Calabria rientranti nell'ambito dei bacini idrografici di competenza dell'AdB Basilicata che devono tenerne conto nella fase di aggiornamento degli strumenti urbanistici comunali.

Pertanto, attualmente, sulla quasi totalità del territorio pugliese, insistono due distinte procedure tecnico amministrative per la definizione della pericolosità geomorfologica a causa di cavità sotterranee, la prima predisposta dall'AdB Puglia e l'altra dall'AdB Basilicata. Anche se le due procedure trovano una ispirazione comune e in molti passaggi convergono per azioni e finalità, in alcuni aspetti presentano delle diversità. Trascorsi alcuni anni dalla loro approvazione, si intende analizzare le differenze al fine di cogliere gli approcci più idonei per una corretta gestione della pericolosità dovuta alla presenza di cavità sotterranee, finalizzata a garantire la tutela della pubblica e privata incolumità e garantendo le istanze di corretto sviluppo e pianificazione urbanistica con i caratteri di "criticità" del territorio. Confronto che potrebbe incoraggiare la redazione di una norma di carattere nazionale, per la mitigazione della

pericolosità legata alla presenza di cavità nel sottosuolo, da applicare in tutti quei casi analoghi a quelli registrati in Puglia.

#### **ATTO DI INDIRIZZO PER LA MESSA IN SICUREZZA DEI TERRITORI A RISCHIO CAVITÀ SOTTERRANEE (ADB PUGLIA)**

Il Comitato Tecnico dell'Autorità di Bacino della Puglia ha approvato nel 2006 un apposito Atto di Indirizzo (<http://www.adb.puglia.it>), al fine di superare l'iniziale individuazione delle aree a pericolosità geomorfologica del PAI, approvato con delibera n. 39 del 30.11.2005 del Comitato Istituzionale, esclusivamente a causa di fenomeni franosi. Coerentemente con la Legge 183/89, il suolo è inteso quale inestricabile entità costituita da territorio, suolo, sottosuolo, abitati e opere infrastrutturali, strettamente relazionate alle caratteristiche geologico-strutturali dei diversi territori e alle trasformazioni edilizie. L'Atto definisce pericolo di voragine o sprofondamento il potenziale pericolo di subsidenze per crollo di cavità sotterranee, sia di origine naturale che di origine antropica. Nell'ambito delle attività di prevenzione, perimetrazione, monitoraggio e mitigazione della pericolosità geomorfologica, l'AdB Puglia ha inizialmente provveduto ad acquisire l'elenco dei censimenti nazionali e le informazioni degli Enti locali per perimetrare le aree, urbane ed extraurbane, caratterizzate dalla presenza accertata di vuoti nel sottosuolo in "Aree a

pericolosità geomorfologica molto elevata" del PAI vigente (PG3), e le zone con probabilità di presenza di vuoti nel sottosuolo ovvero aree buffer intorno a casi accertati in "Aree a pericolosità geomorfologica elevata" (PG2).

A questo primo aggiornamento del quadro conoscitivo territoriale, che ha portato ad un sostanziale aggiornamento d'ufficio del PAI, si è successivamente andata consolidando una pratica condivisa di aggiornamento delle aree da assoggettare alle prescrizioni d'uso del PAI ai sensi dell'Atto di Indirizzo, all'interno del supporto istituzionale che l'AdB Puglia garantisce ai Comuni pugliesi impegnati nei processi di co-pianificazione urbanistica adeguati alla legge regionale 20/2001 e al Documento Regionale di Assetto Generale (DRAG), oltre che in adeguamento al PAI. In appositi tavoli tecnici con le Amministrazioni Comunali, propedeutici alla verifica di compatibilità dei Piani Urbanisti Generali (PUG), l'AdB Puglia condivide il suo patrimonio di dati e conoscenza in tema di difesa suolo, anche in considerazione delle numerose convenzioni con altri portatori di interessi pubblici, Enti territoriali e di Ricerca (Convenzione "vore" Provincia di Lecce, Carta Idrogeomorfologica della Puglia, ISPRA ecc.) o riferibili ad altre pianificazioni urbanistiche (Piano Urbanistico Tematico Territoriale/Paesaggio - PUTT/p, Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale - PTCP, ed altri piani). A questo iniziale



Foto 1 – Gallipoli (LE), camere di estrazione tra da esili setti irregolari



Foto 2 – Gallipoli (LE), calotta della cavità sezionata dai sottoservizi messi in evidenza da crollo via Firenze (2007)

Foto 3 – Gallipoli (LE), pilastro irregolare e lesionato



so” del livello di criticità del territorio comunale, consultabile on line. Questo processo, lungo e complesso, tanto da essere descritto all’interno di una apposita circolare regionale sulla redazione dei PUG, permette non solo agli amministratori ma anche ai cittadini che partecipano oggi più che in passato all’elaborazione dello strumento urbanistico, di conoscere la fragilità di alcune aree urbane ed extraurbane, al fine di una più corretta e consapevole gestione territoriale e pianificazione degli interventi urbanistici oltre che di messa in sicurezza. Infatti, l’AdB Puglia, nonostante il parere di competenza sui PUG e l’introduzione delle Norme d’Uso negli strumenti urbanistici locali, esprime il proprio parere di competenza su ogni singolo intervento all’interno delle aree perimetrate nei confronti degli Enti deputati al rilascio degli atti autorizzativi, fino all’eventuale deperimetrazione in seguito alla messa in sicurezza da parte di soggetti pubblici e/o privati. Un costante monitoraggio delle trasformazioni edilizie in coerenza con il livello di criticità geomorfologica associata, finalizzata ad evitare gli errori del passato che hanno portato ai numerosi esempi come quelli di Gallipoli e Altamura.

L’Atto prevede, una volta aggiornato il PAI - Assetto geomorfologico nel modo più preciso possibile relativamente all’impronta georeferenziata nel sistema di riferimento regionale (UTM WGS 84) in superficie della cavità, la costituzione di un apposito Catasto da parte dell’amministrazione comunale, al fine di proseguire il monitoraggio dello stato di conservazione delle stesse e di individuare i principali interventi di messa in sicurezza, da condividere preventivamente con l’AdB. L’atto di indirizzo interessa attualmente i soli comuni della Regione pugliese che ricadono nell’ambito di competenza dell’AdB della Puglia e non i comuni pugliesi ricadenti nell’Autorità di Bacino della Basilicata e nell’Autorità di Bacino del Fortore interessati anch’essi dalle stesse problematiche.

scambio di informazioni, segue una verifica e condivisione dei quadri conoscitivi alla scala della pianificazione urbanistica generale e di dettaglio, agevolata dalle stratificate e molteplici conoscenze a livello locale, per l’individuazione più precisa e affidabile delle aree potenzialmente interessate dal rischio sprofondamento. L’approvazione del

Comitato Tecnico, una formale condivisione dell’Amministrazione Comunale (Delibera di Consiglio e/o Giunta) e la successiva approvazione da parte del Comitato Istituzionale con la pubblicazione sul sito dell’Autorità di Bacino portano, preliminarmente al parere di competenza e all’atto di adozione del PUG, ad un aggiornamento condiviso e “dal bas-

## CASO STUDIO GALLIPOLI

A cavallo tra il 1800 ed il 1900, la parte orientale dell'abitato di Gallipoli (LE) è stata interessata da un'intensa attività estrattiva in sotterraneo per la produzione sia di conci di "tufo" sia di pietra ornamentale per superfici esterne. La profondità di rinvenimento del giacimento calcarenitico, è variabile tra i 2 ed i 25 m dal piano campagna. L'attività estrattiva si è sviluppata, nel tempo, attraverso ampie sale con pilastri di forma irregolare di 2-3 metri di lato disposti in modo casuale (FOTO 1). Il giacimento coltivato veniva raggiunto attraverso dei pozzi verticali di forma subcircolare (pozzi "a campana") che si allargavano progressivamente verso il basso. Eseguito lo scavo della campana, iniziava la coltivazione del giacimento su ampie aree, con il metodo del "pilastro abbandonato" su un unico livello. La ricostruzione delle aree di accesso è stata possibile solo attraverso l'osservazione stereoscopica di fotografie aeree storiche (1954/55, 1968, 1972, 1987 e 2001) e la raccolta di testimonianza.

La sera del 29 marzo 2007 sulla sede stradale di Via Firenze, in pieno centro abitato, si è verificata l'apertura di una voragine del diametro di 20 metri e profondità di 7 metri (Delle Rose, 2007). Alla fase parossistica hanno fatto seguito crolli successivi, fino all'evento del 1 aprile che ha quasi triplicato l'estensione areale iniziale della voragine, andando a coinvolgere le strutture di fondazione dei vicini edifici (FOTO 2). Le indagini eseguite, congiuntamente al rilievo affidato dall'AdB della Puglia all'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IRPI) di Bari, hanno permesso di ricostruire lo sviluppo delle cavità nell'area a ridosso di quella

del crollo del 2007. Le ispezioni speleologiche hanno evidenziato la significativa estensione della rete caveale che si articola al di sotto di un'area fortemente antropizzata, e l'elevato grado di fratturazione e degradazione dell'ammasso roccioso. Attualmente l'accesso alla rete caveale è possibile solo da una estremità, ciò condiziona fortemente la possibilità di ricircolo d'aria nelle cavità, favorendo fenomeni di condensazione e di alterazione della roccia. Nonostante il meticoloso sforzo compiuto dagli speleologi, non tutto il sistema caveale è stato ricostruito, avendo i crolli ripetuti nel tempo reso inagibile l'accesso ad alcune camere.

Ciò che risulta evidente dall'ispezione dei luoghi è il pessimo stato di conservazione degli elementi "strutturali" (setti, pilastri, ecc.) (FOTO3) delle antiche cave al cui interno le attività erano svolte, spesso abusivamente, senza un vero piano di coltivazione. Le cave ipogee, ormai dismesse ed abbandonate, sono divenute nel tempo vere e proprie discariche di rifiuti, ed i relativi accessi sono stati ostruiti e sepolti fino a farne perdere la memoria.

Con delibera del Comitato Istituzionale numero 25/2008 il territorio sul quale sono state individuate le cavità è stato perimetrato come soggetto a elevato grado di pericolosità (PG2) e molto elevato grado di pericolosità (PG3) (Fig. 1)

### ATTO DI INDIRIZZO PER LA MESSA IN SICUREZZA DEI TERRITORI CAVITÀ' (ADB BASILICATA)

Analogamente a quanto previsto dal PAI dell'AdB Puglia, anche il PAI dell'AdB Basilicata persegue il principale obiettivo dell'individuazione delle aree da proteggere dalle possibili crisi dell'assetto dei versanti collinari e

montani e degli alvei fluviali, dovute rispettivamente agli eventi franosi ed alle piene, premessa per una pianificazione organica e sistematica del territorio avente come obiettivo fondamentale la tutela, la valorizzazione ed il recupero socio-culturale e ambientale dei sistemi naturali nell'ambito dei territori.

Il PAI redatto dall'AdB della Basilicata è uno strumento di pianificazione a carattere "aperto", per sua stessa natura, dovendo aggiornarsi continuamente al quadro dei dissesti potenziali e in corso. La principale differenza con la Puglia è che di norma le sue previsioni sono aggiornate con cadenza annuale, in relazione a nuove condizioni che potranno emergere dall'evoluzione del quadro conoscitivo e dagli effetti degli interventi realizzati. Non potendo escludere la presenza di fenomeni di instabilità idrogeologica o di inondazione, che potrebbero interessare porzioni di territorio non ancora studiati, l'AdB Basilicata rimanda le valutazioni agli Uffici Regionali chiamati a rilasciare i pareri e le autorizzazioni di competenza direttamente, o in seno alle conferenze di servizi, conferenze di pianificazione e di localizzazione. A ben guardare questa appare la più evidente differenza tra il PAI della Puglia e quello della Basilicata, riscontrabile anche relativamente alla tematica del rischio da cavità, e alla attività di co-pianificazione: infatti entro nove mesi dalla data di approvazione del Piano Stralcio o dell'aggiornamento annuale, gli Enti territorialmente interessati sono tenuti ad adeguare tutti gli strumenti di pianificazione territoriale, urbanistica e di settore, generali e attuativi, nonché loro aggiornamenti e varianti, ma nel caso di strumenti di pianificazione urbanistica di livello comunale, essi non sono sottoposti ad

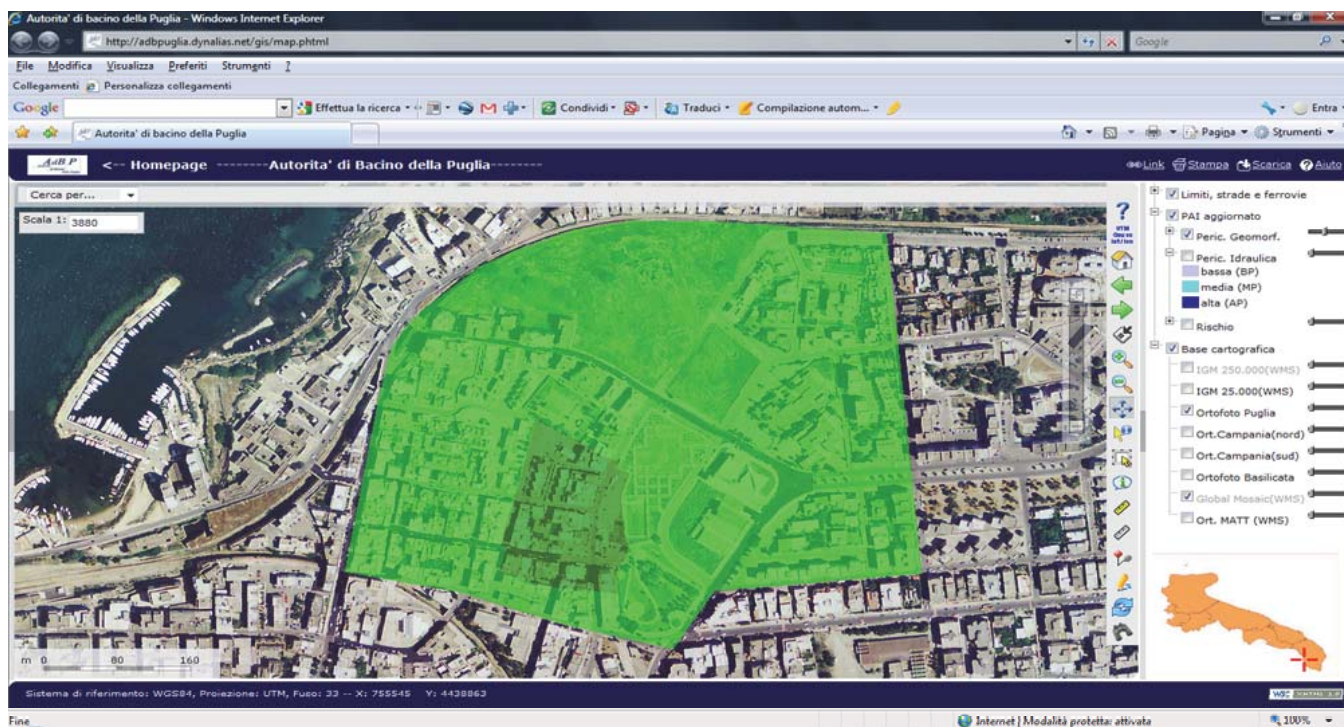


Figura 1 – Stralcio webgis (sito [www.adb.puglia.it](http://www.adb.puglia.it)) dell'abitato di Gallipoli perimetrato con diverso grado di pericolosità geomorfologica



Foto 4 – Altamura (BA), camere di estrazione con evidenti crolli sullo sfondo

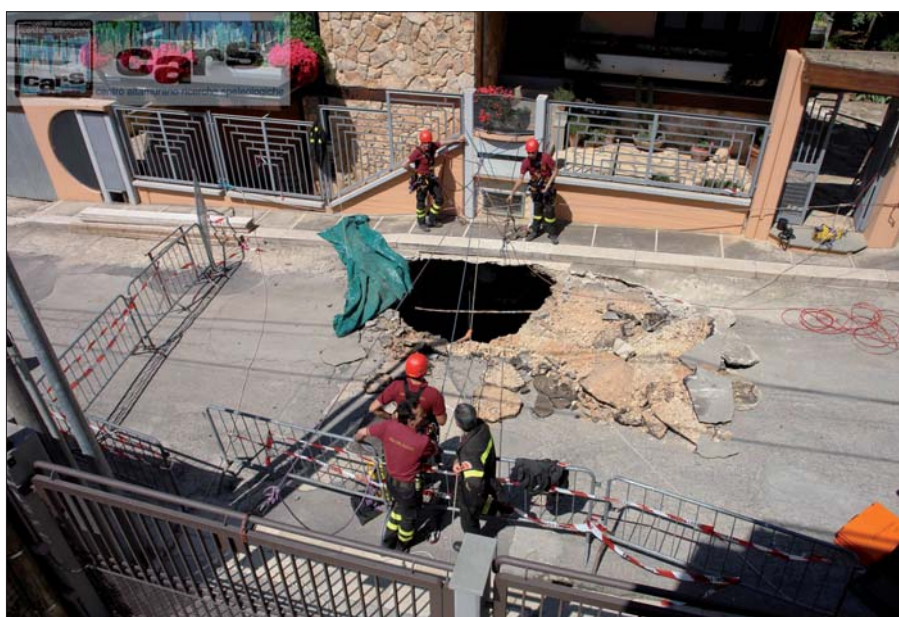


Foto 5 – Altamura (BA), intervento ispettivo dei VVFF nella voragine di via Barcellona (2007)

alcuna attività di condivisione dei livelli di rischio aggiornati alle trasformazioni territoriali e locali del territorio, e al parere dell'Autorità di Bacino. L'Autorità di Bacino, nelle fasi di adozione e approvazione di tali piani, non partecipa alle conferenze di servizi, alle conferenze di pianificazione ed alle conferenze di localizzazione.

Relativamente al rischio cavità il TITOLO VII delle Norme Tecniche del PAI, introduce una "Direttiva per la gestione e messa in sicurezza di aree interessate da cavità sotterranee" (<http://www.adb.basilicata.it>), che obbliga i comuni ricadenti nel territorio di competenza dell'Autorità di Bacino della Basilicata nei quali è stata accertata la presenza di reti caveali sotterranee, di costituire il Catasto delle Cavità Sotterranee (CCS) sulla base di un censimento puntuale delle medesime che ne definisca le dimensioni, il tracciato, le caratteristiche litologiche, lo stato di conservazione, l'eventuale disposizione su più livelli e le interconnessioni e le correlazioni con il si-

stema insediativo loro sovrastante. L'attività preliminare alla formazione di detto Catasto sarà condotta dal Comune interessato con il supporto del Nucleo di un Coordinamento Tecnico (NCT), formalmente costituito con apposito provvedimento comunale e formato da tecnici dell'Amministrazione e/o da esperti esterni, in numero e qualifiche professionali tali da assicurare lo svolgimento dei compiti assegnati. In carenza dei necessari profili professionali, su richiesta del Sindaco, il NCT potrà essere integrato da referenti dell'AdB Basilicata, degli Uffici regionali interessati, delle ARPA e degli Organismi Pubblici di Ricerca (Università, CNR etc.).

#### **CASO STUDIO PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA DA SPROFONDAMENTO AD ALTAMURA**

La periferia nord-orientale dell'abitato di Altamura (BA), ricadente nel bacino idrografico del Torrente Gravina affluente del fiume Bradano (di competenza dell'Autorità

di Bacino della Basilicata), è stata sede in epoche non attuali di estrazione di concii dai livelli calcarenitici presenti al di sotto di una coltre di argilla della potenza media di circa di 10 m. Tale attività estrattiva, realizzata in sotterraneo ed a mano, ha lasciato un dedalo di vuoti (FOTO 4), il cui sviluppo risulta solo parzialmente conosciuto, al di sotto di un'area oggi densamente antropizzata.

A seguito del crollo del 7 maggio 2007, che ha interessato la sede stradale di Via Barcellona (FOTO 5), andando a lambire alcuni edifici, è stato avviato il rilievo delle gallerie ispezionabili (Martimucci V. *et al.*, 2010; Spilotro G. *et al.*, 2010). Dai primi rilievi effettuati dagli speleologi in fase emergenziale e dall'analisi dello stato di conservazione dei setti e dei pilastri, retaggio della passata attività estrattiva, è risultato evidente che le originarie forme e geometrie dei tunnel non erano frutto di specifica progettazione, che potesse conferire loro una funzione statica, ma erano via via definite dalle maestranze, unicamente in funzione della necessità di reperimento dei concii. L'attività estrattiva aveva origine da cave a fossa o da pozzi verticali, oggi colmati ed obliterati, la cui identificazione nella maggior parte dei casi è stata possibile esclusivamente attraverso l'osservazione stereoscopica di fotografie aeree storiche (1947, 1954, 1973, 1987, 1990, 1996 e 2003), e progrediva secondo corridoi principali, con geometrie variabili, dai quali si dipartivano rami laterali con direzioni non sempre regolari. Il verso di avanzamento è tuttora testimoniato dalla presenza di un susseguirsi di gradini sulle pareti dei tunnel con allineamento delle alzate nella direzione della progressione.

Sulla scorta di tali evidenze, oltre che della interpretazione della stratigrafia dei luoghi, l'Autorità di Bacino Basilicata, territorialmente competente per il Comune di Altamura, ha perimetrato e normato nel proprio Piano per la Difesa dal Rischio Idrogeologico un'ampia area (127 ha) soggetta a sprofondamenti diffusi. Con la Delibera del Comitato Istituzionale n. 4/2008, è stata inoltre introdotta, nelle Norme di Attuazione, la "Direttiva per la gestione e la messa in sicurezza di aree interessate da cavità sotterranee" che, oltre a definire gli adempimenti tecnico amministrativi per l'attuazione degli interventi consentiti in aree ricadenti su cavità sotterranee di origine antropica o naturale, pone l'obbligo per i Comuni sui cui territori sia stata accertata la presenza di reti caveali sotterranee, di costituire il Catasto delle Cavità Sotterranee al fine di censire le cavità medesime e di valutarne lo stato di conservazione e l'interconnessione con il sistema insediativo (Berardi C. *et al.*, 2010).

Con delibera del Comitato Istituzionale numero 4/2008 il territorio sul quale sono state individuate le cavità è stato perimetrato come soggetto "Aree a rischio idrogeologi-



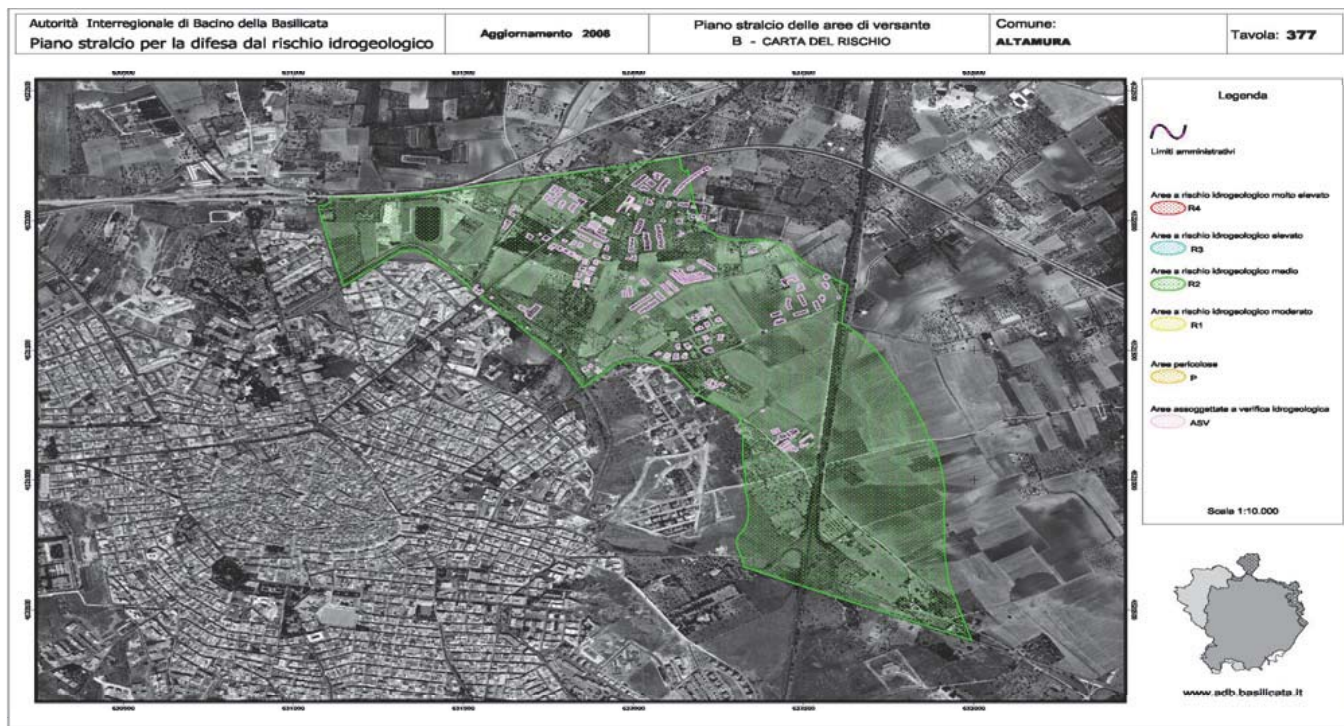


Figura 2 – Stralcio webgis (sito [www.adb.puglia.it](http://www.adb.puglia.it)) dell'abitato di Gallipoli perimetrato con diverso grado di pericolosità geomorfologica

co medio ed a pericolosità media (R2)” e gli edifici esistenti in tali aree sono classificati come “Aree soggette a verifica (Asv)” (Fig. 2)

## CONCLUSIONI

Alla luce di quanto esaminato, appare di fondamentale importanza sottolineare l'importanza delle azioni intraprese dalle due Autorità di Bacino, al fine di integrare l'efficacia dei rispettivi PAI alle situazioni di rischio locali, non previste dalla iniziale predisposizione dal legislatore. È evidente che entrambi risultano efficaci relativamente alle procedure “aperte” di aggiornamento continuo del quadro conoscitivo, con delle differenze che appartengono soprattutto al momento della pianificazione strategica. L'Atto di indirizzo dell'AdB Puglia infatti, nella consuetudine amministrativa, appartiene ad un momento di forte condivisione e partecipazione plurale delle scelte strategiche e di sviluppo urbano della comunità, sintetizzabili nel principio di sussidiarietà introdotto dal DRAG attraverso la co-pianificazione dello strumento urbanistico, quasi a controbilanciare l'assenza di delega nella gestione del PAI che rimane fortemente “centralizzato” negli organi di valutazione tecnica e decisione dell'AdB Puglia: questo garantisce non soltanto una ottimizzazione degli interventi ma anche una maggiore consapevolezza rispetto al passato per i temi relativi alla difesa suolo, da parte della cittadinanza e della pubblica amministrazione che gestisce l'assetto del territorio. Questo aspetto risulta meno evidente nel secondo caso, quello dell'AdB Basilicata, rimanendo delegato ai comuni sia il momento della costruzione delle conoscenze propedeutiche alla pianificazione urbanistica sia la predisposizione della com-

missione deputata alla valutazione degli interventi edilizi consenti e di messa in sicurezza.

Il confronto dei due strumenti normativi dedicati alla gestione della pericolosità delle cavità nel sottosuolo, unici del genere adottati dalle Autorità di Bacino, potrebbe incoraggiare la redazione di una norma di carattere nazionale, volta a individuare appositi strumenti di pianificazione nei quali prevedere le azioni finalizzate alla mitigazione della pericolosità legata alla presenza di cavità nel sottosuolo, norma da applicare in tutti quei casi analoghi a quelli registrati in Puglia.

## BIBLIOGRAFIA

- AUTORITÀ DI BACINO DELLA BASILICATA (2008), *Direttiva per la gestione e la messa in sicurezza di aree interessate da cavità sotterranee*. Piano Stralcio per la difesa dal rischio idrogeologico - Norme di Attuazione - art. 33.
- AUTORITÀ DI BACINO DELLA PUGLIA (2006), *Atto di indirizzo per la messa in sicurezza dei territori a rischio di cavità sotterranee*.
- BARNABA F., CAGGIANO T., CASTORANI A., DELLE ROSE M., DI SANTO A.R., DRAGONE V., FIORE A., LIMONI. P.P., PARISE M. & SANTALOIA F. (2010), *Sprofondamenti connessi a cavità antropiche nella Regione Puglia*. Atti 2° Workshop Internazionale “I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropico”, Roma, 3-4 dicembre 2010, 653-672.
- BERARDI C., BUONAMASSA G., DENORA A., FIORE A., LORUSSO G., PEPE P., WALSH N., ZACCARIA V. (2010), *Attività di censimento per la pianificazione nelle aree interessate da cavità antropiche. Il Catasto delle Cavità Sotterranee (CCS) di Altamura (BA). Un modello litotecnico e di comportamento previsionale*. Atti 2° Workshop Int. “Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato”, Roma 3-4 dicembre 2009: 673-683.
- BERARDI C., CAGGIANO T. & FIORE A. (2009), *Pericolosi-*

*tà geomorfologica da sprofondamenti. L'attività estrattiva storica in sotterraneo: il caso di Altamura (BA)*. 3° Congresso Nazionale AIGA, San Giovanni Valdarno (AR), 25-27 febbraio 2009.

CAGGIANO T., DI SANTO A.R., FIORE A. & PALUMBO N. (2007), *Attività dell'Autorità di Bacino della Puglia per l'individuazione, il censimento e la pianificazione degli interventi per la messa in sicurezza dei territori a rischio sprofondamento per la presenza di cavità sotterranee*. Geologi e Territorio, 1, 32-34.

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 sinkhole e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio”, Roma, 20-21 maggio 2004, 319-330.

DELLE ROSE M. (2007), *La voragine di Gallipoli e le attività di Protezione Civile dell'IRPI-CNR*. Geologi e Territorio, 4/2006-1/2007: 3-12.

FIORE A. (2006), *Pericolosità geologica connessa alla presenza di cavità sotterranee*. Atto di indirizzo dell'Autorità di Bacino della Puglia. Geologi e Territorio, 1-2-3, 3-11.

MARTIMUCCI V., RAGONE G., DENORA A., CRISTALLO F. (2010), *Le cave di tufo di Altamura – Prime relazioni e notizie sulle esplorazioni*. Atti XII Incontro Reg. Speleol. “Speleion 07”, Altamura, 7-9 dicembre 2007, 91-102.

NISIO S. (2010), *Fenomeni di sprofondamento in alcuni centri abitati*. Atti 2° Workshop Internazionale “I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropico”, Roma, 3-4 dicembre 2010, 845-864.

SPILOTRO G., SPECCHIO V., PEPE P. (2010), *L'evento del 07.05.2007 di Via Barcellona, Altamura. Il contributo del CARS alle strategie d'intervento di valutazione del rischio connesso (Provincia di Bari, Puglia)*. Atti del XII Incontro Regionale di Speleologia “Speleion 07”, Altamura, 7-9 dicembre 2007: 103-107.

[www.adb.basilicata.it](http://www.adb.basilicata.it)  
[www.adb.puglia.it](http://www.adb.puglia.it)

# Strategie di recupero e valorizzazione del sottosuolo urbano ed extraurbano: i casi di Canosa, Gravina e Palagianello in Puglia

ANTONELLA CALDERAZZI  
Dipartimento di Architettura e Urbanistica,  
Politecnico di Bari

ALESSANDRO CARIELLO  
Dipartimento di Architettura e Urbanistica,  
Politecnico di Bari

DAVIDE DEL RE  
Dipartimento di Architettura e Urbanistica,  
Politecnico di Bari

PASQUALINA MINERVA  
Ingegnere, libero Professionista

ROSSELLA PAGLIARULO  
CNR- Istituto di Ricerca per la Protezione  
Idrogeologica, Bari

ROCCO PASTORE  
Dipartimento di Architettura e Urbanistica,  
Politecnico di Bari

ROSAMARIA TRIZZINO  
CNR- Istituto di Ricerca per la Protezione  
Idrogeologica, Bari

## 1. INTRODUZIONE

Nell'ambito del PRIN (Programmi di Ricerca di Interesse Nazionale) 2007 è stata svolta una ricerca multidisciplinare e multiscala sugli interventi volti al miglioramento e al recupero di alcuni spazi del sottosuolo urbano ed extraurbano. La Puglia è una delle regioni a più elevata densità di ipogei con alta valenza archeologica e storico-artistica, attualmente in stato di conservazione precario, per cui viene obliterata la lettura completa dell'insediamento stesso. Il patrimonio ipogeo, molto complesso e articolato, è basato su una pluralità di processi insediativi e culturali di epoche e connotazioni diverse, strettamente integrati nel tessuto edilizio attuale. Nello studio di seguito affrontato sono state analizzate le diverse problematiche delle tipologie ipogee, la loro ubicazione, il loro recupero e una nuova destinazione d'uso al fine di ricavare ulteriori spazi collettivi che non necessitano di luce naturale e che siano messe in relazione con lo strato del livello stradale. I casi presi in esame sono quelli emblematici di Canosa di Puglia, Gravina di Puglia e Palagianello. Se opportunamente valorizzate e messe in relazione con il livello stradale, le aree del sottosuolo possono contribuire attivamente allo sviluppo di spazi urbani e favorire la trasformazione del territorio in un ben più vasto processo di controllo e rinnovamento della forma del paesaggio mediterraneo. (Bélanger, 2007). La riqualificazione degli ipogei diviene proposta di fruibilità e uso di luoghi con funzioni diverse, attraverso un modo nuovo di vivere lo spazio tra quote fortemente differenti, tra esterno ed interno, tra spazi in luce e spazi

in ombra, tra memoria e quotidianità. In tale contesto è stato sviluppato il programma di ricerca che ha affrontato da diversi punti di vista le varie problematiche, il sistema di integrazione con la città ed il possibile recupero funzionale. (Ardito, 1990). Inoltre, sempre più forte si pone l'esigenza della divulgazione e della tutela di questo patrimonio che è frutto e testimone della storia e che oggi, per la pressante aggressione antropica del territorio, interagisce con sempre più frequenza ed intensità con le strutture del soprasuolo. Il metodo d'indagine è stato deduttivo. A seguito dell'analisi effettuata mediante schedatura dei siti presi in esame, sono stati individuati alcuni ipogei significativi in funzione della genesi, tipologia, quota, condizioni ambientali e climatiche e potenzialità di recupero, al fine di affrontare le questioni meta-progettuali e/o ipotizzarne una loro riconversione adatta ad attività contemporanee. Sono stati esaminati, inoltre, i caratteri distributivi e la geometria, ovvero la superficie di piano, la superficie lorda pavimento, la profondità massima e la distanza dal suolo. Dall'indagine effettuata sono emersi due modelli insediativi ipogei: lo scavo in orizzontale e lo scavo in verticale.

## 2. IL TERRITORIO

Gli ipogei oggetto di questa ricerca sono localizzati nell'altopiano delle Murge ed in quella porzione di territorio a cavallo tra le regioni pugliese e lucana, cioè a ridosso della Fossa Bradanica. Il basamento è costituito da una successione carbonatica di età giurassico-cretacea (calcari, calcari dolomitici e dolomie) dallo spessore complessivo di quasi 3.000 m. e con una età compresa

tra il Giurassico Superiore ed il Maastrichtiano. Sui calcari, in discordanza, poggiano rocce calcarenitiche e sul margine occidentale anche argille di età plio-pleistocenica. La formazione più estesa è la *Calcarenite di Gravina* costituita da una calcarenite di colore giallo chiaro, con abbondanti fossili marini più o meno cementata e un conglomerato calcareo alla base, la cui età è riferibile al Pliocene Superiore- Calabrian. Sul versante costiero adriatico la successione carbonatica è ricoperta per vaste aree da depositi trasgressivi a cui è stata attribuita la denominazione di *Tufi delle Murge*. (Cherubini *et al.*, 1993 a; 1993 b). Questi depositi, che si rinvengono in lembi residuali anche in affioramenti più limitati all'interno, sono costituiti da litotipi calcareo-arenacei e calcareo-arenaceo-argillosi più o meno cementati. L'età è genericamente attribuita al Pleistocene. Data la costituzione litologica dell'altopiano non c'è una rete idrica superficiale, ma si riscontra la presenza di solchi di erosione, corrispondenti a valli cieche. Tali morfologie sono numerose e costituiscono un reticolo piuttosto denso tanto da presentare a luoghi una certa gerarchizzazione. I più importanti solchi erosivi, simili a canyons, sono di origine carsica generalmente denominati gravine sul lato Bradanico e lame lungo il versante adriatico. Le gravine sono profonde anche centinaia di metri, con pareti verticali o sub verticali e a fondo generalmente piatto. (Boenzi *et al.*, 1991). Lungo queste incisioni è diffusa la presenza di cavità naturali di origine carsica successivamente elaborate dall'uomo, data la caratteristica principale di roccia tenera e lavorabile. (Cherubini *et al.*, 1996).

### 3. DEFINIZIONE DEGLI AMBITI DI INTERVENTO E DEI CASI STUDIO

Il mondo ipogeo può essere letto come una sorta di paesaggio originario che ha suggerito caratteri di architettura letteralmente generati dal suo interno. Se prendiamo in esame l'entità delle cavità sotterranee e dei paesaggi rupestri che attraversano la Puglia dal Gargano al Salento passando per la Murgia centrale, colpisce soprattutto la relazione di stretta continuità non solo costruttiva ma anche funzionale e spaziale tra la quota di sottosuolo e quella di soprasuolo. In alcuni casi la costruzione degli spazi soprastanti è la conclusione di un processo di trasformazione di spazi ipogei, in altri è stata la città di superficie che ha generato la creazione di cavità ipogee. Le cavità di origine antropica o habitat rupestri, testimoni di un antico modo di insediamento nel territorio carsico pugliese, hanno trasformato la morfologia urbana di alcuni centri che, per la loro caratteristica carsica ne hanno favorito la diffusione. (Diomedea & Scaringella, 2004). Il patrimonio ipogeo è molto complesso e articolato ed è basato su una pluralità di processi insediativi e culturali di epoche e connotazioni diverse, a volte strettamente integrati nel tessuto edilizio attuale, quali gli esempi significativi di Canosa e Gravina di Puglia che racchiudono nel sottosuolo della città storica una serie di cavità insediative di natura artificiale ricavate sottraendo materiale lapideo riutilizzato successivamente come materiale da costruzione. Un altro caso emblematico e meritevole di essere valorizzato consiste nelle cavità rupestri di Palagianello, area dell'arco ionico

tarantino, il cui paesaggio è caratterizzato dalla presenza delle gravine che scendono sino alla costa.

La definizione delle linee guida progettuali per la valorizzazione del sottosuolo urbano ed extraurbano in area pugliese, è stata condotta su differenti ambiti di intervento individuando casi di studio lungo un percorso urbano. Un primo ambito di intervento progettuale riguarda gli ipogei di Canosa di Puglia e di Gravina in Puglia in cui si sono riscontrate le stesse peculiarità ovvero sono state rilevate cavità ubicate nel centro storico sottostanti edifici ottocenteschi e distribuite lungo una stessa dorsale urbana. (Nardone, 2007).

Il secondo ambito di intervento ha indagato gli ipogei situati a Palagianello mediante una descrizione e riqualificazione di cavità dislocate lungo un percorso pedonale ai limiti della gravina, in un contesto paesaggistico di grande interesse.

#### 3.1 CASI DI STUDIO: CANOSA, GRAVINA DI PUGLIA E PALAGIANELLO

##### 3.1.1 Canosa e Gravina di Puglia

Nel caso degli ipogei delle città di Canosa e Gravina di Puglia, entrambe situate nell'entroterra barese, ai bordi dell'altopiano murgiano, le ipotesi di recupero tengono conto della loro particolare ed affine dislocazione e localizzazione nel centro abitato. (Cherubini *et al.*, 2000; Cherubini & Pagliarulo, 2006). Le cavità di entrambi i centri sono equiparabili poiché sono state scavate in maniera progressiva, nel medesimo periodo storico, al

di sotto di abitazioni e sono state destinate per lo più alla conservazione di derrate o come semplici depositi vinicoli. (Fig. 1). La genesi 'costruttiva' (anche se in questo caso sarebbe opportuno definirla 'estrattiva') degli spazi sotterranei è determinante ai fini del percorso progettuale, in quanto essi si trovano nella condizione denominata "completamente all'interno del suolo" ovvero presentano l'intradosso della copertura ad una quota più bassa di quella stradale. (Navedoro, 2006). Tale posizione determina scarse condizioni di aero-illuminazione e ventilazione naturale, suggerendo un ri-utilizzo degli ambienti per funzioni che non necessitino della permanenza all'interno degli spazi interrati per lunghi periodi, benché le condizioni ambientali possano essere controllate artificialmente. L'orientamento più opportuno sembra quindi essere quello di ipotizzare la creazione di apparati espositivi, museali o più comunemente culturali che sottendono usi temporanei degli ambienti. Ulteriore parametro significativo ai fini progettuali è l'accessibilità, limitata tanto alla natura delle connessioni verticali che all'afflusso di utenti in quanto proprietà private. Questo tema, tutt'altro che trascurabile, potrebbe prefigurare, in diversi casi, l'impossibilità di fruire fisicamente degli spazi, nonostante l'esperienza conoscitiva sia di notevole interesse per la perizia tecnica e per il valore storico documentale espressi dagli ipogei. (Fig. 2).

Per ottenere che tali spazi 'ri-appartengano' alla memoria degli abitanti pur non potendo essere fisicamente accessibili, è perseguibile l'ipotesi di legare la loro conoscenza ad un ipotetico percorso in superficie attraverso un portale multimediale, all'occorrenza installato negli altri ipogei accessibili, che ne descriva storia, geologia e morfologia. Il *concept* di riferimento per le ipotesi progettuali a Canosa e Gravina di Puglia è quindi quello di creare una rete di spazi ipogei 'urbani' in parallelo alla rete di spazi pubblici in superficie e ad essi 'linkato' attraverso più punti di connessione e di accesso che assolvono anche l'onere comunicativo dell'azione progettuale. In una cavità di Canosa, accessibile da spazio pubblico e dotata di areazione naturale solo negli ambienti meno profondi si è ipotizzata la trasformazione in un centro benessere. Nelle cavità di Gravina, dislocate lungo una dorsale urbana di rilievo per la morfologia del centro, si è creato un modello progettuale rivolto verso la riqualificazione dello spazio pubblico attraverso l'accessibilità alle cavità destinandole ad attività pubbliche.

##### 3.1.2 Palagianello

Come accennato in precedenza il secondo ambito di intervento indaga gli ipogei della

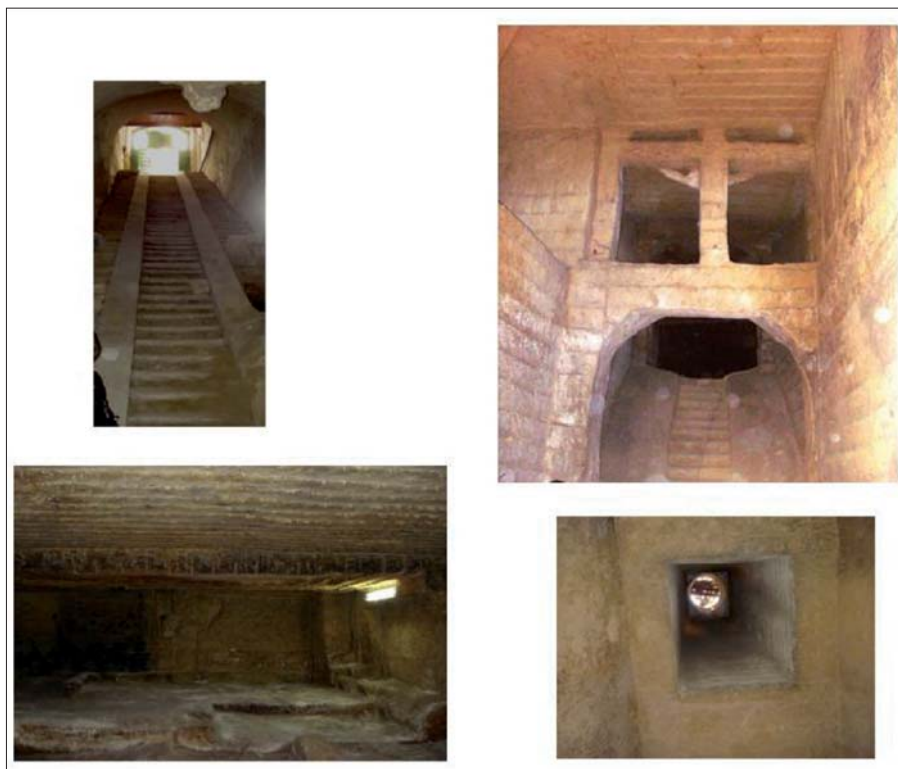


Figura 1 – Ipogei a Canosa di Puglia



Figura 2 – Gravina di Puglia: connessione tra la rete degli ipogei urbani in parallelo e gli spazi pubblici di superficie lungo la dorsale Piazza della Repubblica e via G. Matteotti

città di Palagianello, situata nell'entroterra pugliese, nell'arco ionico tarantino. I sistemi costituiti dalle cavità di Palagianello si estendono soprattutto in senso longitudinale a ridosso del margine sinistro della gravina omonima. (Fig. 3). Mentre gli ipogei di natura artificiale sono stati ricavati attraverso uno scavo in orizzontale del fronte scosceso della gravina, sottraendo materiale lapideo. (Fig. 4). La morfologia insediativa che ne deriva è 'a pettine' ovvero esiste un camminamento anche piuttosto agevole ottenuto da un piccolo sbancamento a mezza costa, sul quale le cavità si susseguono in maniera consequenziale sul fronte della depressione. (Caprara, 1980). La loro estensione è differente a seconda della profondità scavata in senso perpendicolare al percorso. (Fonseca, 1970; 1988). Si ottengono così nuclei di due o tre vani connessi linearmente e muniti di aperture di dimensioni ridotte rappresentate da porte e finestre, uniche fonti di aerilluminazione degli ambienti. Nonostante le condizioni attuali di salubrità siano discutibili, per il buon grado di accessibilità e per

il soddisfacente livello di illuminazione ed aerazione, questo caso di studio offre la possibilità di interpretare, attraverso le esplorazioni progettuali, il tema della residenza. (Fig. 5). In particolare, ci riferiamo ad un tipo non stanziale di residenza, ma temporaneo, soprattutto orientato al sistema ricettivo. Questo consentirebbe un uso, da parte dei medesimi fruitori, di un tempo non eccessivamente continuativo e la riattivazione funzionale di questi luoghi abbandonati, nonché la conoscenza e la fruibilità di questo patrimonio culturale anche a visitatori non residenti. Il modello progettuale ipotizzato per questo caso di studio risulterebbe meno articolato rispetto al sistema analizzato per Gravina e Canosa in quanto le cavità sono concentrate sul fronte della gravina e non diffuse su tutto il territorio urbano. Gli ipogei di Palagianello sono stati oggetto di recenti bonifiche che consentono oggi di poterne fruire, quantomeno visivamente. Gli interventi realizzati, limitati alle infrastrutture a rete, conferiscono potenzialità d'uso senza comprometterne i caratteri architettonici. (Fig.

6). Viene pertanto formulata una soluzione progettuale in cui sono previste opere di messa in sicurezza e consolidamento delle cavità, localizzazione e tipologia impiantistica, sistemazione interna dei servizi e rifunzionalizzazione degli spazi interni da esibirsi a residenza temporanea. (Fig. 7).

#### 4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Durante le fasi di questa ricerca il modello adottato per il recupero e la valorizzazione del patrimonio ipogeo si è basato su azioni progettuali che hanno compreso il riconoscimento delle singole unità ipogee come appartenenti ad un sistema, lo studio sulle strategie per la fruibilità degli ipogei anche ad una utenza "allargata" non strettamente connessa con la proprietà immobiliare (turismo, istruzione, cittadinanza) e la scelta di soluzioni architettoniche e tecnologiche legate alla sostenibilità. E quindi, per ciascun contesto, sono state previste azioni di diverso tipo e di diversa scala per la messa a punto di soluzioni architettoniche, nell'individuazione di soluzioni tecnologiche e nella formulazione di protocolli di gestione.



Figura 3 – Inquadramento territoriale di Palagianello con la mappa indicante l'area degli ipogei e la planimetria generale dell'insediamento ipogeo di tipo lineare nella zona Santuari

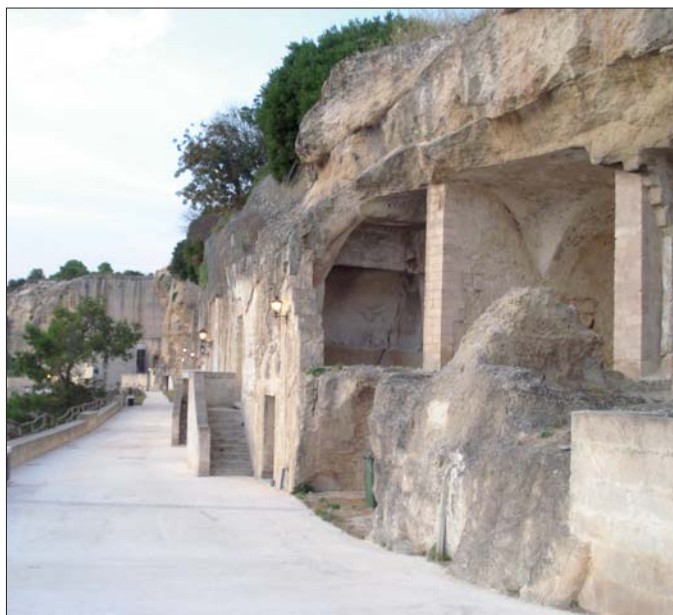


Figura 4 – Insediamenti ipogei localizzati lungo il bordo della gravina a Palagianello



Figura 5 – Lo stato attuale di un ipogeo a Palagianello

L'elaborazione dei modelli progettuali per il recupero dei contesti presi in esame ha avuto come obiettivo il miglior soddisfacimento delle classi esigenziali: i) accessibilità; ii) comfort interno; iii) fruibilità interna e sicurezza d'uso; iv) sicurezza statica; v) aspetto e salvaguardia degli spazi; vi) gestione e manutenzione.

Per quanto riguarda le strategie di connessione sono stati pensati varchi in cor-

rispondenza di ipogei adiacenti. Il rilievo morfologico di alcune cavità ha permesso di individuare l'attiguità di alcuni ambienti e in questo caso la fusione di più unità sotterranee individua la necessità di regolarne la gestione: ogni varco può essere aperto solo nelle occasioni di visita. Laddove il raggiungimento di determinati ambienti risulti difficoltoso, oppure dove risulta vantaggioso collegare due spazi differenti e quindi nel

caso di connessioni verticali o orizzontali si è intervenuti con l'introduzione di ascensori o con piccole perforazioni in orizzontale. Alla strada e/o alle percorrenze interne negli isolati si è affidato il ruolo di connessione dei punti di accesso dei singoli ipogei quando questi sono localizzati nello spazio pubblico e semipubblico. Questa strategia che mira a saldare lo spazio pubblico con quello sotterraneo, interpreta in maniera congiunta il

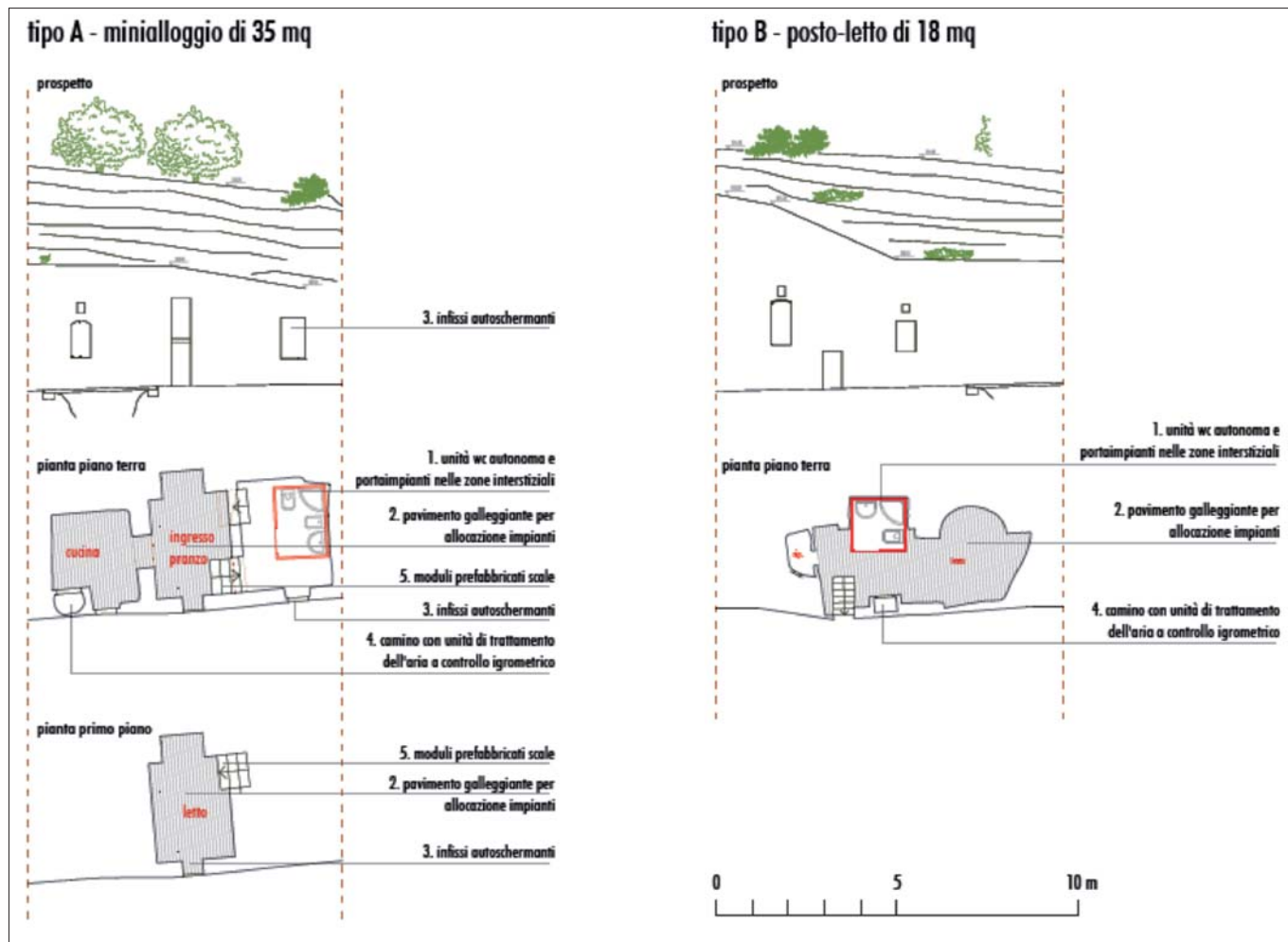


Figura 6 – Palagianello : abaco dei particolari costruttivi

concetto di valorizzazione del sottosuolo con quello di rivitalizzazione urbana attraverso l'implementazione di nuovi programmi funzionali. Il tema dell'originalità insediativa degli ipogei pugliesi sarà certamente di stimolo per più incisive azioni di ricerca nei confronti del territorio e della civiltà architettonica regionale.

## BIBLIOGRAFIA

- ARDITO F. (1990) *Città Sotterranee*, Mursia, Milano.
- BÉLANGER P. (2007) *Underground landscape: The urbanism and the infrastructure of Toronto's downtown pedestrian network*, in: *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22. 272-292.
- BOENZI F., CALDARA M., PENNETTA L. (1991) *Alcuni aspetti del rapporto fra l'uomo e l'ambiente carsico*. Puglia. Itinerari Speleologici - Federazione Speleologica Pugliese - Nuova Ed. Apulia - Martina Franca - serie II, n°5, Insediamenti rurali e riutilizzo di cavità artificiali. 41-51
- CAPRARA R. (1980) *L'insediamento rupestre di Palagianello*, Firenze
- CHERUBINI C., GERMINARIO S., PAGLIARULO R., RAMUNNI F.P. (1993 a) *Caratterizzazione geomeccanica delle calcareniti di Canosa in relazione alla stabilità degli ipogei*. Atti Convegno Nazionale "Le Pietre da costruzione in Puglia: Il Tufo Calcarea e la Pietra Leccese", Bari. 221- 230.
- CHERUBINI C., GERMINARIO S., PAGLIARULO R., RAMUNNI F.P. (1993 b) *Petrographical and geomechanical behaviour of Canosa Calcarenites (Puglia, Italy)*. Proceedings International Symposium



Figura 7 – Esempio di inserimento del volume tecnologico nel prospetto dell'ammasso roccioso

- of Geotechnical Engineering of Hard Soils-Soft Rocks, Atene. Balkema. 43 – 47
- CHERUBINI C., DI CUIA N., PAGLIARULO R., RAMUNNI F.P. (1996) *Caratteri petrografici e meccanici delle calcareniti di Matera*. Mem. Soc. Geol. Vol. LI, II, pp. 761-769.
- CHERUBINI C., PAGLIARULO R., RAMUNNI F.P. (2000) *Caratteristiche geologico-tecniche e problemi di stabilità del territorio di Canosa di Puglia*. Proc. GeoBen 2000 "Geological and geotechnical influences in the preservation of historical and cultural heritage" 381- 387.
- CHERUBINI C., PAGLIARULO R. (2006) *L'attività estrattiva a Canosa di Puglia*. GEAM "Le risorse lapi-

- dee dall'antichità ad oggi in area mediterranea" 183-187.
- DIOMEDE P., SCARINGELLA P. (2004) *Risorse lapidee e attività edilizia a Canosa di Puglia*. DIRES e Comune di Canosa di Puglia
- FONSECA C. D. (1970) , *Civiltà rupestre in Terra Jonica*, Milano-Roma
- FONSECA C. D. (1988), *Civiltà delle grotte. Mezzogiorno rupestre*, Napoli
- NARDONE D. (2007) *Notizie storiche sulla Città di Gravina dalle sue origini all'unità italiana (455-1870)*, V ed., Bari, Adda Editore.
- NAVEDORO G. (2006) *Le chiese rupestri di Gravina in Puglia*, Il Grillo editore

**Atti del Convegno**

**Studi ed interventi  
per il risanamento delle cavità  
antropiche e naturali. Aspetti  
geologici, geotecnici e sismici**

**Altamura (BA), 9 dicembre 2010**

**RIASSUNTI**

# Pericolosità da sprofondamenti antropici e naturali nell'ambiente carsico della Regione Puglia

ANTONIO FIORE  
Autorità di Bacino della Puglia

MARIO PARISE  
CNR-IRPI (Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di ricerca per la protezione idrogeologica, Bari)

Il territorio della Regione Puglia risulta in gran parte costituito da rocce solubili, soggette pertanto all'azione di dissoluzione del carsismo, che determina lo sviluppo di estesi sistemi di grotte naturali, distribuiti pressoché sull'intero territorio regionale (Gargano, Murge e Salento). Alla notevole diffusione dei processi carsici va aggiunta la presenza di una miriade di cavità scavate dall'uomo nel sottosuolo, in epoche diverse e con finalità estremamente diversificate: da semplici spazi utili per le attività agropastorali quali depositi per derrate alimentari, fosse granarie, cantine e frantoi, a luoghi di culto di notevole importanza storico-archeologica, a veri e propri insediamenti civili, sino a cave e miniere di notevole estensione. Nell'insieme, il sottosuolo pugliese è intensamente caratterizzato da cavità ipogee, per gran parte delle quali si è persa nel tempo la memoria storica, e di cui pertanto non si conosce l'esatta localizzazione, né tantomeno le condizioni di degrado e/o di instabilità dei materiali.

Questi elementi sono all'origine degli eventi di sprofondamento (definiti sinkhole in ambito internazionale) che periodicamente, ma con una frequenza che si è andata accentuando negli ultimi anni, avvengono in Puglia.

Dal punto di vista della privata e pubblica incolumità, gli sprofondamenti connessi a cavità antropiche pongono certamente maggiori problemi rispetto a quelli da cavità naturali: le cavità antropiche, sin dall'antichità, hanno sempre avuto un forte collegamento con le attività umane sia di tipo episodico che stanziale. Siano esse state fonte di materiali da costruzione utilizzati per la realizzazione delle città, o luoghi utilizzati durante la vita autarchica di tipo agropastorale, esse si rinvengono nella maggior parte dei casi al di sotto dei centri urbani, o in prossimità di questi ultimi, per cui eventuali evoluzioni e modifiche strutturali che le interessino mettono quasi sempre a rischio anche l'ambiente antropizzato. Allorquando poi la presenza delle cavità si è perduta nel tempo e in più non è stata garantita una manutenzione o un monitoraggio di tipo visivo in grado di registrare e segnalare eventuali situazioni di perico-

lo, molte aree oggetto di scavi sotterranei che una volta erano periferiche sono state inglobate dall'espansione urbanistica poco accorta degli ultimi decenni all'interno del tessuto urbano; ciò ha inevitabilmente portato a costruire, talora inconsapevolmente, ma talvolta con grave consapevolezza, al di sopra di vuoti sotterranei, con conseguenze di frequente gravi.

Nella Regione Puglia sono ben noti a tutti i casi di Canosa di Puglia e di Andria, che nel corso degli anni '70 e '80 causarono anche alcune vittime. La "scoperta" delle intricate reti caveali esistenti al di sotto dei centri abitati determinò un grande sforzo che portò alla realizzazione di numerosi studi specifici e di interventi di bonifica nei centri abitati interessati. Ma sono praticamente tutte le cittadine pugliesi che, con entità più o meno maggiore, risultano interessate dalla presenza di cavità, sia naturali che antropiche. Si tratta quindi di un pericolo estremamente diffuso, e troppo spesso sottovalutato rispetto ad altri eventi di pericoli naturali, quali ad esempio le frane o gli eventi alluvionali.

La cronaca degli ultimi anni mostra infatti un preoccupante incremento nella frequenza degli sprofondamenti, che non risparmiano nessun settore della regione: dal Gargano, dove il caso dei gessi di Marina di Lesina è il più noto, sino alle Murge (basti pensare alle numerosissime cavità multi-livello di Gravina in Puglia, alle cave sotterranee di Altamura, alle cavità carsiche di Grumo Appula nei pressi della rete ferroviaria, al recente sinkhole in agro di Barletta), sino al Salento, con i ripetuti eventi di Casalabate sul litorale Adriatico, quelli delle cave ipogee di Cutrofiano, e l'eclatante episodio verificatosi nel marzo 2007 a Gallipoli. Persino il Subappennino Dauno, unica area del territorio regionale dove non sono in affioramento rocce solubili, risulta interessato da sprofondamenti, in questo caso esclusivamente connessi alle cavità antropiche scavate nei depositi conglomeratici e sabbiosi o arenitici.

Insomma, il quadro regionale mostra una evidente necessità di dedicare sforzi e ricerche alla tematica degli sprofondamenti, specialmente con l'obiettivo di pervenire a

definirne la pericolosità. Tale termine comprende sia la individuazione della probabilità di occorrenza spaziale (dove avverranno i futuri eventi) che quella temporale (quando, o in che lasso temporale, potranno avvenire i futuri eventi).

Definire la pericolosità implica quindi avere a disposizione un quadro cronologico quanto più possibile approfondito ed aggiornato sugli eventi di sprofondamento e la loro evoluzione avvenuti in Puglia; allo stesso tempo, risulta imprescindibile, una volta nota la localizzazione delle cavità, l'esecuzione del rilievo speleologico (al fine di valutarne l'effettiva geometria ed estensione, specie in relazione all'eventuale antropizzato sovrastante: edifici, reti viarie, reti idriche, ecc.), analisi geologiche e geologico-strutturali dell'ammasso roccioso per la valutazione del grado di stabilità degli ipogei. Gli elementi raccolti devono essere di supporto alla progettazione delle attività di monitoraggio che consentano di raccogliere reali dati sulle caratteristiche tecniche o condizioni dei litotipi, sul loro degrado e sulla relativa evoluzione nel tempo delle geometrie degli elementi costituenti la cavità o delle quadro fessurativo.

In merito alla disponibilità di dati cronologici, la situazione risulta alquanto carente, a causa di vari motivi, in primis la scarsa attenzione rivolta al tema degli sprofondamenti da gran parte delle amministrazioni locali e regionali. I pochi dati disponibili derivano prevalentemente da pubblicazioni scientifiche o da fonti cronachistiche, e risulta alquanto difficoltosa l'opera di creare opportune banche dati, specialmente in relazione alla problematicità nel valutare l'attendibilità e l'affidabilità delle notizie talora ritrovate.

Negli ultimi anni, a seguito di ripetuti eventi di sprofondamento, la situazione sta cambiando, almeno in qualche caso. L'esempio di Altamura, dove è stato istituito con successo, seguendo la Direttiva promulgata dall'Autorità di Bacino della Basilicata, il Catasto delle Cavità Sotterranee e dove vengono svolte approfondite indagini sul sottosuolo, è certamente da rimarcare come un esempio positivo. Altro valido punto



di partenza è lo studio, relativo alle cavità antropiche, eseguito di recente dal CNR-IRPI su incarico dell'Autorità di Bacino della Puglia, che ha consentito di raccogliere una notevole quantità di informazioni, per quanto preliminari, sulle condizioni di stabilità di diverse centinaia di cavità antropiche in

regione. Da citare, inoltre, il ruolo svolto dalla Federazione Speleologica Pugliese, che, gestendo il Catasto delle Grotte Naturali ed il Catasto delle Cavità Artificiali della Puglia, rappresenta certamente il primo depositario del patrimonio di conoscenze degli ambienti ipogei in Puglia.

Quelli sopra richiamati sono certamente i primi passi, che andrebbero proseguiti con fasi successive di lavoro di maggiore dettaglio, con la finalità di acquisire una sufficiente conoscenza del sottosuolo regionale, e tenerne conto in qualunque iniziativa di pianificazione territoriale.

## Rilievi speleologici speditivi e di precisione delle gallerie di cave in sotterraneo. Il caso di Altamura (Ba)

PIETRO PEPE  
CARS (Centro Altamurano Ricerche Speleologiche)  
FSP (Federazione Speleologica Pugliese )  
Apogeo - Altamura

VINCENZO MARTIMUCCI  
CARS (Centro Altamurano Ricerche Speleologiche)  
FSP (Federazione Speleologica Pugliese )

Il gruppo speleologico di Altamura (CARS) ha avviato le esplorazioni delle cave di tufo di Altamura già a partire dal 2004. In realtà già alcuni decenni fa erano state avviate le prime esplorazioni senza però una organicità nelle metodologie e nell'archiviazione dei dati.

A seguito degli sprofondamenti degli ultimi 5 anni si è avviata una nuova fase per le esplorazioni e i rilievi speleologici delle cave di tufo che è stata determinante nelle fasi di pianificazione urbanistica.

A supporto di tale affermazione si riporta quanto segue:

- La vincolistica posta dall'AdB sul territorio ha tenuto conto delle esplorazioni speleologiche;
- Il Vice-Presidente del CARS fa parte del Nucleo di Coordinamento Tecnico del Comune di Altamura istituito in adempimento all'art. 33 delle NdA dell'AdB Basilicata;
- La poligonale dei rilievi speleologici ha consentito, insieme ai dati geognostici, di realizzare il Catasto delle Cavità Sotterranee istituito presso il Comune di Altamura sempre in adempimento alle NdA dell'AdB Basilicata;
- La poligonale del rilievo speleologico intersecata con l'uso del territorio ha consentito di classificare le aree urbanizzate come classe di rischio alto (R4) nell'aggiornamento del PAI 2010;
- Le esplorazioni e i monitoraggi in sede esecutiva consentono di ottenere informazioni importanti durante le attività di bonifica e testimoniare le attività eseguite.

La rete caveale di Altamura ha uno sviluppo piano altimetrico molto complesso, con geometrie assai irregolari e frequenti crolli che ne rendono difficile la semplice esplorazione. Inoltre quasi tutti i punti di accesso sono stati ostruiti e pertanto è stato necessario realizzare altri punti da cui sono stati rilevati gli oltre 16km di rete caveale.

I metodi di rilievo e di restituzione dei dati hanno subito una evoluzione nell'ultimo triennio. La restituzione dei dati a supporto degli addetti ai lavori (professionisti ed imprese) è cosa ben diversa dalla semplice rappresentazione grafica dei dati. In sede esecutiva è necessario avere informazioni precise per poter operare su aree urbanizzate con tutte le interferenze che questa determina (presenza di sottoservizi, abitazioni, fondazioni profonde ecc.). Per questo i rilievi in sotterraneo sono stati associati agganciati ad una rete di punti topografici materializzati in superficie attraverso il punto IGM95 presente all'angolo fra Via Bari e Via Mura Megalitiche.

I rilievi speleologici eseguiti si possono classificare in tre classi:

- la fase esplorativa;
- i rilievi speditivi;
- i rilievi di dettaglio.

La scelta delle modalità e del tipo di rilievo da eseguire è eseguita dai coordinatori dei rilievi che conoscono le finalità da raggiungere e le modalità di restituzione dei dati. Tali figure sono quelle che dettano i metodi di rilievo, si aggiornano sui nuovi sistemi di acquisizione, verificano la bontà del rilievo stesso.

### LA FASE ESPLORATIVA

La fase esplorativa è preliminare alle altre due e spesso determina quale tipo di rilievo è necessario eseguire. Inoltre è importante per avere una preliminare conoscenza degli ambienti da rilevare e della strumentazione e attrezzatura di rilievo. In generale le informazioni sono sommarie e la restituzione cartografica poco precisa (derivante per lo più da disegni a mano). Inoltre la fase esplorativa consente di determinare se è possibile accedere al sistema in condizioni di sicurezza. Molte gallerie sono pericolanti e per questo spesso bisogna rinunciare alle esplorazioni e ai rilievi.

### I RILIEVI SPEDITIVI

I rilievi speditivi generalmente consentono di ricostruire l'andamento plani-altimetrico della rete caveale ma non vengono acquisiti dettagli importanti sui contorni e sulle altezze delle cavità. Tale attività, nel caso di Altamura, è stata eseguita principalmente dal 2006 al 2007. In quel periodo le attività di rilievo sono state avviate mediante bussola e distanziometro. Le misure venivano acquisite su un quaderno di campagna e i dati successivamente elaborati nell'applicativo Compass Cave Survey Software. Tale applicativo, molto potente, ha consentito di avere una buona rappresentazione dell'andamento delle cave. Successivamente si è passati all'utilizzo dello Shetlan Attack Pony che registrava i dati angolari automaticamente per importarli nel Compass Cave Survey Software dove venivano inserite le altre informazioni registrate manualmente.

## I RILIEVI DI DETTAGLIO

I rilievi di dettaglio sono stati eseguiti a partire dalla fine del 2009. In quel periodo sono stati acquistati nuovi strumenti (Disto-X e un palmare resistente per gli ambienti sotterranei) ed è stata avviata la restituzione mediante l'applicativo Therion.

Il nuovo sistema di acquisizione consente di registrare sul palmare le misure e di riportare sul palmare appunti di rilievo importantissimi per la successiva restituzione dei dati.

Entrambi i software comunque sono ben integrati con i principali sistemi CAS – GIS. Bisogna sottolineare che il Compass ha una interfaccia più semplice per l'inserimento e la modifica dei dati.

Il Therion invece presenta il vantaggio di poter assegnare proprietà agli oggetti, rappresentare meglio gli elementi di rilievo e soprattutto, in caso di correzione dei rilievi, si porta dietro tutte le informazioni e i simboli già inseriti. Il Compass invece richiede che la "vestizione" sia eseguita con i classici applicativi CAD o GIS in cui si importavano i rilievi e pertanto, in caso di correzione dei rilievi bisogna aggiornare manualmente le simbologie negli applicativi finali.

Come accennato sopra, nel caso delle cave di tufo di Altamura si è posta molta attenzione all'accuratezza planimetrica dei rilievi. Commettere errori superiori ai 50cm comporta il rischio di far sprecare importanti

risorse a chi opera nel campo della bonifica e della messa in sicurezza delle cavità.

Per questo motivo le poligonali dei rilievi vengono chiuse sempre su un punto, per poter determinare l'errore del rilievo. Inoltre nel rilievo ci deve essere sempre almeno una battuta su un punto di coordinate assolute note (FIX). Per fare questo attualmente esistono almeno 25 punti di accesso, realizzati dalla Società Apogeo nell'ambito delle attività di indagine e studio, agganciati ad un punto IGM95 ed in coordinate UTM33-WGS84 che un corretto posizionamento delle gallerie in superficie con le metodologie di picchettamento mediante GPS (con base di appoggio o appoggiate alla rete GSM della Regione Puglia). Quando è necessario vengono creati punti ausiliari in superficie mediante terebrazioni che consentono di aggiungere altri FIX ai files dei rilievi in Therion.

## CONCLUSIONI

Le metodologie acquisite e messe in campo dal CARS ovviamente vengono poi applicate a tutti gli altri contesti di rilievi speleologici. Recentemente il CARS ha avviato una nuova campagna esplorativa e di rilievo delle grotte di Lamalunga, dove fu ritrovato l'Uomo di Altamura. In questo caso le operazioni di rilievo sono molto più complesse di quelle all'interno delle cave di tufo. Infatti gli ambienti sono molto più accidentati ed esiste una esigenza

di preservarli per la quale non è stato possibile materializzare mire. Le finalità dei rilievi nelle cave di tufo e quelle nelle grotte di Lamalunga sono molto differenti: le cave di tufo sono state rilevate per fornire l'elemento principale per la valutazione del rischio di crollo e per avviare le attività di messa in sicurezza che generalmente consistono nel riempimento o nella demolizione delle volte; per questo, proprio per poter operare e intercettare le cavità mediante la terebrazione di fori per il riempimento è necessario avere un elevato dettaglio planimetrico e creare in superficie tanti punti di coordinate note che vanno a costituire i FIX; lo Grotta di Lamalunga fa parte di un progetto di studio finalizzato alla tutela e conservazione e i rilievi servono anche a far conoscere al pubblico questa eccezionale risorsa.

Nel caso delle cave di tufo di Altamura è stato implementato un sistema di rilievo e rappresentazione atto a rendere fruibile i dati sia ai tecnici coinvolti sia agli addetti ai lavori. Pertanto è stata data maggiore importanza ad alcune informazioni rispetto ad altre. La restituzione planimetrica dei contorni e il loro tracciamento in superficie rappresenta l'elemento finale che consente le operazioni di cantiere: conoscere la posizione esatta di una strettoia consente, ad esempio, di scegliere i punti ottimali per gli sbarramenti.

SABINO GERMINARIO  
Comune di Canosa di Puglia

EDMONDO MARTORELLA  
Geologo - Consulente

FRANCESCO PASTORE  
Collaboratore esterno Comune di Canosa di Puglia

# Classificazione per la determinazione degli interventi di bonifica e consolidamento delle cavità antropiche in funzione del fattore di rischio. Il caso di Canosa di Puglia

**L**e Calcareni di Gravina, conosciute anche con il nome di "Tufo di Gravina", le quali fanno parte delle rocce classificate "tenere" e i cui valori di resistenza a compressione raggiungono al più i 25 MPa, sono state oggetto di intensa estrazione in diverse epoche storiche ed utilizzate come materiale da costruzione. La coltivazione di questo litotipo è avvenuta

sia in cave a cielo aperto, tutte ubicate ai margini e nei dintorni dell'abitato di Canosa di Puglia, che in sotterraneo realizzando cunicoli a varie quote e a vari livelli di profondità. Il sottosuolo dell'abitato di questo centro è quindi condizionato in più punti dalla presenza di questi ambienti sotterranei a costituire significativi ipogei le cui quote e la cui ampiezza e articolazione testimoniano

una estrazione di tipo intensivo protrattasi per lunghi periodi. La consistenza di questi depositi e la loro relativa omogeneità litologica ha consentito una coltivazione spedita e non si è reso necessario proteggere gli ambienti cavati da particolari opere di sostegno che anzi risultano del tutto assenti. Queste condizioni di relativo equilibrio sono mutate con il passar del tempo per più fattori dovu-

ti principalmente a modificazioni successive di tipo antropico quali principalmente il convogliamento di acque superficiali, l'edificazione in superficie, la variazione delle condizioni igrotermiche all'interno delle cave.

Le indagini condotte e i risultati ottenuti, relativamente alle proprietà fisico-meccaniche, sono riassumibili nei seguenti punti:

- il rapporto tra il peso di volume del secco ed il peso specifico dei granuli, che esprime il grado di compattezza della roccia, si aggira intorno a valori di 0.50;
- il grado di saturazione dei sedimenti calcarenitici è molto variabile sino all'80%. La non completa saturazione è legata alla cementazione discontinua della roccia sia al contatto tra i singoli clasti ( in parti-

colare bioclasti) costituenti lo scheletro granulare, sia all'interno della matrice siltoso – calcarea che al contatto tra questa ed i granuli stessi.

- i valori di resistenza a compressione semplice delle calcareniti sono molto variabili (da frazioni di MPA o poche unità di MPA sino ad un massimo di 25 MPA) in funzione anche del contenuto d'acqua registrando nei provini saturi cadute di resistenza sino al 35% rispetto ai valori medi.
- la resistenza a compressione degli intervalli argillosi è mediamente variabile tra 0.15 e 0.5 MPA
- la resistenza a compressione del riempimento argilloso delle discontinuità strutturali, laddove esistente, è di circa 0.25 MPA.

Le cause che hanno favorito ed accelerato e, in più casi, innescato processi ai quali conseguono localizzate instabilità degli ambienti ipogei e delle opere imposte sul piano campagna sono:

- Fenomeni di infiltrazione di acqua per convogliamento di acque superficiali non sufficientemente regimentate da accorta disciplina idraulica.
- Chiusura di numerosi "lucernari" costruiti sapientemente dai cavatori che avevano anche la funzione di favorire una corretta aerazione degli ambienti sottostanti, abbassarne il grado di umidità, diminuire il grado di imbibizione dei terreni specie nei lunghi periodi estivi.

## L'impatto della presenza di cavità nella progettazione e realizzazione di infrastrutture ed opere di ingegneria. Il caso della Regione Friuli Venezia Giulia

LUCA ZINI

Università degli Studi di Trieste, Dipartimento di Geoscienze, zini@units.it.

FRANCO CUCCHI

Università degli Studi di Trieste, Dipartimento di Geoscienze

Il corridoio 5, arteria ferroviaria di oltre 4000 km che collegherà Lisbona a Kiev, è una delle grandi arterie europee che interesserà l'Italia. Il dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste (DiGEO) da oltre sette anni collabora con Italferr e Rete Ferroviaria Italiana (RFI) nella realizzazione dei progetti di fattibilità della tratta di collegamento tra Italia e Slovenia nei pressi di Trieste. Tale tratta prevede la realizzazione di una coppia di gallerie del diametro di circa 15 m ciascuna ed interasse di 15/20 m, per un totale di oltre 40 km, che attraverserà il settore meridionale del Carso Classico e collegherà l'abitato di Monfalcone a quello di Trieste e Sesana (Slovenia). Il carsismo particolarmente evoluto e sviluppato di questo territorio rappresenta la principale criticità nella progettazione e nella realizzazione dell'opera in sotterraneo. La determinazione e l'individuazione dell'entità del carsismo ipogeo è essenziale sia da un punto di vista tecnico, per la scelta della metodologia di scavo più idonea (TBM, esplosivo...), sia dal

punto di vista economico-finanziario per la valutazione sulla sostenibilità (il costo di esecuzione dell'opera dipende anche dai tempi di realizzazione e quindi dalle difficoltà nell'avanzamento lavori).

Esiste d'altra parte un'estrema difficoltà nel definire in modo univoco l'ubicazione, lo sviluppo e l'estensione del carsismo ipogeo. I metodi tradizionali di prospezioni dirette ed indirette permettono di investigare solo piccole porzioni di sottosuolo, con notevole indeterminazione all'aumentare della profondità.

L'approccio utilizzato dai ricercatori del DiGEO è stato quello di integrare le indagini sul terreno con i dati derivanti dall'analisi delle caratteristiche dei principali morfotipi carsici (doline, grotte, campi carreggiati...) e delle caratteristiche litologico-strutturali ed idrogeologiche. I risultati di tale analisi permettono da un lato l'analisi puntuale dell'interazione diretta dei diversi morfotipi carsici con la galleria in progetto, dall'altro la valutazione della probabilità di incontrare vuoti ipogei

sconosciuti. Per quanto riguarda le influenze tra il tracciato ferroviario e le grotte esplorate, si è cercato di individuare non solo le interazioni certe con i vuoti conosciuti (grotte), ma anche le eventuali intersezioni con rami di cavità riempiti da materiali di crollo e/o di deposizione (concrezioni e sedimenti).

Si sono distinte le doline di soluzione dalle doline di crollo: al di sotto delle prime è probabile incontrare strutture carsiche prevalentemente verticali parzialmente occupate da sedimenti e detriti, le seconde presuppongono la presenza di vuoti riempiti da materiale eterogeneo conseguente al crollo del soffitto della cavità.

È stata quindi analizzata la distribuzione delle oltre 2500 cavità presenti sul settore italiano del Carso Classico suddividendole in 3 morfotipi differenti: 1197 pozzi (grotte a prevalente sviluppo verticale), 822 gallerie (grotte a prevalente sviluppo orizzontale) e 509 grotte complesse (grotte derivate dall'associazione di tratti a pozzo e tratti a galleria).

Il morfotipo più probabile da incontrare durante gli scavi risulta il pozzo con sviluppo verticale dai 20 ai 150 m e larghezza compresa da pochi metri ad un massimo 15-20 m. Le gallerie con forma subarrotondata e andamento sub orizzontale hanno dimensioni da pochi metri di diametro fino a 20-30 metri e presentano talvolta approfondimenti a forra

fino ad un massimo di 70-80 m. Le gallerie complesse sono notevolmente diverse le une dalle altre e presentano grandi variazioni sia come sviluppi planari che come profondità.

La densità delle cavità e delle doline presenti sul territorio è influenzata dalle caratteristiche litologiche e strutturali e varia mediamente da un minimo di 2.5 grotte/km<sup>2</sup>

e 2.6 doline/km<sup>2</sup> nei calcari ad alveoline e nummuliti del margine meridionale, ad un massimo di 27.8 grotte/km<sup>2</sup> e 45.1 doline/km<sup>2</sup> nei calcari di Aurisina.

Tale analisi permette di individuare i territori maggiormente carsificati e di predisporre le metodologie più efficaci e sicure per l'avanzamento delle attività in sotterraneo.

## Utilizzo di analisi numeriche per la valutazione della stabilità di cavità in sotterraneo: un percorso metodologico

RICCARDO CASTELLANZA, CLAUDIO DI PRISCO,  
DAVID BETTI, MATTEO CIANTIA  
Dipartimento di Ingegneria strutturale, Politecnico di Milano

Le cavità in sotterraneo (antropiche e naturali) sono strutture generalmente caratterizzate da una notevole complessità geometrica che evolve secondo processi di degradazione più o meno rapidi che con il tempo possono far evolvere le proprietà meccaniche dei geomateriali all'interno dei quali esse si trovano. Spesso tali cavità vengono a trovarsi sotto edifici storici o strutture in cemento armato. È evidente allora l'esigenza di un'attenta valutazione della stabilità a lungo termine di tali cavità al fine di poter valutare se e come intervenire per garantire la messa in sicurezza del sistema. La presente nota intende suggerire un percorso metodologico che riassumendo le esperienze degli autori ed utilizzando strumenti innovativi di modellazione numerica tridimensionale consente

di effettuare valutazioni quantitative della stabilità di cavità sotterranee.

Gli autori infatti recentemente hanno maturato specifiche competenze riguardanti: i) lo studio e la modellazione teorico e numerica degli effetti di degradazione chemo-meccanica di rocce calcaree e ed evaporitiche (Castellanza *et al.* 2004, Fernandez-Merodo *et al.* 2007, Betti *et al.* 2008, Gerolymatou *et al.* 2009); ii) la stima del tempo di collasso di miniere abbandonate soggette a fenomeni degradativi intensi e la valutazione dei relativi interventi di messa in sicurezza (Castellanza *et al.* 2008, Castellanza *et al.* 2010); iii) la modellazione tridimensionale non lineare di opere geotecniche (Betti e Castellanza, 2008, Castellanza *et al.* 2009).

Il significativo sviluppo in questi ultimissimi anni di codici numerici tridimensionali

consente di effettuare in tempi relativamente ridotti analisi numeriche non lineari per geometrie 3D. Grazie alla sempre crescente potenza di calcolo dei moderni calcolatori, attualmente chiunque può effettuare analisi dettagliate e complesse, prerogativa, fino a pochi anni fa, di pochi centri di calcolo specializzati.

I principali passi da intraprendere lungo questo percorso possono essere così riassunti:

1) Studio sperimentale: Obiettivo – passare in rassegna tutti i fattori che possono in qualche modo giocare un ruolo nell'analisi del problema e selezionare quelli ritenuti determinanti per la soluzione.

Fasi:

- rilievi: geometrico (cavità ed edifici), idro-geologico, e dei processi degradativi in atto;

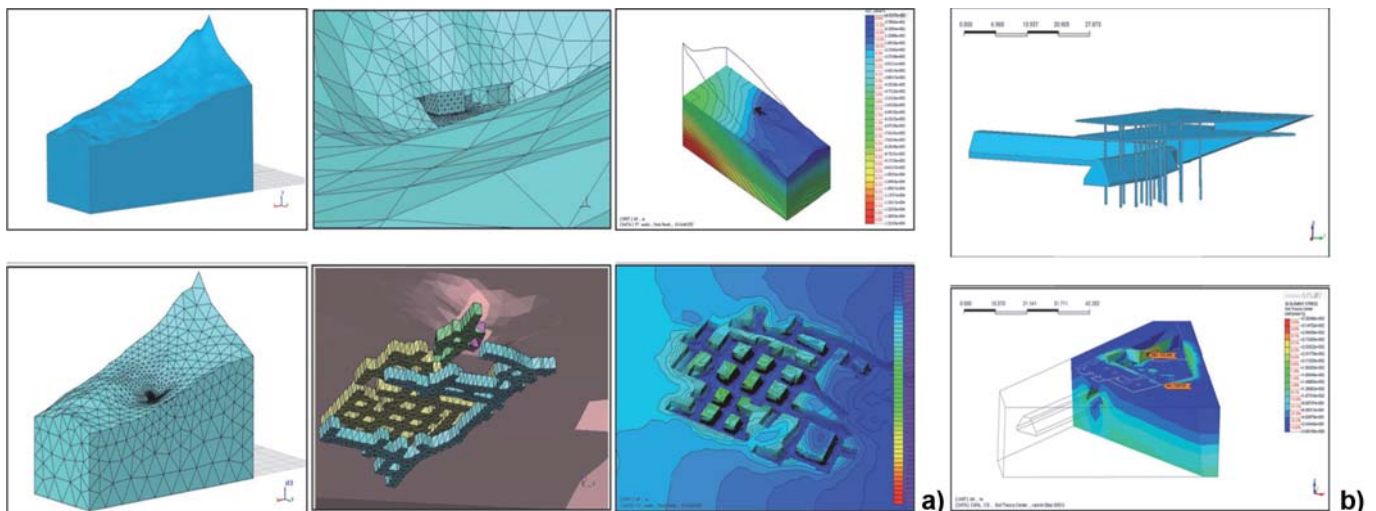


Figura 1 – a) modello 3D di miniere abbandonate; b) modello 3D di cavità con edificio soprastante.

- prove geomeccaniche in laboratorio (e sito) per caratterizzare il comportamento meccanico dei geomateriali intatti ed alterati;
  - prove di degradazione: per quantificare gli effetti dei processi di alterazione nel tempo.
- 2) Studio teorico: Obiettivo – definire un modello matematico capace di descrivere e predire il comportamento geomeccanico dei materiali scelti. Fasi:
- scelta o sviluppo dei modelli teorici adeguati alla descrizione dei processi selezionati;
  - (eventuale) sviluppo e calibrazione di modelli analitici semplificati utilizzando geometrie semplificate per una prima comprensione del problema
  - sviluppo e calibrazione di modelli costitutivi semplici e/o avanzati adatti a descrivere problemi di accoppiamento idro-chemo-meccanico
- 3) Studio numerico : Obiettivo – fornire analisi e previsioni quantitative inerenti la stabilità di cavità sotterranee.
- scelta dello strumento numerico (metodo agli elementi finiti e metodo agli elementi discreti);
  - creazione di un unico modello 2D o 3D che riassume le informazioni selezionate (input geometrico, idrogeologico, geotecnico e geochimico)
  - esecuzioni delle analisi numeriche seguendo un percorso gerarchico da modelli semplici a modelli complessi
  - analisi critica dei risultati e valutazione quantitativa della stabilità

A titolo esemplificativo nella presentazione gli autori illustrano il caso di miniere abbandonate soggette a degradazione (Fig. 1a) e l'interazione di cavità in sotterraneo con edifici soprastanti (Fig. 1b).

#### BIBLIOGRAFIA

- BETTI D., BUSCARNERA G., CASTELLANZA R. NOVA R. (2008), *Numerical analysis of the life-time of an abandoned gypsum mine*, Proc. 12th International Conference IACMAG 2008, Goa (India), Oct. 2008, 1210-1218.
- BETTI D., CASTELLANZA R., (2008) *La modellazione 3D a elementi finiti di opere in sotterraneo*, Strade e Autostrade, 1•2008, pagg. 148-150.

CASTELLANZA R., BETTI, D, LAMBRUGHI (2009) *Modellazione 3D dello scavo con TBM di tunnel in area urbana*, Gallerie 2•2009, pagg. 45-56.

CASTELLANZA R., GEROLYMATOU E., AND NOVA R. (2008) *An Attempt to Predict the Failure Time of Abandoned Mine Pillars*, Rock Mechanics • Rock Engineering, 41 (3), pagg. 377•401, ISSN 0723-2632.

CASTELLANZA R., NOVA R. (2004), *Oedometric Tests on Artificially Weathered Carbonatic Soft Rocks*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, 130, 7, 728-739

CASTELLANZA R., NOVA R., ORLANDI G. (2010), *Flooded gypsum mine remedial by chamber filling*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE Vol. 136(4) , , pp. 629-639, DOI: 10.1061• ASCE GT.1943-5606.0000249.

GEROLYMATOU E., CASTELLANZA R., NOVA R. & VARDOLAKIS I. (2009) *The weathering of the foundation of the Tholos of Asklepios at Epidaurus: experiments and modelling*, Proceedings of the 1st International Symposium on Computational Geomechanics (ComGeo I), Juan-les-Pins, Cote d'Azur, France, April 29 – May 1st, 2009.

FERNANDEZ-MERODO J. A., CASTELLANZA R., MABSSOUT M., PASTOR M., NOVA R., PARMA M. (2007), *Coupling transport of chemical species and damage of bonded geomaterials* Computers and Geotechnics, vol. 34, issue 4, pagg. 200-215.

## Studi ed interventi per la tutela di un patrimonio sotterraneo: l'esempio delle cavità di Napoli

ALESSANDRO FLORA

Dipartimento di Ingegneria idraulica, geotecnica e ambientale, Università di Napoli Federico II

**N**ella formazione del Tufo Giallo Napoletano al di sotto della città di Napoli sono state scavate sin dai primi insediamenti greci cavità di varia forma e grandezza. Le cavità hanno avuto destinazione iniziale diversa (alcune erano luoghi di culto, altre formavano una complessa rete acquedottistica, altre erano semplicemente cave) ma nel tempo hanno spesso subito trasformazioni ed usi che ne hanno completamente modificato la morfologia. Il sistema di cavità è molto articolato, con un volume globale di alcuni milioni di metri cubi ed un numero di cavità censite e rilevate pari a poco meno di 1000. Si ritiene che molte cavità debbano ancora essere censite, e che quindi questo numero sia destinato ad un notevole incremento. Quanto detto rende l'idea della rilevanza di questi spazi ipogei nel contesto

dell'assetto urbano di Napoli, anche in virtù del fatto che le cavità sono in genere molto superficiali e quindi costituiscono un elemento di potenziale rischio per il territorio sovrastante.

Da alcuni anni, il problema del sottosuolo di Napoli è stato affrontato in modo organico dalle competenti autorità comunali, che hanno commissionato approfondite analisi di tipo geotecnico, geologico ed idraulico. La parte geotecnica del lavoro ha riguardato diversi aspetti; in questa presentazione si mostra in estrema sintesi l'approccio utilizzato nell'ambito del settore cavità. In particolare, si evidenziano le difficoltà incontrate nella modellazione dell'ammasso tufaceo, nonché quelle relative alla schematizzazione della complessa geometria delle cavità.

Nello spirito di fornire una prima stima sulle condizioni di stabilità di tutte le cavità

censite, sono state sviluppate analisi, riferite ad alcuni schemi semplificati, che hanno permesso di valutare il grado di sicurezza sia rispetto al collasso locale della volta (caduta blocchi) sia rispetto a quello generale (sforcellamento). Queste analisi sono ovviamente orientative, perché non considerano alcuni aspetti fondamentali quale per esempio la presenza di lesioni nel tufo, ma hanno permesso di produrre una cartografia tematica con una classificazione delle condizioni statiche delle volte e dei pilastri. Nella presentazione si effettuano anche alcune osservazioni relative all'influenza dei fattori trascurati.

Gli studi effettuati hanno permesso di programmare ed eseguire alcuni interventi di recupero o riempimento delle cavità, delle cui problematiche si riferisce brevemente.

# Parametrizzazione e interventi di risanamento di cavità in area urbana. Il caso di Roma

ANGELO CORAZZA  
Dipartimento Nazionale Protezione Civile

MAURIZIO LANZINI  
Sigea

**N**ella città di Roma sono presenti numerosissime cavità sotterranee di origine antropica con diversa età e funzione: cave, catacombe, cunicoli idraulici, acquedotti, fognature e sotterranei di interesse archeologico. La stragrande maggioranza delle cavità è costituita da cave in sotterraneo di materiali da costruzione, principalmente depositi vulcanici litoidi o pozzolanacei e subordinamente ghiaie e/o sabbie.

In base a un censimento effettuato dal Dipartimento della protezione civile nella città di Roma tra il 1915 e oggi si sono verificati circa 100 casi di dissesto dovuti tutti a cave sotterranee di materiali da costruzione; alcuni dei dissesti oltre che danni materiali hanno causato anche vittime.

La presenza diffusa di reti caveali, a volte non conosciute, rappresenta quindi un rischio

di difficile previsione e valutazione per la stabilità delle infrastrutture di superficie.

La valutazione del rischio di crollo di una cavità o di una rete caveale richiede necessariamente la conoscenza di alcuni elementi quali la geometria plano-altimetrica della cavità o della rete caveale (andamento, altezza, larghezza, profondità della calotta dal p.c., ecc.), lo stato morfoevolutivo delle cavità (livello di stabilità attuale) e la parametrizzazione geomeccanica dei terreni nei quali è stata cavata la cavità e di quelli sovrastanti ad essa.

Un problema particolare riguarda la parametrizzazione geomeccanica dei terreni pozzolanacei di Roma nei quali sono state scavate la maggior parte delle cavità antropiche. Tale problema è legato alla difficoltà di prelevare campioni realmente indisturbati.

Nella città di Roma gli interventi di messa in sicurezza, in particolare di fabbricati minacciati dalla presenza di cavità sono stati fondamentalmente di quattro tipi: rimozione della cavità, suo riempimento, suo superamento, suo consolidamento. Le prime due tipologie sono state quelle senz'altro maggiormente utilizzate.

Relativamente alla possibilità di monitorare il territorio romano al fine di individuare possibili movimenti precursori la tecnica dell'interferometria basata su dati radar satellitari offre interessanti prospettive. Questo alla luce sia che della back analysis effettuata sullo sprofondamento avvenuto a via Galatea nel 2008 che della possibilità di disporre per il futuro di dati di piattaforme satellitari che consentono rivisitazioni della stessa scena molto più frequenti (minimo 16 ore) di quelle avute fino ad ora (minimo 24 giorni).



Figura 1 – Crollo di cavità sotterranee Via Galatea - VIII Municipio - Comune di Roma (21 Gennaio 2008)

**Atti del Convegno**

**Studi ed interventi  
per il risanamento delle cavità  
antropiche e naturali. Aspetti  
geologici, geotecnici e sismici**

**Altamura (BA), 9 dicembre 2010**

**SESSIONE POSTER**

# Le cavità antropiche nei centri urbani del Vulture - Melfese: caratterizzazione geostrutturale e metodologie d'intervento. Caso di studio: lavori di consolidamento costone tufaceo lungo via Rapolla in abitato di Barile (Pz)

RAFFAELE CARBONE  
Geotecno – Studio Associato di geologia applicata  
Geotest S.A.S. – Laboratorio geotecnico autorizzato  
con decreto 5249/2004 - Art. 59 D.P.R. 380/2001

CLEMENTE MARCO TUCCI  
Geotecno – Studio Associato di geologia applicata  
Geotest S.A.S. – Laboratorio geotecnico autorizzato  
con decreto 5249/2004 - Art. 59 D.P.R. 380/2001

I sottosuolo dei centri urbani dell'area del Vulture-Melfese (Barile, Melfi, Rapolla, Rionero in Vulture) è caratterizzato dalla presenza diffusa ed articolata di cavità antropiche, con diverso sviluppo sia orizzontale che verticale, ricadenti quasi tutte nei centri storici degli abitati. Due sono i fattori strategici che giustificano tale condizione. I termini litologici affioranti, piroclastiti stratificate legate all'attività vulcanica del Monte Vulture, si presentano con una discreta lavorabilità, che ha facilitato lo scavo, e con buone caratteristiche geomeccaniche, che hanno invece garantito, e garantiscono, una sostanziale stabilità delle cavità. Quest'ultime utilizzate come cantina, botteghe artigiane, magazzino o deposito, frequentemente sono sottoposte, e talora anche collegate, alle sovrastanti abitazioni.

Ricche in origine di valore pratico, hanno finito con l'assumerne uno di tipo diverso, diventando, senza meriti intrinseci e senza aver subito manutenzioni, un documento storico unico ed irripetibile, testimonianza di un modo di costruire, di una fase storica, economica e sociale ormai compiuta, oltre che di un'umile ma sapiente *cultura materiale*.

Allo stesso tempo però tale presenza, essendo potenzialmente concausa di dissesti statici ad abitazioni ed opere civili, più o meno direttamente connesse, ed ai pendii naturali entro i quali spesso sono ricavate, è un vincolo nella realizzazione delle successive opere di urbanizzazione. Si tratta infatti di cavità senza supporti, che hanno subito nel corso dei decenni ed a volte di centinaia di anni, una propria evoluzione tensionale e geomeccanica, raggiungendo variabili livelli di equilibrio statico, i quali possono essere ancora disturbati da un incremento di carico, da un afflusso improvviso di acqua, da tensionamenti sismici, da vibrazioni di traffico, o

più in generale da una qualsiasi combinazione dei fattori di dissesto, antropici e naturali.

Lo stato di abbandono e di degrado in cui versano molte cavità, che di fatto impedisce qualsivoglia periodica ispezione diretta, completa il quadro di rischio indotto.

Ritenendo di notevole interesse sociale offrire un contributo conoscitivo organico e razionale sulla situazione descritta, nel presente lavoro si sono affrontati gli aspetti più specificatamente geostrutturali del problema. A partire da una *diagnosi* sulle condizioni statiche in cui versano le cavità sotterranee, diagnosi intesa come il risultato non solo di un processo conoscitivo, ma anche dell'analisi critica delle conoscenze acquisite durante tale processo, si è giunti all'individuazione delle metodologie più razionali di intervento e di rinforzo, capaci di preservare, nella misura del possibile, la natura architettonica e funzionale delle cavità. È quindi presentato un caso di studio applicativo, scelto in modo da essere rappresentativo di una delle tre diverse tipologie di problemi, cui la variegata casistica esistente è riconducibile.

## METODOLOGIA DI STUDIO PER L'INDIVIDUAZIONE, LA STIMA E IL CONTROLLO DEL RISCHIO.

L'analisi del comportamento delle cavità sotterranee, in ammassi rocciosi, richiede da un punto di vista concettuale, la definizione di: caratterizzazione geologico strutturale; caratterizzazione idrogeologica; definizione del modello geomeccanico dell'ammasso roccioso; individuazione ed uso di uno o più metodi di calcolo; individuazione e verifica strutturale dell'eventuale sistema di sostegno.

Con queste ipotesi e semplificazioni, la metodologia di studio delineata è così schematizzabile:

- caratterizzazione geologico-strutturale ed idrogeologica dell'ammasso entro il

quale la cavità, o le cavità oggetto di studio, sono inserite;

- mediante prove sperimentali di laboratorio, caratterizzazione fisico-meccanica della matrice rocciosa e stima della resistenza al taglio lungo le discontinuità naturali;
- rappresentazione stereografica dei piani di discontinuità ed individuazione della giacitura del piano rappresentativo di ogni famiglia di giunti;
- elaborazione di un modello geometrico tridimensionale del cavo, con l'esplicita rappresentazione delle discontinuità ritenute significative per il suo comportamento statico;
- analisi dei possibili cinematismi di rottura indotti dalle condizioni strutturali e geometriche dei singoli blocchi, isolati dalle discontinuità inserite nel modello geometrico;
- verifica di stabilità, con il Metodo dell'Equilibrio Limite, dei blocchi, supposti rigidi, soggetti a possibili cinematismi traslativi e/o di ribaltamento;
- individuazione e dimensionamento degli interventi di stabilizzazione.

## CAVITA' ANTROPICA RICAVATA IN UN PENDIO SOGGETTO A FENOMENI DI CROLLO ED EROSIONE UBICATA NEL SETTORE NORD-OVEST DI BARILE.

La cavità oggetto dell'analisi geologico-strutturale è situata a Nord-Ovest del centro abitato. Insieme ad altre cavità, in totale se ne contano 26, si sviluppa nel versante sottostante la Statale 93, lungo una direzione di 305° Nord, sostanzialmente ortogonale al ciglio della strada. Come le altre cavità ha una forma rettangolare allungata, con piano di calpestio alla stessa quota del piano viabile.

Il pendio entro il quale è ricavata mostra fenomeni di crollo sui versanti a forte penden-



za e fenomeni d'erosione accelerata lungo le incisioni. Si tratta di piroclastiti stratificate disposte a reggipoggio rispetto al versante, con livelli ruditici ricchi di scorie e lapilli. Lo spessore degli strati a volte supera il metro. Fra le concause cui legare la formazione di blocchi di massa instabili, oltre alle discontinuità presenti, va annoverata l'azione disgregatrice (chimico-fisica) degli apparati radicali della vegetazione spontanea che copre i versanti.

Pericoli di crolli incipienti sono presenti anche all'interno della cavità, da tempo inagibile. Si registrano distacchi in chiave e sui piedritti dell'ordine di decine di metri cubi. Anche le altre cavità mostrano condizioni

strutturali critiche, eccetto quelle consolidate, anche se gli interventi appaiono improvvisati ed empirici.

Per il consolidamento ed il rinforzo del pendio roccioso entro il quale la cavità è ricavata, si suggeriscono i seguenti interventi:

- Bonifica superficiale del versante con il disgreggio dei frammenti rocciosi, la demolizione in sicurezza dei blocchi, di limitata volumetria e in condizioni di precario equilibrio;
- Eliminazione della vegetazione spontanea che copre il versante;
- Regimazione delle acque superficiali per contenere i fenomeni erosivi e sigillatura

con malta bituminosa delle fratture più beanti.

- La stabilizzazione dell'interno della cavità, va invece garantita con:
  - Il disgreggio dei cunei rocciosi ormai in precario equilibrio;
  - La messa in opera di due tiranti pre-sollecitati, dimensionati per imporre al blocco 2 un coefficiente FS = 1.50. La pre-sollecitazione indotta evita ulteriori spostamenti delle masse rocciose, conservando il grado di mutuo incastro dei blocchi 3-4.
  - Il rinforzo del blocco 5 con tre barre passive in acciaio ad alta resistenza.

## Percorsi ipogei da valorizzare a Gravina in Puglia. Gravina sotterranea

MICHELE PARISI  
Associazione "Gravina Sotterranea"

NUNZIA PENTIMONE  
Associazione "Gravina Sotterranea"

**L**a Puglia, per la sua costituzione geografica, è sede di un cospicuo patrimonio ipogeo naturale ed antropico. Tra i tanti centri abitati pugliesi con ipogei soprattutto di origine antropica, vi è quello di Gravina in Puglia, dove la maggior parte della zona abitata presenta, sotto la superficie topografica, cavità sfruttate in diverso modo nel corso del tempo. Una buona parte di queste sembra aver avuto origine dalla necessità degli abitanti di reperire conci in calcarenite (localmente "tufo") da adoperare come materiale da costruzione. Gravina, difatti, pone le sue fondamenta nella formazione delle Calcarenite di Gravina (Pleistocene), definita una "roccia tenera" facile da cavare.

Il Comune di Gravina in Puglia è stato abitato fin dal Paleolitico antico, ha subito l'influenza dei popoli Greci, Romani, Normanni e Visigoti; è stato feudo, contea e poi riserva di caccia di Federico II ed è diventato una fiorente città angioina e poi aragonese. In ogni momento storico la Calcarenite di Gravina ha avuto un ruolo importante per la crescita della popolazione. Tale "roccia" è stata sia scavata, per la realizzazione di abitazioni rupestri, che sfruttata come materiale da costruzione. Alla luce del sole, difatti, questo territorio si presenta ricco e imponente ma lo è altrettanto sotto di esso dove nascosti ambienti sotterra-



Figura 1 – Gravina sotterranea.



nei, realizzati principalmente per l'estrazione di conci di calcarenite, sono poi stati sfruttati come rifugi in tempo di guerra, cantine, cisterne, acquedotti, frantoi, nevai, depositi, stalle, forni ecc. Date le origini antiche di questa città, la realizzazione di queste cave in sotterraneo ha spesso intercettato e inglobato ipogei rupestri e/o altre cave fino a costituire un unico labirintico ambiente anche su più livelli.

Questi sistemi sotterranei nonostante abbiano avuto un ruolo fondamentale per lo sviluppo sociale ed economico di coloro che le hanno realizzate, sono state, in gran parte, cancellate dalla memoria storica degli abitanti.

Alcune volte ritrovano notorietà in seguito a fenomeni di collasso e crolli conseguenti alla perdita di staticità ma ultimamente si riscoprono grazie alle esplorazioni effettuate da Michele Parisi e dai sostenitori della sua Associazione "Gravina Sotterranea". Diversi ambienti sotterranei esplorati si sono rivelati esser vecchi acquedotti, chiese rupestri, cisterne enormi, frantoi, torrioni di vecchie cinte murarie, e perfino un corso d'acqua naturale completamente reso sotterraneo. L'opera dell'associazione è di far conoscere questa risorsa ancora nascosta così da valorizzarla e al tempo stesso salvaguardarla per uno sviluppo in sicurezza e consapevole di tutta la città.

# L'esplorazione geofisica per la ricerca di cavità: alcuni case-histories pugliesi

RUGGIERO QUARTO  
Dipartimento di Geologia e Geofisica – Università degli Studi di Bari

GIUSEPPE CAMERO, MARIO FRATE, LUIGI MANDRISI,  
GIANLUIGI MAZZILLI, ALBERTO QUARTO  
Geoprospector Srl - Bari

In questo poster vengono illustrati i risultati di alcune indagini geofisiche eseguite in Puglia dalla GEOPROSPECTOR srl, per ricerca di cavità carsiche ed antropiche.

Per tali rilievi sono stati utilizzati:

- metodi geoelettrici in corrente continua (profili di resistività), secondo le più moderne tecniche (tomografie elettriche multi elettrodiche e generalmente multi array, bi e tridimensionali);
- metodi radar, generalmente multifrequenza, tramite l'utilizzo di tre distinti apparati strumentali e differenti antenne, con analisi 2D e 3D dei dati acquisiti;
- metodi sismici a rifrazione (con inversione secondo schemi tomografici), non

finalizzati alla ricerca di cavità, ma ad interventi di bonifica.

I risultati delle indagini presentate hanno permesso di:

- scoprire una cavità carsica del tutto sconosciuta ed inaspettata, nell'ambito di un terreno di fondazione di un edificio a Polignano a Mare (Ba);
- contribuire a definire l'eventuale estensione delle cavità antropiche, censite tramite rilievi speleologici, nella zona del recente crollo di Barletta;
- individuare vuoti sotterranei nell'ambito di un piano di espansione edilizia ad Altamura (Ba);
- delimitare un vuoto carsico trovato in uno scavo di fondazione a Castellana Grotte (Ba);

- rilevare l'esistenza di pericolosissimi vuoti paracarsici a Marina di Lesina (Fg).

Tra le numerose indagini geofisiche eseguite con successo dalla GEOPROSPECTOR srl per ricerca di cavità, questi esempi dimostrano l'indubbia efficacia di tali indagini per questo obiettivo, soprattutto quando vengono eseguite con metodologie opportune, strumentazioni adeguate, tecniche di acquisizione ed interpretazione all'avanguardia. Particolarmente efficaci risultano, poi, le indagini geofisiche multidisciplinari; le eventuali difficoltà o ambiguità di una metodologia sono superate dal contemporaneo utilizzo di altri metodi.

## Le indagini geofisiche possono rilevare vuoti sotterranei a profondità maggiori di 10 metri? Alcuni aspetti teorici ed applicativi di tale difficile problema

RUGGIERO QUARTO  
Dipartimento di Geologia e Geofisica – Università degli Studi di Bari

GIUSEPPE CAMERO  
Geoprospector Srl - Bari

È sempre più frequente la necessità di approfondire il piano di fondazione delle costruzioni, tanto che le strutture fondali possono interferire pesantemente con parti di sottosuolo profonde più di dieci metri. Se nell'intorno di tale profondità esistono cavità carsiche o antropiche, si possono determinare situazioni di grave pericolo.

In tali casi, le indagini geofisiche possono rilevare i vuoti? E quale metodo è più efficace? Di primo acchito, si direbbe di sì, scegliendo il diffuso metodo dei profili di

resistività, tramite le moderne tomografie elettriche.

In questo poster dimostriamo, tramite un' opportuna modellazione teorica tridimensionale e tramite indagini in sito su cavità note, profonde più di 10m, come la tomografia elettrica è problematica nel rilievo di tali cavità. Se, poi, a tale problematicità dovessimo aggiungere gli effetti delle diffuse strutture metalliche, sia urbane e sia extraurbane (condotte sotterranee, ferri delle strutture, guard-rail, recinzioni, ecc..), rischieremo erronee interpretazioni di ef-

fetti di corto circuito del campo elettrico da noi indotto nel sottosuolo.

Per fortuna, a tali difficoltà possono spesso sopperire altri metodi geofisici: gravimetria, potenziali spontanei, Ground Penetrating Radar (GPR), sismica. All'uo- po, possono anche essere programmate opportune indagini in foro, multi metodologiche.

Tra i metodi geofisici di superficie, limitandosi a quelli più adoperati nella pratica professionale, possiamo soffermarci sui metodi radar e sismici.

In questo poster presentiamo tre esempi, in cui alla scarsa utilità dei profili di resistività, anche se eseguiti ed interpretati con le più moderne tecniche tomografiche, abbiamo rimediato, con successo, eseguendo indagini

radar in bassa frequenza (50 Mhz) ed indagini sismiche a riflessione ad alta risoluzione (data la generale inefficacia dei metodi sismici a rifrazione, anche tomografici, per la ricerca di cavità).

Naturalmente, l'uso integrato di più metodi geofisici può notevolmente agevolare la risoluzione di tale difficile ricerca. Infatti, i limiti, anche imprevisti, di un metodo, possono essere superati dall'approccio multi metodologico.

# Indagini tomografiche elettriche 3D per fabbricato sito nel comune di Gravina in Puglia – V. Fornaci

G. MICHELE VIZIELLO  
Progeo indagini geofisiche Matera

## PREMESSA

Il Poster che si presenta sintetizza le risultanze di un'indagine indiretta condotta per evidenziare anomalie/disomogeneità del sottosuolo calcarenitico di un'area sita nel Comune di Gravina in Puglia (BA) presso V. Fornaci, nella quale era in progetto la realizzazione di un Fabbricato Urbano.

Si è eseguita una tecnica di rilievo geofisico di ultima generazione per rispondere alle esigenze specifiche del progetto; in dettaglio è stato condotto un:

Rilievo Geoelettrico 3D, tramite la esecuzione simultanea di n.4 linee elettriche di lunghezza  $L=46\text{m}/\text{cad.}$ , poste su campo con geometrie dettate dalla presenza di aree di rilievo disponibili, distanziate circa 5m nella parte più ampia dell'area (area della principale impronta del costruendo fabbricato), e circa 1m nella parte di accesso al principale piano di splateamento; è stata effettuata energizzazione 3D (dipoli di trasmissione e lettura cross-cavo) che ha consentito tramite software dedicato di effettuare una unica inversione dati 3D.

## STRUMENTAZIONI E METODOLOGIE ADOTTATE

La strumentazione utilizzata nella campagna di prospezioni geoelettriche è prodotta dalla IRIS Instruments ed è composta da un resistivometro ad elevatissima sensibilità e velocità in grado di gestire contemporaneamente 10 letture per volta, un Georesistivometro (mod. SYSCAL Pro. SWITCH 96 prodotto dalla IRIS Instruments-France).

Il metodo consiste nel posizionamento in campo di linee dipolari 2D ( $L1 \div L4$ ) di lunghezza data ( $L_y=46.0\text{m}$  nel ns. caso), di-

stanziate con passo noto ( $dx=5.0\text{m}$  circa nel ns. caso nell'area di splateamento,  $dx=1.0\text{m}$  circa nell'area di accesso) e con distanza interdipolare nota ( $dy=2.0\text{m}$ ) – profondità di max investigazione= $8.0\text{m}$  da p.c. circa.

Per il rilievo condotto, si è creata una griglia di n.96 elettrodi disposti lungo n.4 cavi da 24 elettrodi/cad. a coprire al meglio l'area di indagine, così come riportato nella planimetria del sito oggetto di indagine.

Gli aspetti innovativi della strumentazione e metodi adottati riguardano essenzialmente la creazione della sequenza ottimizzata di lettura tra gli elettrodi di campo (software Electrell-Electrell) sino a dare un set di misure nel ns. caso pari a n. 3800 dati di resistività, con dialogo sia tra dipoli dello stesso cavo ( $L1-L2-L3-L4$ ), che tra dipoli cross-cavo.

I dati del rilievo sono poi stati trasferiti dall'unità Syscal direttamente su PC (software ProsysII), ed è poi seguita l'inversione dei dati geoelettrici tramite software ERTLab Solver.

## RISULTANZE DEL RILIEVO GEOELETRICO 3D

Gli schemi tomografici 2D e 3D prodotti, evidenziano la presenza di un'area caratterizzata da forti contrasti di resistività, a testimonianza della presenza nell'area specifica di un sottosuolo caratterizzato da evidenti disomogeneità litologiche.

Siamo infatti in presenza di un'area fortemente antropizzata, con spessore di riporti di alcuni metri da p.c., con disomogeneità quali volumi cavi del sottosuolo riempiti da riporti più o meno saturi; il tutto nell'ambito di un substrato calcarenitico.

Il rilievo elettrico effettuato, è caratterizzato da una estrema variabilità di resistività

in superficie 0.0-4.0m di prof. da p.c. circa, per assumere caratteri di risposta più omogenea a partire dalla profondità citata.

Risulta evidente una risposta elettrica dell'area medio-resistiva con resistività che generalmente si collocano tra  $\rho=100 \div 500 \text{ ohm} \cdot \text{m}$  (valori che rispecchiano un comportamento litoide a medio-discreta cementazione).

Nell'ambito di tale risposta media, sono presenti alcune aree a risposta elettrica anomalmente elevata ( $\rho > 1.000 \text{ ohm} \cdot \text{m}$ ) ed aree a risposta anomalmente bassa ( $\rho < 40 \text{ ohm} \cdot \text{m}$ ), con tutte le situazioni di passaggio intermedio.

Le parti del sottosuolo indagato a resistività anomalmente elevata ( $\rho > 1.000 \text{ ohm} \cdot \text{m}$ ) si individuano nell'area esterna alla griglia elettrodica (area ad W-NW degli elettrodi P.78-P.82) per la presenza di parti antropizzate quali volumi cavi/strutture in cls estremamente resistive di pertinenza dell'edificio esistente confinante con il piano di splateamento.

Parti a risposta anomalmente conduttiva ( $\rho < 40 \text{ ohm} \cdot \text{m}$ ) si sono evidenziate rispettivamente nell'area di ingombro del fabbricato di progetto, sulle seguenti posizioni:

- 1) profondità di 3-4 m lungo la linea L1 (elettrodi P.12-P.16);
- 2) profondità di 4-6 m lungo la linea L2 (elettrodi P.35-P.37);
- 3) profondità 3-4m lungo la linea L4 (elettrodi P.90-92), e profondità 1-2 m (elettrodi: P.94-96; e P.86-P.88);

Tale risposta anomalmente conduttiva per un substrato calcarenitico che si presenta piuttosto massivo sugli affioramenti in loco, può essere associata alla presenza

di riempimento (più o meno parziale e saturo) e/o riporti presenti nell'ambito di volumi cavi del sottosuolo; in seconda analisi tale risposta può essere dovuta al richiamo di acqua nelle parti cave del sottosuolo con formazione di una "corona conduttiva" (pareti sature) che crea l'effetto "Gabbia di Faraday" e risposta finale basso-resistiva, considerati tra l'altro i copiosi apporti pluviometrici occorsi nell'area nei giorni precedenti il rilievo.

### RISCONTRO DELLE ANOMALIE EVIDENZIATE DAL RILIEVO ELETTRICO 3D

Nel periodo marzo-aprile 2010, si sono effettuati i lavori di sbancamento dell'area per il raggiungimento del piano fondale. Tali lavori hanno intercettato la presenza di n.2 evidenti cisterne antropiche interrato, parzialmente riempite di materiale fine e con pareti sature, poste in corrispondenza delle aree delle anomalie conduttive evidenziate nelle linee L2 ed L4; la prima cisterna aveva dimensioni pari ad

altezza  $H=2.5m$ , diam.= $5-6m$  ed era posta a profondità di circa  $4.5-5.0m$  dal piano del rilievo condotto; la seconda cisterna di dimensioni  $H=1.5m$ , diam.= $3-4m$ , era posta a profondità di circa  $3.0m$  dal piano del rilievo condotto.

Tali evidenze hanno confermato la buona affidabilità del metodo proposto nella diagnostica del sottosuolo per la problematica specifica, con effettivo riscontro delle anomalie individuate al termine della elaborazione prodotta.

## Studi sul fenomeno sinkhole nella regione Lazio

GIACOMO CATALANO, LORENZO LIPERI, FABIO MELONI, MARIA CARMELA NOTARMUZI, ORNELLA SATTALINI, ADELAIDE SERICOLA, MASSIMO TOCCACIELI, PIETRO ZIZZARI, VALTER TONELLI  
Regione Lazio, Direzione regionale ambiente, Area difesa del suolo

### INTRODUZIONE

La Regione Lazio, ai fini delle pianificazione territoriale, si è da tempo interessata dei sinkhole, con normative restrittive sull'edificazione (Piana di San Vittorino, DGR n° 8989/1996; P.R.G. di Pontinia-Lt, 1994-1996). Nel 2002, in collaborazione con l'Università degli studi di ROMA Tre,

Dipartimento di Scienze Geologiche, è stato realizzato il primo catalogo regionale dei sinkhole e la "Normativa tecnica per le indagini da effettuare nelle zone indiziate di rischio sinkhole" (DGR n° 1159/2002). Il Progetto ha previsto ricerche di fonti bibliografiche, studi geofisici e verifiche di campagna. Tuttavia, l'esigenza di implementare il catalogo ricomprendendo

aree prima non considerate e di affinare la normativa (delimitazione delle zone a rischio e introduzione di nuove tecnologie di indagine) ha reso necessaria l'esecuzione di nuovi studi.

### IL NUOVO CATALOGO SINKHOLE

L'implementazione del catalogo è stata realizzata attraverso una sistematica analisi

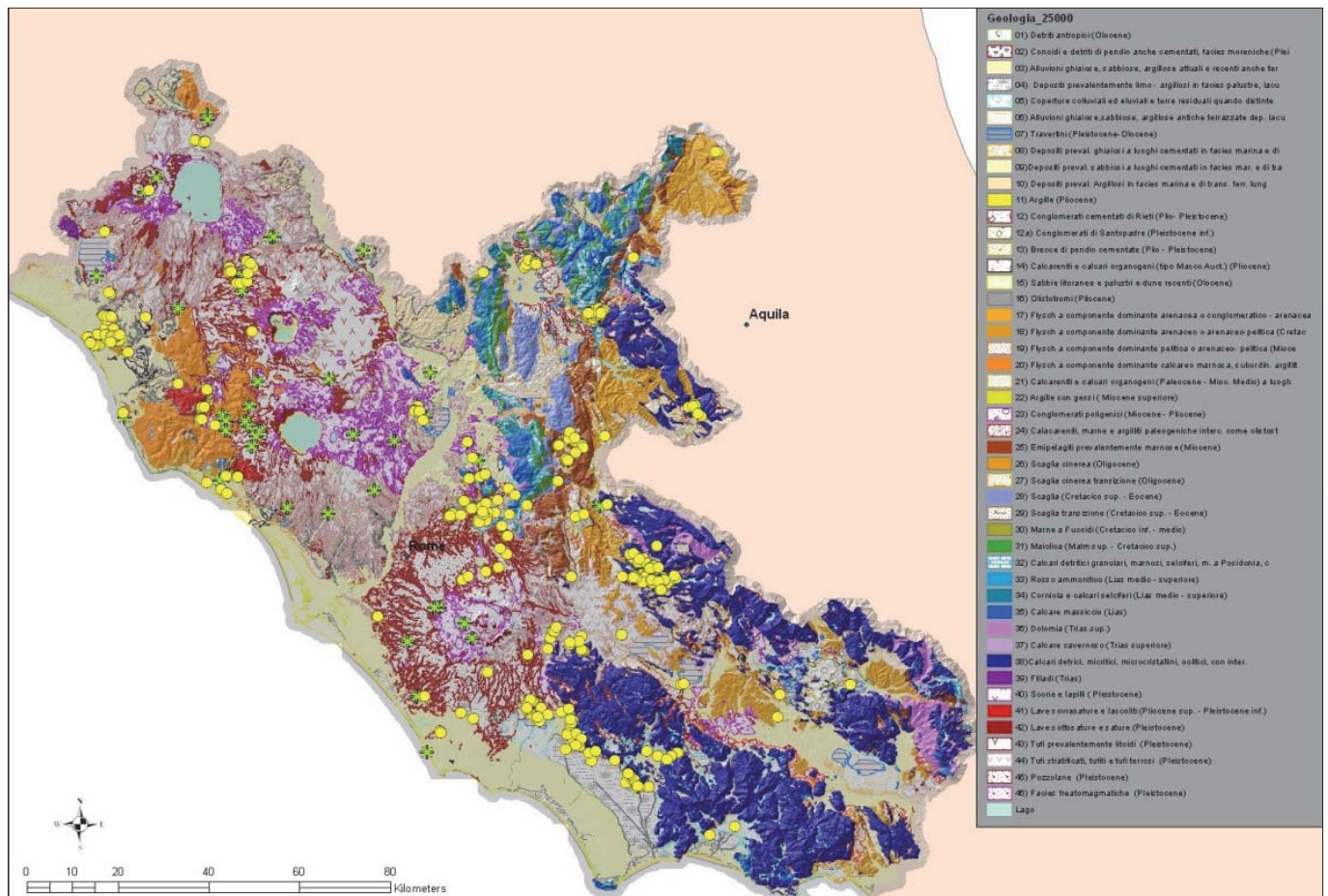


Figura 1 - Catalogo 2009 dei sinkholes del Lazio

di cartografie storiche ed attuali (tra le principali, CTR, scala 1:10.000; IGM, scala 1:25.000; Foto aeree 2002-Regione Lazio e 2008-Ministero dell'Ambiente; Fogli geologici, scala 1:100.000; Catasto Alessandrino, 1660-1661; Catasto Gregoriano, 1816-1835; Cessato Catasto Rustico, 1870-1930/1952; Carte IGM 1.25.000 della Bonifica Pontina, 1927-1932.

Il risultato è stata la costruzione di un catalogo con circa 500 segnalazioni tra sinkhole s.s. e sprofondamenti legati a carsismo nei gessi e in aree carbonatiche (Fig. 1).

Le maggiori concentrazioni di sinkholes sono alla base delle strutture carbonatiche (Piana Pontina, San Vittorino), in corrispondenza di placche di travertino (Bulicame di Viterbo, Bacino delle Acque Albule presso Tivoli, travertini di Cisterna di Latina), in aree ricche di Gessi (Area costiera viterbese), all'interno di strutture carbonatiche (Altopiani di Arcinazzo, Percile) ed ai margini delle aree vulcaniche (Galliciano nel Lazio).

**ANALISI DEL NUOVO CATALOGO E PROSPETTIVE FUTURE**

I sinkholes sono stati messi in relazione alle principali strutture geologiche e tettoniche e confrontati con la sismicità recente e storica (Fig. 2). La scarsa correlazione con i terremoti sembrerebbe indicare che il fenomeno tende a svilupparsi preferibilmente nelle aree prive di importante attività sismica e caratterizzate da prevalenza di fenomeni legati al ciclo delle acque e alla risalita di fluidi caldi e ricchi in gas. Particolarmente interessante è lo sviluppo di Sinkholes legati al ciclo di risalita delle acque circolanti in strutture carbonatiche sepolte (p.es. in Pianura Pontina).

Per indagare meglio il fenomeno e testare nuove metodologie di indagine si sta tentando di caratterizzare il substrato carbonatico nelle aree interessate da sinkholes utilizzando

le misure del rumore sismico (Tromino). Si sta inoltre eseguendo la caratterizzazione vegetazionale delle aree ed il loro grado di naturalità al fine di individuare aree degne di

essere protette (Aree naturali protette, zone umide) o inserite nei siti di importanza regionale (Geositi), da salvaguardare e da rendere inedificabili (Fig. 3).

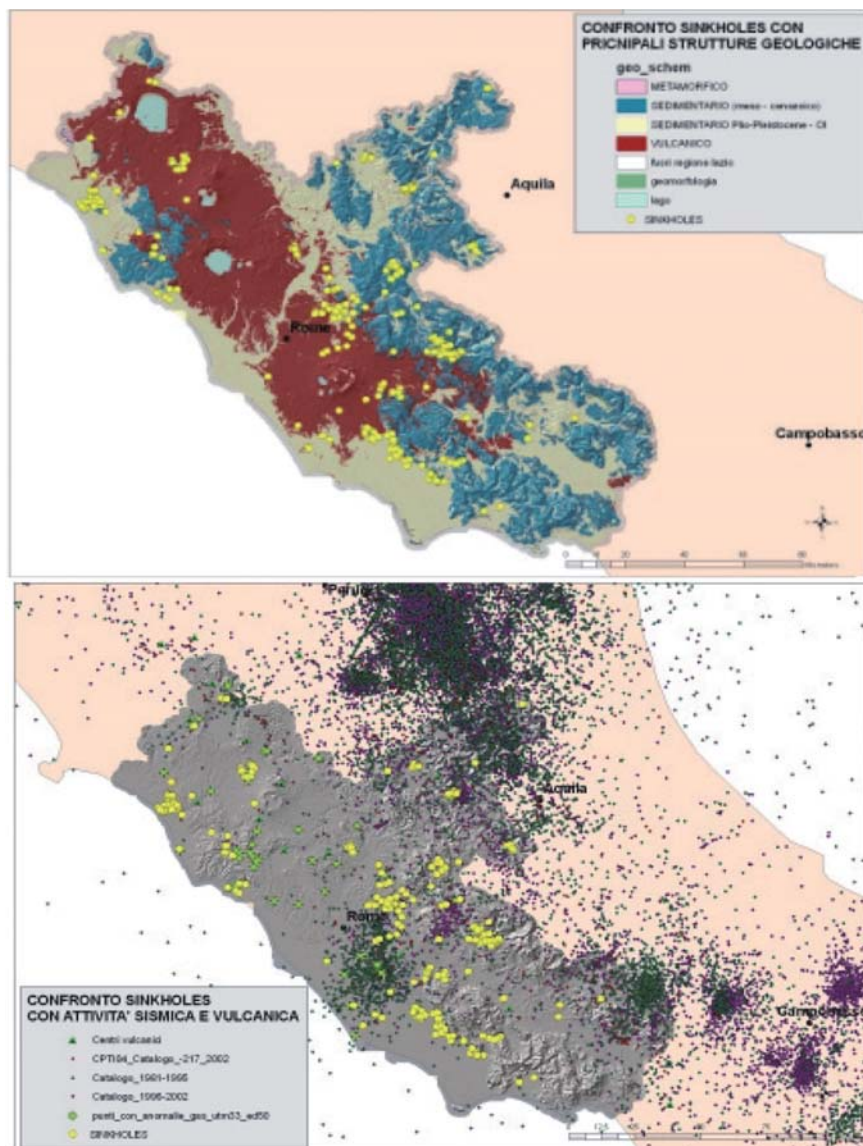


Figura 2 – Confronto tra sinkholes, principali strutture geologiche e sismicità

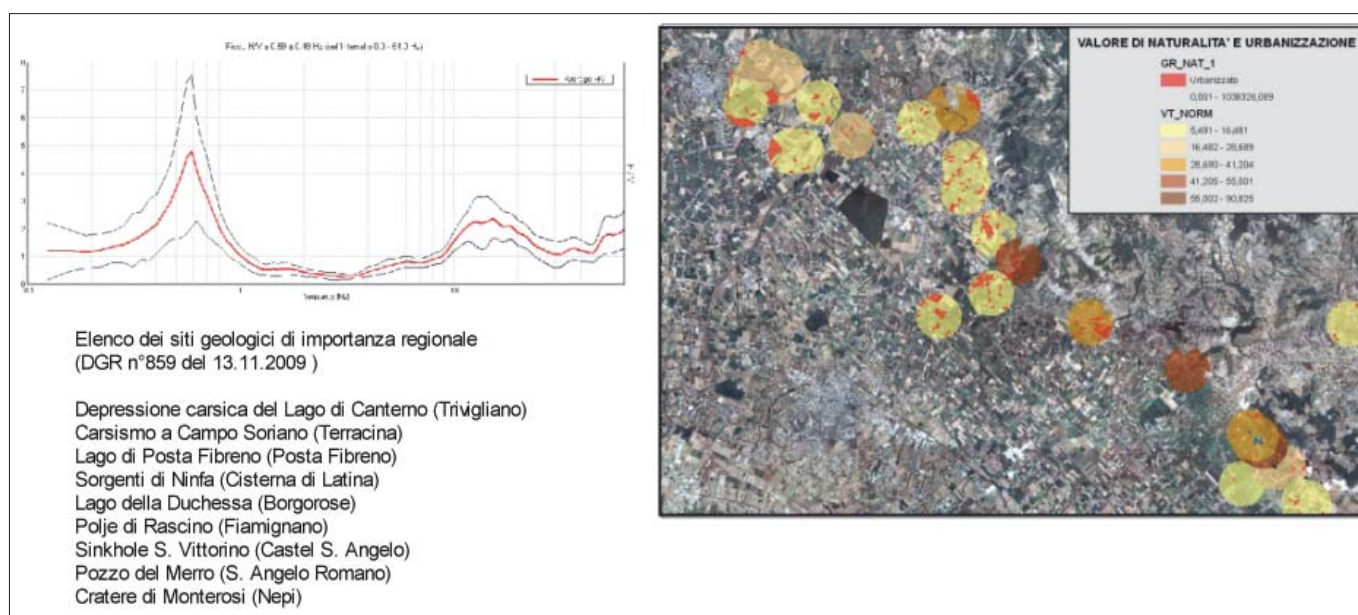


Figura 3 – Prove di rumore sismico H/V, Grado di Naturalità e Geositi

# Dissesto idrogeologico in zona Fornaci ad Altamura

VITO GIORDANO  
Ingegnere Libero Professionista

**N**el corso dell'ultimo ventennio si è sviluppata ad Altamura nelle nuove aree edificabili, in zona Fornaci (dove vi sono delle antiche cave di tufo), la necessità, per evidenti fenomeni di dissesti idrogeologici, di intervenire per emergenza sinkhole.

Queste cave di tufo per secoli sono state coltivate parte a cielo aperto e parte in sotterraneo per l'estrazione dei tufi con i quali è stato edificato il centro storico.

Già dal 1992 è stato eseguito il monitoraggio diretto della zona in oggetto, i cui risultati furono riportati nella Tesi di laurea Sperimentale dal titolo "AMBIENTE DEPOSIZIONALE, CARATTERISTICHE FISICO-MECCANICHE DEL TUFO CALCAREO DI ALTAMURA E CONDIZIONI DI STABILITA' DELLE CAVE A CIELO APERTO E IN SOTTERRANEO" con il Ch.mo Prof. Fulvio Zezza dell'Istituto di Geologia Applicata e Geotecnica c/o Politecnico di Bari.

Venivano eseguiti oltre alle ricerche bibliografiche sull'argomento, rilievi metrici e fotografici, la carta geolitologica di dettaglio della zona di interesse con colonne e sezioni litostratigrafiche ottenute da rilievo ed utilizzando i dati derivanti da sondaggi verticali a rotazione sia a carotaggio indisturbato che a rotazione a distruzione, nonché dall'ispezione diretta di pozzi, grotte ecc. Individuata la colonna litostratigrafica in corrispondenza di Grotta dei Tufo (in località Fornaci), si estraevano campioni a varie quote, dai quali si ottenevano i cubetti nelle dimensioni standard che venivano sottoposti agli esami di laboratorio per ottenere le caratteristiche fisiche (densità apparente, conducibilità termica, ecc.) e le resistenze a compressione (allo stato asciutto e dopo immersione in acqua distillata per 6 ore). L'attendibilità dei risultati ottenuti per i diversi campioni alle varie quote (si individuavano quattro fasce) è fornita dal calcolo dello s.q.m..

Sono stati studiati i modelli per il calcolo della stabilità delle cave a cielo aperto e in sotterraneo, considerando situazioni specifiche limite rilevate in situ.

Le conclusioni sperimentali consentono di affermare che pur essendo l'ammasso di Calcarenite un mezzo continuo e poroso, esso è caratterizzato da disomogeneità intrinseche dovute a forti variazioni di: cemento, peso, dell'unità di volume, di materiale sedimentario e della velocità di sedimentazione, della litificazione e della diagenesi e quindi della resistenza a compressione uniaassiale.



Figura 1 – Cave di tufo Altamura

Pertanto non è possibile assumere in modo dogmatico che la resistenza a rottura di uno dei pilastri di roccia madre di sostegno della cava in sotterraneo sia pari a quella media dei cubetti schiacciati in laboratorio. Né si può credere di poter prevedere il collasso di queste strutture così disomogenee col rigore assoluto di una scienza esatta, perché nelle verifiche è necessario incrociare i risultati di diversi modelli di calcolo, introducendo opportuni fattori di sicurezza in funzione della dispersione dei valori di rottura ottenuti dallo schiacciamento dei provini corrispondenti a quella specifica fascia. E allora nella pratica è necessario capire, guidati dalla sensibilità e responsabilità professionale, quali sono i parametri significativi nelle varie situazioni di stabilità da verificare. Vanno quindi tenute in debito conto, la possibilità di trovarsi in situazioni singolari dovute alla presenza di disomogeneità, aree di frattura, giunti, discontinuità.

Le cave in sotterraneo in oggetto sono state abbandonate per decenni, senza che nessuno si sia preoccupato di eseguire opere di sostegno e puntellamento, in quanto fino a circa venti anni fa queste aree erano destinate esclusivamente alla coltivazione agricola. L'azione scatenante del dissesto di questi terreni, che ha compromesso in più punti la stabilità delle cave in sotterraneo, generando crolli e cedimenti è dovuta all'acqua piovana. Consentire, ormai da decenni all'acqua piovana che si raccoglie lungo il canale di compluvio naturale costituito dalla strada "la Carrera", proveniente dall'ampio bacino, di ingrottarsi, comporta l'allagamen-

to delle gallerie ad ogni pioggia, con conseguente imbibizione della calcarenite. Essendo quest'acqua ricca di  $CO_2$ , si ha un effetto di decementificazione dei granuli, che rende la calcarenite tenera e del tutto simile a degli ammassi limoso-sabbiosi. Di qui il decadimento delle caratteristiche meccaniche, con conseguenti dissesti delle strutture portanti in corrispondenza delle zone di criticità rilevate in situ.

Dall'analisi fatta deriva che è indispensabile procedere dando priorità alla sistemazione del canale di compluvio naturale costituito dalla strada "la Carrera". Tale sistemazione va eseguita correttamente studiando il bacino di competenza, e riportando la progettazione della stessa al classico studio degli afflussi-deflussi (piovosità, tempo di corrivazione, individuazione della pioggia critica per la sezione del canale da sistemare, ecc.), nel rispetto della tradizione e del valore storico della strada "la Carrera", con materiali e metodologie costruttive appropriate.

Dopo l'esecuzione della sistemazione del canale di deflusso, sulla scorta delle indagini e dei risultati ottenuti, sarebbe possibile individuare tratti di cave in sotterraneo strutturalmente stabili che meritano di essere conservate e valorizzate, perché storicizzate, e in grado di testimoniare gli antichi metodi di estrazione dei tufo, con i caratteristici pozzi di approfondimento (nella curia vescovile vi sono documenti che provano l'acquisto dei Tufo prelevati dalle Grotte di San Tommaso appunto in zona Fornaci impiegati nella costruzione della Cattedrale di Altamura).

# Sprofondamenti improvvisi e cavità antropiche nel territorio del Comune di Napoli: condizionamento esercitato dall'assetto geologico del sottosuolo

## INTRODUZIONE

**G**li sprofondamenti improvvisi legati a dissesti di cavità antropiche (anthropogenic sinkholes) rivestono un ruolo ed un significato per molti aspetti particolare, per le differenze e peculiarità genetico-evolutive che li caratterizzano e per effetto del contesto culturale e insediativo in cui generalmente si verificano.

Le ricerche in corso di svolgimento da parte del Servizio Geologico d'Italia dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) sono state estese allo studio dell'incidenza di tali fenomeni in alcune aree del territorio italiano (NISIO, 2010).

Come verrà illustrato relativamente al territorio del comune di Napoli, anche nel caso degli sprofondamenti causati da dissesti di cavità antropiche, l'assetto geologico s.l. del sottosuolo esercita un importante ruolo di controllo delle caratteristiche e della diffusione dei fenomeni.

## I SINKHOLES NEL TERRITORIO DEL COMUNE DI NAPOLI

Nel territorio del comune di Napoli sono stati censiti oltre 190 fenomeni di sprofondamento, ubicati prevalentemente nel settore centrale e, in misura largamente inferiore, nei settori occidentale e orientale.

Gli sprofondamenti presentano frequentemente dimensioni ridotte; relativamente ai fenomeni di cui si dispone il dato della profondità, soltanto nel 10% dei casi la profondità è superiore a 10 m, e raramente (5% dei casi) raggiunge i 30 m.

Il ruolo di fattore di innesco è svolto dagli eventi meteorici intensi e/o prolungati, ma esistono due importanti fattori causali pre-disponenti, tra loro fortemente interagenti: l'esistenza di una complessa ed estesa rete di cavità sotterranee e l'insufficienza del sistema di smaltimento delle acque di superficie.

In particolare, circa il 25% degli sprofondamenti censiti è avvenuto a seguito del crollo

parziale o totale di una preesistente cavità sotterranea.

Nel sottosuolo dell'area napoletana esiste, infatti, una complessa rete di cavità, pozzi e cunicoli scavati per finalità diverse: collegamenti viari sotterranei, gallerie stradali e ferroviarie, acquedotti e cisterne e per l'estrazione di materiale da costruzione.

Ad oggi sono note circa 900 cavità, per una superficie complessiva di oltre 60 ettari e un volume di 8 milioni di metri cubi (Lombardi *et al.*, 2010).

Nel complesso, le condizioni di stabilità delle cave sotterranee di tufo sono buone, tali che il verificarsi di distacchi dalla volta o dalle pareti non costituisce di per sé condizione sufficiente a che si verifichi il collasso della cavità. Diversamente, maggiormente precarie appaiono le condizioni di stabilità dei pozzi di accesso che di norma attraversano il tufo solo nella parte inferiore e delle cave in materiali sciolti. In ogni caso, si osserva che, a parte qualche rara eccezione, il crollo della cavità e la eventuale formazione di una voragine in superficie sono legati al verificarsi di infiltrazioni di acque nel sottosuolo e lo sprofondamento e il crollo rappresentano l'episodio ultimo di una lunga serie di episodi precedenti.

## IL RUOLO DELL'ASSETTO GEOLOGICO

La distribuzione degli sprofondamenti legati a dissesti di cavità sotterranee non è casuale, ma risulta coerente con l'articolazione geologica e geomorfologica del territorio, all'interno del quale è possibile individuare 6 areali caratterizzati da una relativa omogeneità dell'assetto litologico-strutturale e morfologico, che si differenziano anche relativamente alla presenza e distribuzione delle cavità sotterranee.

1. Altopiano Miano-Secondigliano-Capodichino. Funge da raccordo tra la collina dei Camaldoli e la piana Campana. Il sottosuolo è costituito (dall'alto verso il basso) da depositi piroclastici incoerenti di età < 10,5 ky, Tufo Giallo Napoletano

(10,5 ky) in facies cineritica, Tufi Antichi Stratificati Auct., Ignimbrite Campana (37 ky).

2. Rilievi collinari dei Camaldoli, Capodimonte e dorsale Arenella-Vomero-Posillipo. L'individuazione di tali rilievi è legata ai due principali collassi responsabili della formazione della Caldera dei Campi Flegrei (Orsi *et al.*, 1996) e a motivi tettonici minori. L'assetto stratigrafico è caratterizzato dalla successione di: depositi piroclastici incoerenti di età < 10,5 ky, Tufo Giallo Napoletano (10,5 ky) in facies litoide, Tufi Antichi Stratificati Auct., Ignimbrite Campana (37 ky).
  3. Rilievi collinari di Agnano, Astroni e Pisani, formati nella fase di attività prevalentemente esplosiva post-TGN. Sono costituiti prevalentemente da depositi piroclastici incoerenti di età < 4.8 ky.
  4. Fascia pedecollinare, costituita da depositi piroclastici incoerenti di età < 10,5 ky, Tufo Giallo Napoletano (10,5 ky) in facies litoide, Tufi Antichi Stratificati Auct.
  5. Piane da collasso vulcano-tettonico (Pianura, Soccavo, conca dei Pisani), il cui sottosuolo è costituito prevalentemente da depositi piroclastici a diverso grado di rimaneggiamento, dello spessore di molte decine di metri, su un substrato tufaceo molto profondo.
  6. Piana alluvionale del F. Sebeto, costituita da una successione di depositi alluvionali e di ambiente salmastre e piane costiere, costituite prevalentemente da depositi di ambiente marino e da riporti e riempimenti da colmata e piane minori.
- L'individuazione di tali areali aiuta a comprendere perché:

- 1) gli sprofondamenti associati a crollo di cave in materiali piroclastici sciolti sono diffusi in corrispondenza dei settori sommitali delle unità 1 e 2 (dove maggiori sono gli spessori dei depositi piroclastici incoerenti relativi all'ultima fase della attività flegrea) mentre sono totalmente assenti nelle unità 3 e 6;

- 2) gli sprofondamenti in superficie associati a crolli e/o dissesti di cavità scavate nel TGN sono diffusi nella porzione di territorio caratterizzate dalla presenza del TGN in facies litoide;
- 3) gli sprofondamenti in superficie associati a crolli e/o dissesti di cavità scavate nel TGN sono assenti nella porzione di territorio caratterizzate dalla presenza del TGN in facies incoerente (settore 1) e nei settori 3,

5 e 6 nel cui sottosuolo il TGN è assente o presente a profondità di molte decine di m dal piano campagna.

#### BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (1967) - *Il sottosuolo di Napoli*. A.G.I. Atti VIII Convegno Nazionale di Geotecnica.
- AA.VV. (2000) - *Napoli. Indagine sullo stato del sottosuolo. Quadro organico degli interventi*. Rapporto all'aprile 2000. Commissario Straordinario per l'emergenza sottosuolo (O.M. 2509/97), Napoli.

EVANGELISTA A. (1994) - *Cavità e dissesti nel sottosuolo dell'area napoletana*. CIRM, Acta neapolitana, 18: 195-218.

LOMBARDI G., FEOLA A. & MIRAGLINO P. (2010) - *Interventi per la mitigazione del rischio idrogeologico nella città di Napoli*. Geologi, 28, 2010, pagg. 7-17.

NISIO S. (2010) - *Atti 2° Workshop Internazionale "I Sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale e in quello antropizzato"*. Roma, 3-4 dicembre 2009. Servizio Geologico d'Italia (ISPRA).

## La voragine di "San Procopio" a Barletta: analisi preliminari, rilievi speleologici e geofisici per la mappatura della pericolosità geomorfologica

ALFREDO DE GIOVANNI  
Geologo, libero professionista

VINCENZO MARTIMUCCI  
Federazione Speleologica Pugliese  
Centro Altamurano di Ricerche Speleologiche,  
Altamura

MICHELE MARZULLI  
Federazione Speleologica Pugliese  
Gruppo CAI Vespertilio, Bari

MARIO PARISE  
Federazione Speleologica Pugliese  
CNR-IRPI, Bari; m.parise@ba.irpi.cnr.it

NUNZIA PENTIMONE  
Federazione Speleologica Pugliese  
Centro Altamurano di Ricerche Speleologiche,  
Altamura

DANIELE SPORTELLI  
Federazione Speleologica Pugliese  
Gruppo Puglia Grotte, Castellana-Grotte

#### RIASSUNTO

**T**ra la sera del 2 maggio e le prime ore del 3 maggio 2010, in località San Procopio in agro di Barletta, si verificava uno sprofondamento di importanti dimensioni. La voragine, di forma all'incirca circolare, di diametro pari a circa 32 m e superficie netta di 800 m<sup>2</sup> circa, interessava svariati al-

beri d'ulivo, un traliccio Enel e interrompeva la strada comunale Via Vecchia Minervino. Ai margini dello sprofondamento, profondo dai 5 ai 12 m, si intravedevano strutture cunicolari di chiara origine antropica riconducibili a gallerie sotterranee per l'estrazione della calcarenite quale materiale da costruzione (localmente detta "tufo" calcareo), dall'in-

terno delle quali i dissesti si erano propagati alla superficie, determinando la formazione della voragine.

Le cave sotterranee sono state interamente rilevate nell'arco di 4 giornate di lavoro, utilizzando tecniche di rilievo ormai collaudate dalla Federazione Speleologica Pugliese, consentendo di abbinare a una



Figura 3 - Vedute del sink-hole di "San Procopio" - Agro di Barletta



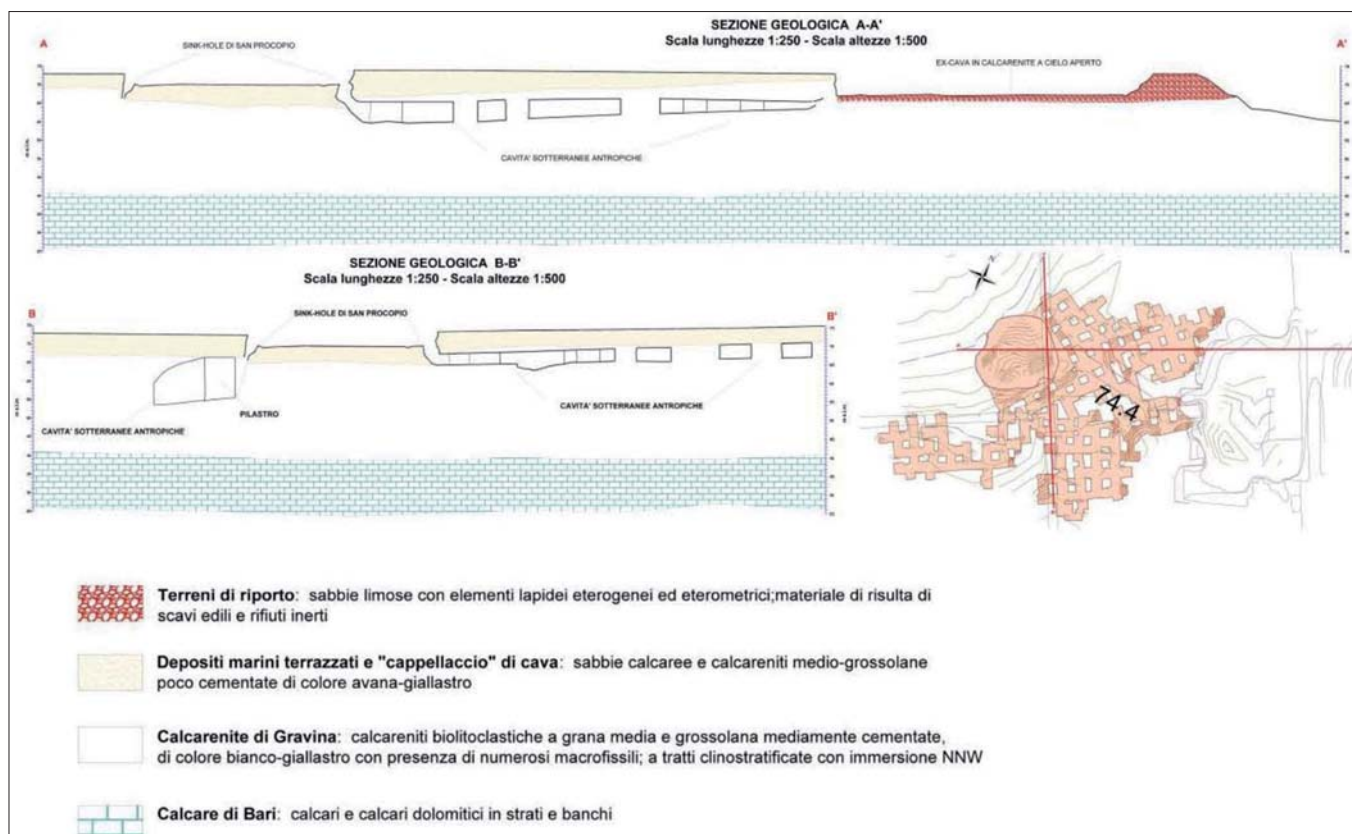


Figura 2 – Sezioni della cava sotterranea ottenute dai rilievi speleologici

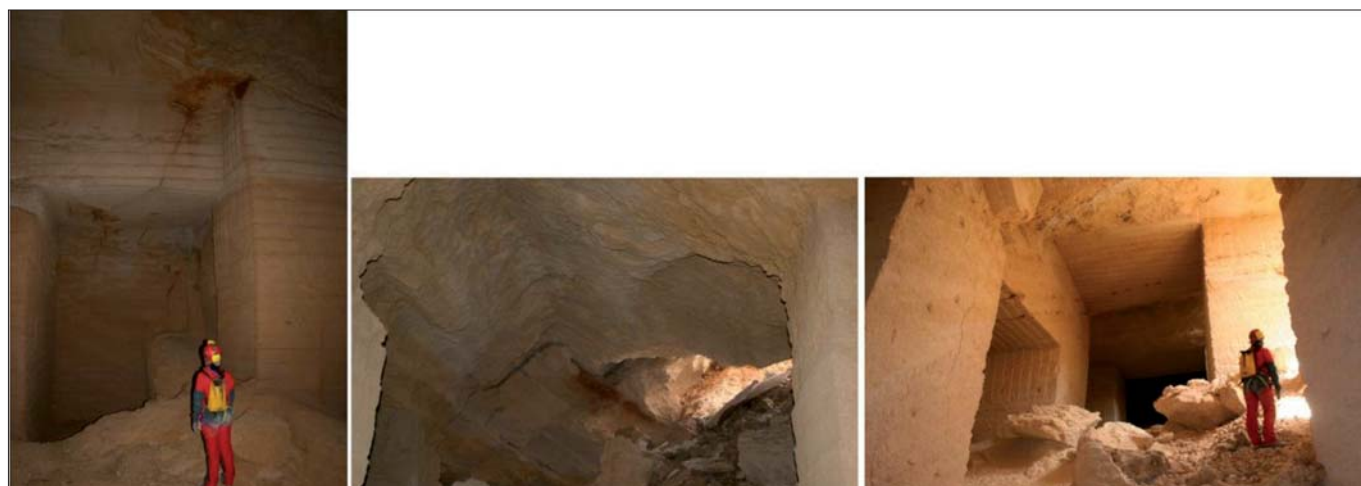


Figura 3 – Esempi di dissesti osservati nella cava sotterranea, con presenza di fratture in volta e sui pilastri, distacchi circolari in volta e crollo totale della cava

notevole accuratezza e precisione dei rilievi un'altrettanto importante rapidità nella restituzione dei dati. Sulla base del rilievo piano-altimetrico così eseguito, sono poi state eseguite analisi dello stato di fratturazione all'interno della rete caveale (estesa per circa 8500 m<sup>2</sup>), cartografando nel dettaglio i distacchi osservati ed esaminando le condizioni di stabilità dei singoli pilastri. I dati così raccolti sono stati utilizzati per redigere una zonazione preliminare della suscettibilità da crolli nell'area in esame. Allo stesso tempo, indagini geofisiche di dettaglio (georadar, sismica a rifrazione in onde P ed S, tomografia elettrica) e rilievi in aree limitrofe venivano svolte per individuare eventuali ulteriori prosecuzioni degli ambienti ipogei o altre cave sotterranee.

Le cause innescanti il dissesto possono essere ricercate nelle vibrazioni da traffico pesante da tempo abituali lungo Via Vecchia Minervino (tir a pieno carico di peso superiore a 40 ton), che hanno provocato il peggioramento dello stato fessurativo già presente su alcuni pilastri, determinando, di fatto, una rottura improvvisa di tipo fragile. È lecito immaginare che la rottura sia avvenuta lungo piani di taglio inclinati di almeno 30°÷35°, secondo quanto constatato nel corso dei rilievi geo-meccanici speditivi. Un ruolo secondario, possono aver avuto le acque meteoriche infiltratesi dalla superficie attraverso vie preferenziali individuate sul fianco della ex-cava di calcarenite a margine della voragine, con un azione di deterioramento alla base dei pilastri.

Al termine dei rilievi, al fine di mitigare la pericolosità geomorfologica, sono state fornite all'Amministrazione Comunale di Barletta una serie di indicazioni, riassumibili nell'interdizione al traffico pesante della viabilità e dell'area presente in un raggio di 350 m attorno al centro della voragine, nella limitazione del transito e stazionamento di mezzi e persone in un raggio di 80 m, soprattutto nel corso di forti precipitazioni o condizioni meteorologiche avverse e nella vigilanza sullo scarico di qualsivoglia rifiuto o materiale di risulta.

Questo poster descrive le principali attività eseguite, che hanno visto la collaborazione fattiva di tecnici, ricercatori e speleologi, costituendo un significativo esempio di cooperazione tra differenti professionalità e competenze.



Sede del Convegno presso la sala "Il Gattopardo"



Tavola rotonda, da sinistra C. Berardi, R. Nardone, G. Calcagni (in piedi), A.R. Di Santo, G. Tedeschi e F. Ventola



Tavola rotonda, da sinistra E. Di Loreto e A. Corazza



*Gruppo SIGEA Sezione Puglia con G. Gisotti*



*Cena sociale con prodotti tipici pugliesi, musica e canti popolari*



*Sala multimediale del Centro visite di Lamalunga*



*Visita guidata al Centro visite a cura del C.A.R.S. di Altamura*



*Escursione con i mezzi del Parco Nazionale dell'Alta Murgia*



*Visita alla paleosuperficie con orme di dinosauri presso Cava Pontrelli*



*Foto di gruppo presso il Pulo di Altamura*