

Estratto da:

OPERA IPOGEA

Journal of Speleology in Artificial Cavities

1-2 / 2020



IX Convegno Nazionale di Speleologia in Cavità Artificiali (Palermo) - 20 Marzo 2020

A cura di C. Galeazzi & P. Madonia



Rivista della Società Speleologica Italiana

Commissione Nazionale Cavità Artificiali



ISSN 1970-9692



IX CONVEGNO NAZIONALE SPELEOLOGIA IN CAVITÀ ARTIFICIALI

(Palermo) - 20 Marzo 2020



ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA
Sezione di Palermo

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO



Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare



Federazione
Speleologica
Regionale Siciliana

HYPOGEEA



IX Convegno Nazionale di Speleologia in Cavità Artificiali

(Palermo) 20 Marzo 2020

SOCIETÀ SPELEOLOGICA ITALIANA (SSI)
COMMISSIONE NAZIONALE CAVITÀ ARTIFICIALI (CNCA)

Comitato organizzatore

Paolo Madonia (Presidente)

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Palermo; CNCA SSI

Carla Galeazzi

Egeria Centro Ricerche Sotterranee, Roma; Hypogea; CNCA SSI

Michele Betti

Commissione Nazionale Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana

Marcello Panzica La Manna

Società Speleologica Italiana

Elena Alma Volpini

Hypogea Ricerca e Valorizzazione Cavità Artificiali

Enti Promotori

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Università degli Studi di Palermo, Dip.di Scienze della Terra e del Mare

Società Italiana di Geologia Ambientale

Hypogea Ricerca e Valorizzazione Cavità Artificiali

Patrocini istituzionali

Federazione Speleologica Regionale Siciliana

Comitato Scientifico

Michele Betti

CNCA SSI

Roberto Bixio

Centro Studi Sotterranei, Genova; CNCA SSI

Vittoria Caloi

Egeria Centro Ricerche Sotterranee, Roma; CNCA SSI

Marianna Cangemi

Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare

Andrea De Pascale

Direttore Editoriale Opera Ipogea; Centro Studi Sotterranei, Genova; CNCA SSI

Sossio Del Prete

CNCA SSI

Carla Galeazzi

Egeria Centro Ricerche Sotterranee, Roma; Hypogea; CNCA SSI

Carlo Germani

Egeria Centro Ricerche Sotterranee, Roma; Hypogea; CNCA SSI

Giuliana Madonia

Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare

Massimo Mancini

Università degli Studi del Molise, Campobasso; CNCA SSI

Mario Parise

Università Aldo Moro, Dipartimento Scienze della Terra e Geoambientali, Bari

Stefano Saj

Direttore Responsabile Opera Ipogea; Centro Studi Sotterranei, Genova; CNCA SSI

Pietro Todaro

Società Italiana di Geologia Ambientale

Marco Vattano

Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare

- pag. 9 **Prefazione**
Carla Galeazzi, Paolo Madonia

OMAGGIO ALLA CITTÀ DI PALERMO E A SANTA ROSALIA SUA PATRONA

- pag. 13 **Le più antiche mappe geografiche del sottosuolo. Le incisioni dei rilievi delle grotte di Santa Rosalia a Palermo e a Santo Stefano Quisquina (Agrigento)**
The oldest underground geographical maps. The engravings of the maps of the caves of Santa Rosalia in Palermo and in Santo Stefano Quisquina (Agrigento province, Sicily, Italy)
Massimo Mancini, Paolo Forti

ANTICHE OPERE IDRAULICHE, SISTEMI DI RACCOLTA DELLE ACQUE METEORICHE

- pag. 29 **Attualità dei sistemi idrici ipogei di raccolta delle acque piovane**
Modernity of rain harvesting underground systems
Paolo Madonia, Marianna Cangemi, Ygor Oliveri
- pag. 35 **La pratica dei sistemi d'acqua sotterranei "ingruttati" nella Piana di Palermo e analisi della terminologia di riferimento**
The practice of the underground water systems *ingruttati* of the Piana di Palermo (Sicily, Italy) and analysis of reference terminology
Pietro Todaro
- pag. 45 **Il qanat di Villa Riso (Palermo, Sicilia)**
The Villa Riso *qanat* (Palermo, Sicily, Italy)
Giuseppe Avellone, Marco Vattano, Giuliana Madonia, Cipriano Di Maggio
- pag. 53 **Indagini preliminari sui sistemi di approvvigionamento idrico nell'area dell'Insula I di Capo Boeo (Marsala, Sicilia occidentale)**
Preliminary investigations on water supply systems in the *Insula I* area of Capo Boeo (Marsala, Western Sicily, Italy)
Laura Schepis, Pietro Valenti, Marco Vattano
- pag. 59 **Paolazzo: un acquedotto a tre strati (Noto - Canicattini Bagni, Siracusa)**
Paolazzo: a three layers aqueduct (Noto - Canicattini Bagni, Siracusa province, Italy)
Paolo Cultrera, Luciano Arena
- pag. 67 **Antiche strutture di trasporto idrico nel sottosuolo etneo (Catania, Sicilia)**
Ancient water pipes in Etna's underground (Catania province, Sicily, Italy)
Gaetano Giudice, Francesco Politano, Alfio Cariola

- pag. 75 **Indagini speleologiche preliminari sui sistemi di approvvigionamento idrico di acque meteoriche nell'area dell'ex ospedale psichiatrico di Agrigento (Sicilia)**
Preliminary speleological investigations on the water supply systems of rainwater in the area of the former psychiatric hospital in Agrigento (Sicily, Italy)
Giuseppe Lombardo, Giovanni Noto, Marco Interlandi, Elisabetta Agnello, Eugenio Vecchio, Giovanni Buscaglia
- pag. 83 **Roma: la valle del Velabro, il Tevere e il canale idraulico dei Tarquini prima della Cloaca Massima**
Rome: the Velabrum valley, the Tiber and the Tarquini's hydraulic canal before the Cloaca Maxima
Elisabetta Bianchi, Piero Bellotti
- pag. 91 **Sedici ponti-acquedotto romani appartenenti ai quattro acquedotti anienesi siti tra Galliciano nel Lazio, San Gregorio da Sassola e San Vittorino di Roma (Roma, Lazio)**
Sixteen Roman aqueduct-bridges belonging to the four Anienesi aqueducts located between Galliciano nel Lazio, San Gregorio da Sassola and San Vittorino di Roma (Roma province, Latium, Italy)
Luigi Casciotti
- pag. 101 **Sistema di drenaggio artificiale dei bacini vulcanici Albano e Turno (Lazio): analisi delle modificazioni nel corso dei secoli**
Artificial drainage system of the volcanic basin of Albano and Turno (Latium, Italy): analysis of the modifications of the hydraulic environment over the centuries
Carlo Germani, Carla Galeazzi, Vittoria Caloi, Sandro Galeazzi
- pag. 109 **Anagni (Frosinone, Lazio): antichi sistemi di captazione delle vene d'acqua sotterranee, loro canalizzazione e immagazzinamento**
Anagni (Frosinone province, Latium, Italy): ancient collection systems of underground water veins, their ducting and storage
Mara Abbate, Carla Galeazzi, Carlo Germani, Andreas Schatzmann, Elena Alma Volpini
- pag. 119 **L'approvvigionamento idrico nelle aree vulcaniche dei Monti Cimini (Viterbo, Lazio) nell'antichità: nuove acquisizioni**
Water supply in volcanic areas of Cimini Mountains (Viterbo province, Latium, Italy) during ancient times: new data
Andrea Sasso, Gabriele Trevi
- pag. 129 **Nuovi ritrovamenti e studio del tracciato dell'Acquedotto Augusteo che costeggia il versante occidentale della collina di Posillipo (Napoli, Campania)**
New discoveries and research of the route of the Augustan aqueduct that follows the western slopes of the Posillipo hill (Naples, Campania, Italy)
Mauro Palumbo, Mario Cristiano, Luigi De Santo, Marco Ruocco
- pag. 137 **Aqua Augusta Campaniae: il doppio speco di via Olivetti (Pozzuoli, Napoli)**
Aqua Augusta Campaniae: the twin channels in Olivetti road (Pozzuoli, Naples province, Italy)
Graziano Ferrari, Raffaella Lamagna, Elena Rognoni
-

- pag. 145 Parco delle terme di Baia (Bacoli, Napoli): le cisterne del settore dell' *Ambulatio***
Baia baths archaeological Park (Bacoli, Naples province, Italy): the water tanks in the *Ambulatio* sector
Graziano Ferrari, Daniele De Simone, Raffaella Lamagna, Elena Rognoni
- pag. 153 Le monumentali neviere del Materano (Basilicata)**
The majestic ice-houses in the Matera area (Basilicata, Italy)
Raffaele Paolicelli, Francesco Foschino, Angelo Fontana
- pag. 159 Il censimento degli antichi acquedotti della provincia di Bologna**
Ancient aqueducts in the Bologna province (Italy): preliminary list
Danilo Demaria
- pag. 169 Il sistema di intercettazione e accumulo delle acque meteoriche nell'abitato rupestre della morgia di Pietravalle a Salcito (Campobasso, Molise)**
The system of interception and accumulation of rainwater in the cave settlement of the morgia of Pietravalle in Salcito (Campobasso province, Molise, Italy)
Carlo Ebanista, Andrea Capozzi, Andrea Rivellino, Fernando Nobile, Massimo Mancini
- pag. 179 Opere idrauliche a scopo di bonifica nel territorio Salentino (Puglia)**
Hydraulic works for land reclamation in Salento (southern Apulia, Italy)
Marcello Lentini, Mario Parise, Francesco De Salve
- pag. 187 Acquedotti romani in Sardegna, sintesi delle conoscenze e prospettive esplorative**
Roman aqueducts in Sardinia (Italy), synthesis of knowledge and exploration perspectives
Pier Paolo Dore, Marco Mattana
- pag. 197 L'antico acquedotto della seicentesca Fonte Cesia in Todi**
The ancient aqueduct of the 1600's Fonte Cesia in Todi (Perugia province, Italy)
Maurizio Todini

MONITORAGGIO E PREVENZIONE, CENSIMENTI E CATALOGAZIONE

- pag. 207 Strumentazione geofisica in cavità artificiali per il monitoraggio sismico e per lo studio di precursori sismici**
Geophysics instrumentation in artificial cavities for seismic monitoring and for the study of seismic precursors
Paolo Casale, Adriano Nardi, Alessandro Pignatelli, Elena Spagnuolo, Gaetano De Luca, Giuseppe Di Carlo, Marco Tallini, Sandro Rao
- pag. 215 Individuazione di cavità attraverso tomografie elettriche e sismiche**
Cavity detection using seismic refraction and electrical resistivity tomographies
Alessandra Carollo, Patrizia Capizzi, Raffaele Martorana, Marco Vattano
- pag. 221 Applicazione di una procedura per la valutazione della suscettibilità a crolli di cavità artificiali**
Implementing a procedure for the assessment of the susceptibility to collapse in artificial cavities
Antonio Gioia, Mario Parise

- pag. 229 Modello geologico tridimensionale del sottosuolo e dello sviluppo delle cavità in un'area fortemente urbanizzata della Campania settentrionale**
3D geological underground model and artificial caves development in a northern Campania highly urbanized area (Italy)
Daniela Ruberti, Paolo Maria Guarino, Salvatore Losco, Marco Vigliotti
- pag. 237 Le cavità nel sottosuolo del territorio di Sant'Arpino (Caserta, Campania): catalogazione in ambiente GIS**
The underground cavities in the territory of Sant'Arpino (Caserta province, Campania, Italy): a GIS-based register
Marco Vigliotti, Luca Dell'Aversana, Daniela Ruberti
- pag. 245 Cavità artificiali nel centro storico di Ginosa (Taranto, Puglia) e relative problematiche di dissesto geo-idrologico**
Artificial cavities in the historical center of Ginosa (Taranto province, Apulia, Italy) and related geo-hazard issues
Mario Parise
- pag. 253 Cavità artificiali nel Parco di Portofino (Genova, Liguria): censimento e classificazione**
Artificial cavities in Portofino Park (Metropolitan City of Genoa, Liguria, Italy): inventory and classification
Francesco Faccini, Lara Fiorentini, Martino Terrone, Luigi Perasso, Stefano Saj
- pag. 263 Le cavità antropiche di Gravina in Puglia (Bari, Puglia): aspetti storici e geotecnici**
Historical and geotechnical aspects of the artificial caves in the urban settlement of Gravina in Puglia (Bari province, Apulia, Italy)
Alessandro Parisi, M. Dolores Fidelibus, Valeria Monno, Michele Parisi, Natale Parisi, Vito Specchio, Giuseppe Spilotro

OPERE INSEDIATIVE CIVILI, ESTRATTIVE, BELLICHE E DI TRANSITO

- pag. 275 Il complesso rupestre della Théotokos Kilise (Göreme, Cappadocia, Turchia)**
The Théotokos Kilise rupestrian complex (Göreme province, Cappadocia, Turkey)
Carmela Crescenzi
- pag. 285 Riscoperta di alcuni ipogei artificiali nel Comune di Sutera (Caltanissetta, Sicilia centrale)**
Re-discovery of some man-made cavities in the Sutera Municipality (Caltanissetta province, central Sicily, Italy)
Marco Vattano, Nino Pardi, Antonio Domante, Pietro Valenti, Giuliana Madonna
- pag. 293 Sistemi ipogei di Massa Martana (Perugia) in Umbria. Indagini preliminari**
Hypogeal systems at Massa Martana in Umbria (Perugia province, Italy). Preliminary investigations
Giulio Foschi, Gianluigi Guerriero Monaldi, Virgilio Pendola

- pag. 303 Insedimenti rupestri dell'Alto Crotonese (Calabria)**
Cave settlements in the "Alto Crotonese" (Crotona province, Calabria, Italy)
Felice Larocca, Francesco Breglia, Katia Rizzo
- pag. 311 Molarice, la miniera dimenticata (Schilpario, Bergamo)**
Molarice, the forgotten mine (Schilpario, Bergamo province, Italy)
Giovanni Belvederi, Maria Luisa Garberi, Guglielmo Sarigu
- pag. 321 Le latomie ipogee del Plemmirio (Siracusa, Sicilia sud-orientale)**
The hypogean Quarries of *Plemmirio*, (Siracusa, South-eastern Sicily, Italy)
Luciano Arena, Corrado Marziano
- pag. 329 Le cave di "ghiara" nella provincia di Catania: aggiornamenti su recenti rinvenimenti (Catania e Pedara, Sicilia)**
"Ghiara" quarries in Catania province: news on recent discoveries (Sicily, Italy)
Gaetano Giudice, Francesco Politano, Alfio Cariola
- pag. 337 Le gallerie della ferrovia dimenticata che collegava Sasso Marconi a Lagaro (Bologna) e il più importante sito strategico italiano della Seconda Guerra Mondiale**
The tunnels of the forgotten railway Sasso Marconi-Lagaro (Bologna province, Italy) and the most important Italian strategic site in the Second World War
Danilo Demaria
- pag. 347 The underground shelters of Kanlısivri Mevkii in Göreme (Cappadocia, Turkey)**
I rifugi sotterranei di Kanlısivri Mevkii in Göreme (Cappadocia, Turchia)
Pierre Lucas, Roberto Bixio
- pag. 357 Ritrovamento di un ricovero antiaereo dell'isola di Malta. Quadro comparativo con i ricoveri antiaerei di Napoli (Campania)**
New discovery and research of an air-raid shelter in Malta island. Comparison with the air-raid shelters of Naples (Campania, Italy)
Mauro Palumbo, Mario Cristiano, Serena Russo, Marco Ruocco
- pag. 365 I rifugi antiaerei di Porto Torres (Sassari, Sardegna)**
The Porto Torres air-raid shelters (Sassari province, Sardinia, Italy)
Pier Paolo Dore, Eleonora Dallochio
- pag. 373 Indice per autori**
-

OPERA IPOGEA

*Memorie della Commissione Nazionale Cavità Artificiali
www.operaiipogea.it*

Semestrale della Società Speleologica Italiana

Anno 22 - Numero 1/2 - Gennaio/Dicembre 2020

Autorizzazione del Tribunale di Bologna n. 7702 dell'11 ottobre 2006

Proprietario:

Società Speleologica Italiana

Direttore Responsabile:

Stefano Saj

Direttore Editoriale:

Andrea De Pascale

Comitato di Redazione:

*Michele Betti, Vittoria Caloi, Sossio Del Prete,
Carla Galeazzi, Carlo Germani, Mario Parise*

Sede della Redazione:

*c/o Andrea De Pascale - Corso Magenta, 29/2 - 16125 Genova
andreadepascale@libero.it*

Comitato Scientifico:

*Roberto Bixio, Elena Calandra, Franco Dell'Aquila, Carlo Ebanista,
Angelo Ferrari, Nakiş Karamağarali (TR), Aldo Messina, Roberto Nini, Mario Parise,
Mark Pearce (UK), Fabio Redi, Stefano Saj, Jérôme Triôlet (FR), Laurent Triôlet (FR)*

Recensioni:

*Roberto Bixio - Via Avio, 6/7 - 16151 Genova
roberto_bixio@yahoo.it*

Composizione e impaginazione:

Fausto Bianchi, Enrico Maria Sacchi

Foto di copertina:

Immagini tratte dagli articoli del presente numero doppio della rivista

Foto quarta di copertina:

Immagini tratte dagli articoli del presente numero doppio della rivista

La rivista viene inviata in omaggio ai soci sostenitori e ai gruppi associati alla SSI

Prezzo di copertina:

Euro 40,00

Tipografia:

A.G.E. s.r.l.

Via della Stazione, 41

61029 Urbino (PU)

Tel. 0722 328756

**Il contenuto e la forma degli articoli pubblicati impegnano esclusivamente gli autori.
Nessuna parte della presente pubblicazione può essere riprodotta in alcun modo
senza il consenso scritto degli autori.**

Strumentazione geofisica in cavità artificiali per il monitoraggio sismico e per lo studio di precursori sismici

Geophysics instrumentation in artificial cavities for seismic monitoring and for the study of seismic precursors

Paolo Casale¹, Adriano Nardi¹, Alessandro Pignatelli¹, Elena Spagnuolo¹, Gaetano De Luca¹, Giuseppe Di Carlo², Marco Tallini³, Sandro Rao¹

Riassunto

Con un accordo tra INGV e SSI (progetto IPODATA) è stata installata strumentazione sismica in cavità artificiali, fin dal 2007. In seguito, in alcuni siti ipogei, si è installata nuova strumentazione geofisica come segue: nel bunker all'interno del Monte Soratte, presso S. Oreste (RM), è ora attivo un impianto di monitoraggio delle onde elettromagnetiche a bassissima frequenza (banda VLF) ed, associato, un misuratore di radon, il tutto per lo studio di potenziali precursori sismici; grazie ad una collaborazione tra INGV, UnivAQ e INFN, in un sondaggio orizzontale degli anni '80, vicino ai laboratori del Gran Sasso (LNGS), sono dal 2015 in registrazione continua (20 sps) sensori di pressione e di conducibilità dell'acqua sotterranea. Durante la sequenza sismica di Amatrice (Mw=6.0, 24/08/2016), i dati di pressione hanno mostrato chiare anomalie circa 5 giorni prima del terremoto; infine alcuni cambiamenti hanno riguardato altri siti IPODATA (PTRJ, CESX ecc.).

Parole chiave: cavità artificiali, stazione sismica, precursori sismici, VLF, radon, ipogei, rumore sismico.

Abstract

Following the agreement between INGV and SSI (IPODATA project), seismic equipment was installed in artificial cavities, starting from 2007. Later, in some sites, new geophysical instrumentation was installed in addition, as follows: in the bunker inside Monte Soratte, near S. Oreste (RM), a monitoring system for very low frequency electromagnetic waves (VLF) has been recently installed together with a radon meter, both for the study of potential seismic precursors; since 2015, according to a collaboration between INGV, UnivAQ and INFN, in a horizontal borehole drilled (in the '80s) next to the deep underground laboratories of Gran Sasso (LNGS), pressure and conductivity of groundwater have been recorded by sensors in continuous high sampling (20 sps); during the Amatrice seismic sequence (08/24/2016, Mw=6.0) the pressure data showed clear anomalies about 5 days before the earthquake; finally, upgrades were carried out in other IPODATA sites (PTRJ, CESX etc.).

Keywords: artificial cavities, seismic station, seismic precursor, VLF, radon, hypogea, seismic noise.

Introduzione

La geofisica usa sofisticate tecniche di misura dei fenomeni fisici della Terra, sia ai fini della ricerca di base sia per il monitoraggio e la prevenzione. La complessità dei fenomeni naturali porta spesso ad un

approccio multidisciplinare: da un lato si mettono in relazione vari parametri e grandezze fisiche, dall'altro si installano *stazioni multiparametriche*. La registrazione di tali grandezze costituisce una base di dati fondamentale per ricerca e servizi nel settore. Per misurare alcune grandezze fisiche (ad esempio il moto

¹ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

² Istituto Nazionale di Fisica Nucleare – Laboratori Nazionali del Gran Sasso

³ Università degli Studi dell'Aquila – Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile-Architettura e Ambientale

Autore di riferimento: Paolo Casale - paolo.casale@ingv.it

del suolo in sismologia), installare la strumentazione negli ipogei può attenuare il *rumore* migliorando il segnale registrato.

Per altre grandezze fisiche un ipogeo è fondamentale perché è impensabile misurare quella grandezza in un ambiente diverso; ad esempio la pressione delle acque sotterranee per sua definizione non può essere misurata altrove. Di seguito si illustrano le installazioni in ipogei con alcuni risultati.

Aggiornamento stazioni in ipogei

La sismologia a Larga Banda (VBB), necessita di siti ove le registrazioni riportino fedelmente il moto del suolo causato da onde sismiche e non rumore dovuto a fattori come variazioni di pressione, di temperatura, tilt del terreno, ecc. (Casale *et al.*, 2014). Tali fenomeni di “disturbo” sono minori negli ipogei (Sorrels, 1971) che attenuano il *rumore sismico* in generale. La Rete Sismica Nazionale o RSN, grazie ad una collaborazione tra SSI ed INGV (progetto IPODATA), ha alcune stazioni in ipogei, artificiali e non. Si rimanda all’articolo specifico (Casale *et al.*, 2014) per una descrizione dettagliata degli ipogei, delle installazioni, del rumore sismico e dei risultati ottenuti. Si riporta invece ora un breve aggiornamento per due stazioni (CESX e PTRJ) ed una descrizione degli sviluppi della stazione SRES. Infine si discutono alcune promettenti misure effettuate nelle gallerie del Gran Sasso.

La stazione di Cesi (TR), sigla CESX, è situata all’interno della Grotta Eolica (U 62), a cui si accede da un palazzo storico tramite un tunnel sotterraneo artificiale lungo oltre 30 m. Per sua natura la grotta è sede, oltre che di stillicidio, di vapori e correnti galvaniche che possono danneggiare la strumentazione, quindi nel 2013 si è sostituita l’insufficiente schermatura del sismometro con una di tipo standard (vedi ad es. fig. 1b) per sensori VBB. Essa ha prodotto tra l’altro un miglioramento del segnale registrato.

La stazione PTRJ (Pietraraja, BN) è situata presso un’ex miniera di bauxite su calcari di piattaforma dell’Unità Matese-Monte Maggiore. Nel 2014, in seguito ad una frana interna, la stazione sismica è stata posta all’esterno della grotta, con conseguente degrado del segnale (fig. 2) a riprova dell’utilità degli ipogei.

Il Bunker del Monte Soratte, presso S. Oreste (RM)

Il Monte Soratte (691m) fa parte della dorsale carbonatica Tiberina. Litologicamente è costituito da un corpo centrale di *Calcare Massiccio* (Giurassico), affiancato da affioramenti di calcare *Corniola* (Giurassico) e calcare marnoso *Scaglia* (Eocene/Cretacico).

Per questa sua natura calcarea prevalentemente cristallina associata ad intensa fratturazione tettonica, il rilievo è fortemente carsificato con grotte e pozzi. In passato le cavità del M. Soratte, anche integrate da

gallerie fatte dall’uomo, sono servite per scopi militari (Casale *et al.*, 2014) mentre ora la parte delle gallerie è adibita a museo storico (<http://www.bunkersoratte.it>).

Stazione sismica

Tramite accordo tra INGV e Comune di S. Oreste e dopo un primo test (Casale *et al.*, 2014), è stata installata una stazione sismica (punto A in fig. 3 di coordinate: lat. 42.23696°N; long. 12,50993°E; quota 410 m) nel ramo cieco (fig. 1c) che taglia una galleria E-W e finisce dietro gli uffici della zona museale.

Durante i lavori di allestimento della stazione, nel 2014, si è provveduto alla stabilità termica e ad evitare lo stillicidio sul sismometro o sul plinto dove alloggia. A tale scopo il ramo di galleria (fig. 1c) è stato chiuso da entrambi i lati ed è stato costruito un cassetto (fig. 1c) per accogliere il sismometro con il suo schermo (foto a e b in fig. 1) termico, elettromagnetico e barico. La stazione, in fig. 1, è composta da un sismometro VBB Trillium 120 e da un acquisitore GAIA, di costruzione INGV.

Un recente impianto idrico ACEA, poco ad est delle gallerie, genera vibrazioni, intorno a 2 Hz (fig. 2b) cioè nella gamma di frequenze registrate in occasione di terremoti locali e Mediterranei. Questo disturbo, mascherando il segnale, crea difficoltà nella detezione di un terremoto e nell’analisi del sismogramma. Inoltre vicino alla stazione è previsto il passaggio di un treno per visite guidate. Si stanno quindi riconsiderando siti scartati nel 2014 (punti B e C in fig. 3) per spostare la stazione nella zona ovest, lontana dalle sorgenti di rumore.

Monitoraggio di precursori sismici

Dal 20/06/2019, presso la stazione sismica SRES (punto A in fig. 3), sono stati installati due dispositivi per lo studio dei precursori sismici: una stazione di monitoraggio elettromagnetico in banda VLF (rete Cassandra) e una centralina di monitoraggio del gas radon (rete IRON), dell’INGV.

Un precursore sismico è un fenomeno che può manifestarsi poco tempo prima di un terremoto e a breve distanza dall’epicentro perché geneticamente legato al processo tettonico di “preparazione” del sisma. Purtroppo la previsione del terremoto per finalità operative, che richiede la definizione accurata di tempo e luogo, non è ancora possibile. Esistono diversi tipi di precursori ma sono fenomeni che possono esistere in natura anche indipendentemente dal terremoto e/o fenomeni che non accadono necessariamente ogni qualvolta ci sarà il terremoto. Un esempio vicino alla speleologia è la variazione del livello dell’acqua nei pozzi. Può abbassarsi (o innalzarsi) gradualmente ma sensibilmente nei giorni che precedono il sisma per ritornare rapidamente al livello normale poco prima del terremoto. Tuttavia una variazione può verificarsi anche perché aumenta l’emungimento dalla falda o



Fig. 1 – Stazione sismica nel Monte Soratte (RM): a) sismometro VBB b) plinto e schermatura c) galleria e casottino per strumentazione (foto P. Casale).

Fig. 1 – Seismic station at Mt. Soratte: a) VBB seismometer b) plinth and shielding c) gallery and housing for instrumentation (photo P. Casale).

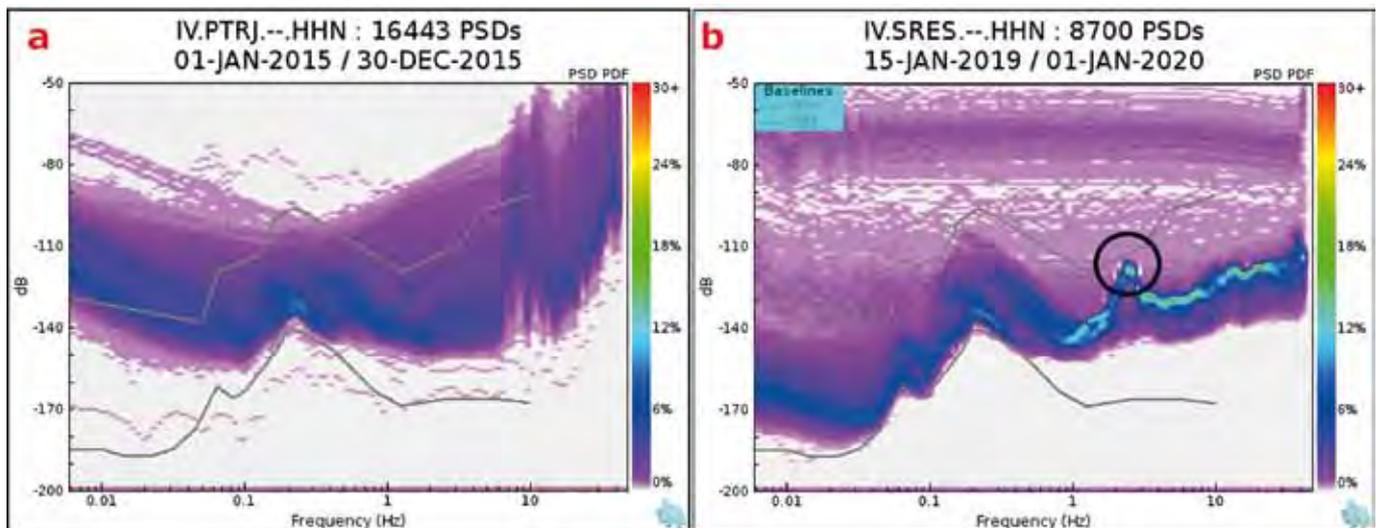


Fig. 2 – Livelli di rumore in decibel alle stazioni PTRJ (a) e SRES (b) al variare della frequenza dell'onda. In blu o celeste i valori più frequenti. In nero le linee di riferimento del Minimo (LNM) e Alto (HNM) rumore. Alla stazione PTRJ il rumore supera la curva di Alto Rumore (HNM) per frequenze inferiori a 0.03 Hz (parte sinistra del primo diagramma) ed inoltre aumenta bruscamente oltre i 7 Hz. A SRES il livello è ottimo a bassa frequenza (parte sinistra del secondo diagramma) ma si nota un picco (cerchiato in nero) intorno a 2-3 Hz (INGV plot).

Fig. 2 – Seismic noise in dB at PTRJ (a) and SRES (b) stations, in function of wave frequency. The most frequent values are in blue or light blue. Reference line of LowNoiseModel and HighNoiseModel are in black.

At PTRJ, noise is higher than HNM for low frequencies (below 0.03hz). At SRES noise is low at low frequencies but high (black circle) about 2-3 Hz (INGV plot).

perché fattori meteorologici (pioggia o assenza di pioggia) variano il livello locale da grande distanza a causa dell'imperscrutabile circolazione sotterranea.

Dunque per ora i precursori non sono un campanello di allarme ma un mezzo per sondare le condizioni crostali di "preparazione" del sisma. L'efficacia dei precursori è nello studio sistematico, continuo e comparato di più fenomenologie diverse. Questo punto di vista si accorda con l'approccio "multiparametrico" con cui l'INGV sta affrontando l'ammodernamento della RSN. Tra le diverse sostanze volatili (es. CO_2) che si posso-

no liberare in superficie prima del terremoto, il radon risulta particolarmente utile grazie alla sua natura radioattiva che lo rende tracciabile anche se presente in minime quantità. Il radon (Rn) è un elemento pesante che per raggiungere la superficie ha bisogno: a) di essere veicolato da un "carrier", ovvero dal flusso di un liquido o di un gas, b) della permeabilità necessaria che la roccia calcarea offre (per fratturazione e carsismo) affinché questa circolazione sia efficiente e c) in ogni caso di gradienti di pressione verso la superficie, gradienti che esistono anche solo a causa dell'eteroge-

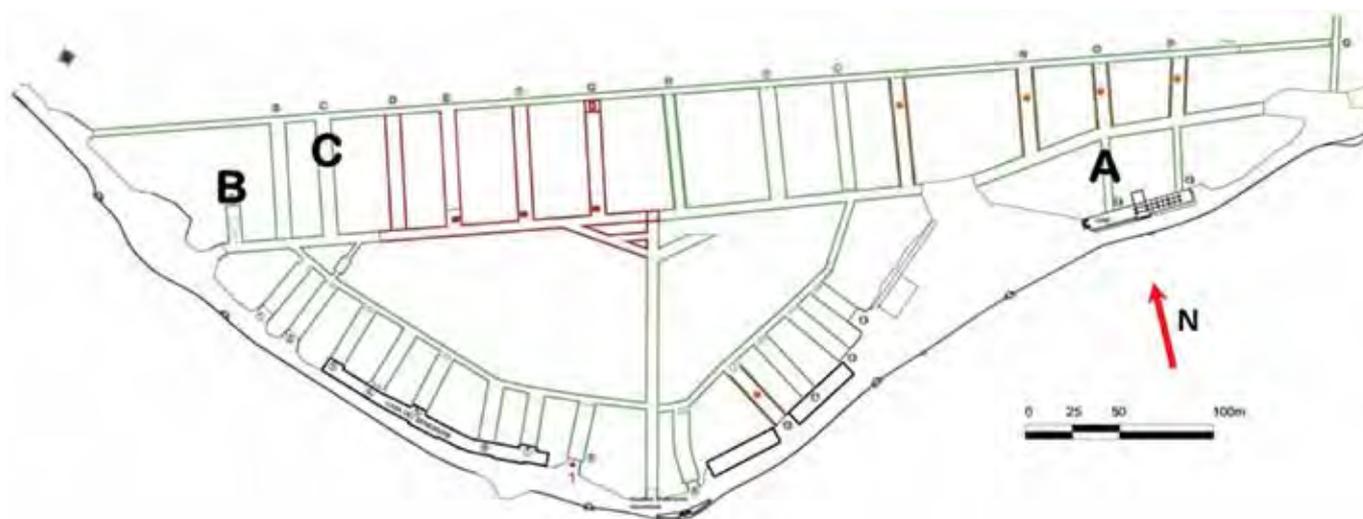


Fig. 3 – Mappa gallerie del Monte Soratte (RM). A, B e C sono i siti analizzati per installare la stazione sismica (grafica di G. Paolucci).

Fig. 3 – Map of galleries of Mt. Soratte. Sites investigated for installing seismic stations are shown in A, B, C (G. Paolucci).

nea densità delle rocce. Le variazioni di concentrazione del radon associate al terremoto sono probabilmente da attribuire alla microfratturazione che precede la rottura della crosta. Questo fenomeno aumenta la superficie di roccia esposta al fluido e favorisce la sua circolazione.

Nel bunker del Monte Soratte è stata installata una stazione “a cella di Lucas” della rete nazionale IRON per il monitoraggio del gas radon (Cannelli *et al.*, 2018) che è la prima ad essere completamente integrata alla Rete Sismica Nazionale. La concentrazione del gas radon si misura in Bq/m³ (Becquerel al metro cubo). La misura è continua e viene mediata su periodi di 4 ore. I dati raccolti presentano naturali cicli diurni e stagionali disturbati da transienti di origine prevalentemente meteorologica. In questo scenario i dati devono essere trattati per risaltare eventuali anomalie, specie in associazione con gli eventi sismici. A questo scopo si sta sperimentando un particolare algoritmo che ha già evidenziato risultati rilevanti (Piersanti *et al.*, 2016).

Il radon è uno dei precursori più classici e documentati, anche se finora non era stato ancora studiato in modo continuo e sistematico su larga scala, come tenta di fare la rete IRON. Il monitoraggio di segnali radio a bassa frequenza riguarda invece un precursore di nuova generazione.

Esperimenti condotti su rocce compresse fino alla rottura hanno evidenziato (Nardi & Caputo, 2009) l'emissione di segnali elettromagnetici sincroni all'emissione acustica prodotta dalla microfratturazione della roccia. L'emissione acustica (onde meccaniche a frequenze udibili, più elevate delle frequenze sismiche) nell'ingegneria mineraria rende realmente possibile prevedere l'imminenza del crollo di una galleria. In quel caso è possibile applicare i sensori (geofoni) direttamente sull'area interessata. Diversamente, la profonda sorgente sismica non è nota a priori e co-

munque non direttamente accessibile. Inoltre la crosta terrestre attenua le onde meccaniche ad alta frequenza (acustiche e ultrasoniche) vanificandone l'utilizzo nelle registrazioni in superficie. Non allo stesso modo attenua le onde elettromagnetiche (specie le VLF) che potrebbero quindi rivelare una microfratturazione in atto nella crosta. Nel bunker del Monte Soratte è stata installata una stazione di monitoraggio in banda VLF (rete sperimentale Cassandra) dove un'antenna attiva sonda la componente elettrica nello spettro 20 Hz – 20 kHz. Su questa banda il segnale può essere elaborato come un suono e può essere rappresentato in un grafico (spetrogramma) che mostra, al passare del tempo, come il segnale si distribuisce alle varie frequenze. In questo modo si osservano impronte caratteristiche di fenomeni diversi che si manifestano anche contemporaneamente (fig. 4). Inoltre una rete neurale sperimentale, istruita sulla base delle emissioni ottenute in laboratorio, può riconoscere segnali di potenziale interesse. In questo stadio sperimentale, l'intelligenza artificiale aiuta l'individuazione di eventi sospetti che l'operatore dovrà analizzare per verificarne la natura.

In entrambi i casi (VLF e radon) il lavoro è finalizzato alla conoscenza del fenomeno e quindi si svolge a posteriori, non in tempo reale, anche perché formulare previsioni, per il momento, non prospetta risultati certi né un'eventualità gestibile.

Gallerie del Gran Sasso

Monitoraggio di pressione idraulica, conducibilità elettrica e temperatura delle acque sotterranee come possibili precursori sismici

Durante i lavori di scavo sia delle gallerie del Gran Sasso (fig. 5) sia dei successivi Laboratori Nazionali

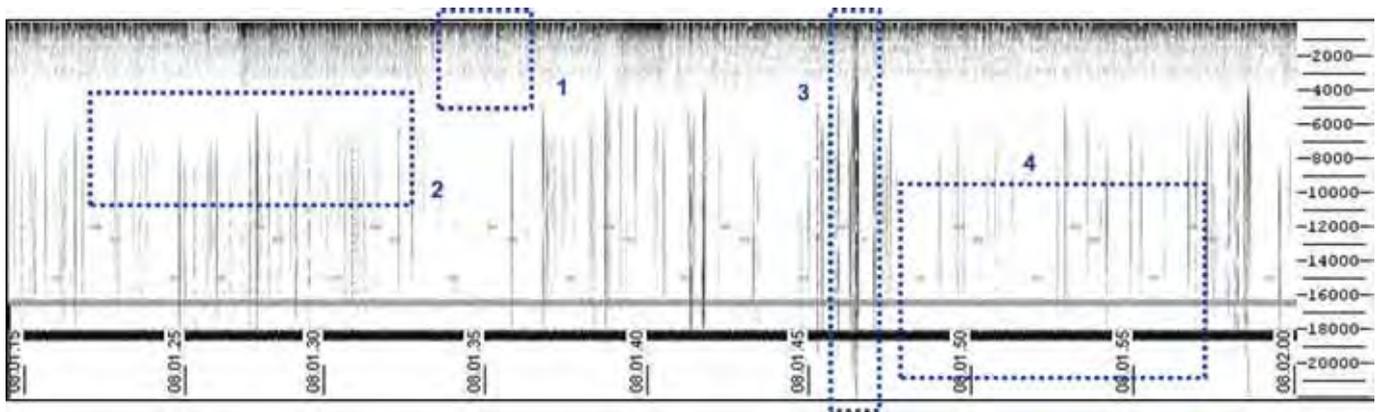


Fig. 4 – Spettrogramma del rumore di fondo naturale caratteristico della banda VLF alle nostre latitudini. Finestra temporale di 40 secondi (asse orizzontale). I valori di frequenza in scala verticale sono compresi tra 0 (in alto) e 22 kHz (in basso). Si individuano tipiche sorgenti, alcune delle quali sono evidenziate da rettangoli numerati: (1) il rumore antropico urbano generato per lo più dalla corrente di rete a 220V (spettro delle armoniche dei 50 Hz); (2) “spherics” ovvero l’attività elettrica naturale dell’atmosfera (linee verticali tratteggiate o continue); (3) un fulmine caduto relativamente vicino; (4) trasmissioni radio VLF sia continue (linee orizzontali continue) che intermittenti (brevi linee o punti) (INGV plot).

Fig. 4 – Spectrogram of the characteristic natural background noise of the VLF band at our latitudes. Time window of 40 seconds (horizontal axis). The frequency values are on a vertical scale and are between 0 (above) and 22 kHz (below). Different typical sources can be identified, some of which are highlighted by numbered rectangles: (1) the anthropic urban noise generated mostly by the 220V mains current (harmonic spectrum of 50 Hz); (2) “spherics” or the natural electrical activity of the atmosphere (vertical dotted or continuous lines); (3) lightning fell relatively close; (4) continuous VLF radio transmissions (continuous horizontal lines) and intermittent transmissions (short lines or dots) (INGV plot).

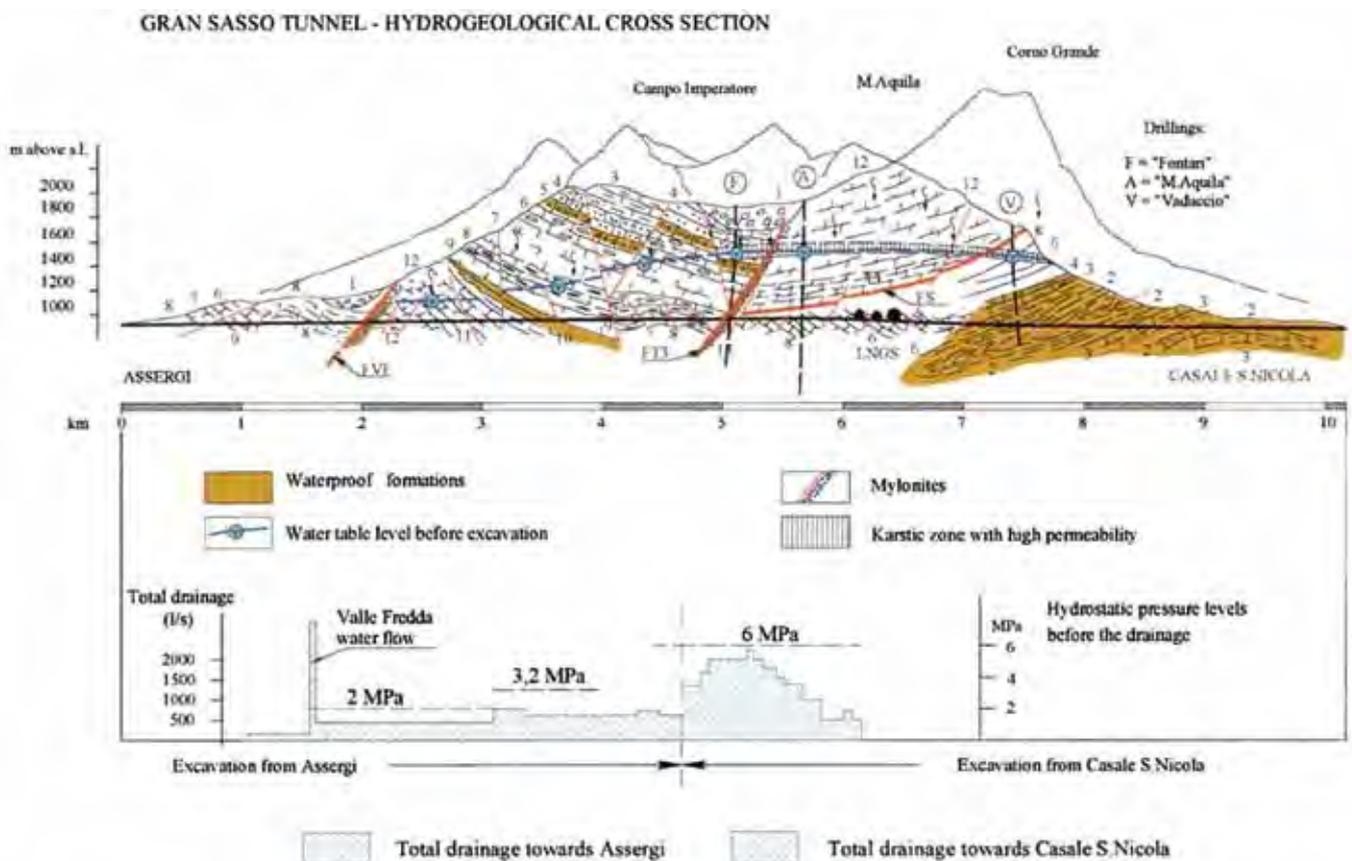


Fig. 5 – Sezione idrogeologica del tunnel autostradale del Gran Sasso (Catalano et al., 1986) Copyright 1986 SGI.
 Fig. 5 – Gran Sasso highway tunnel – Hydrogeological cross section (Catalano et al., 1986) Copyright 1986 SGI.

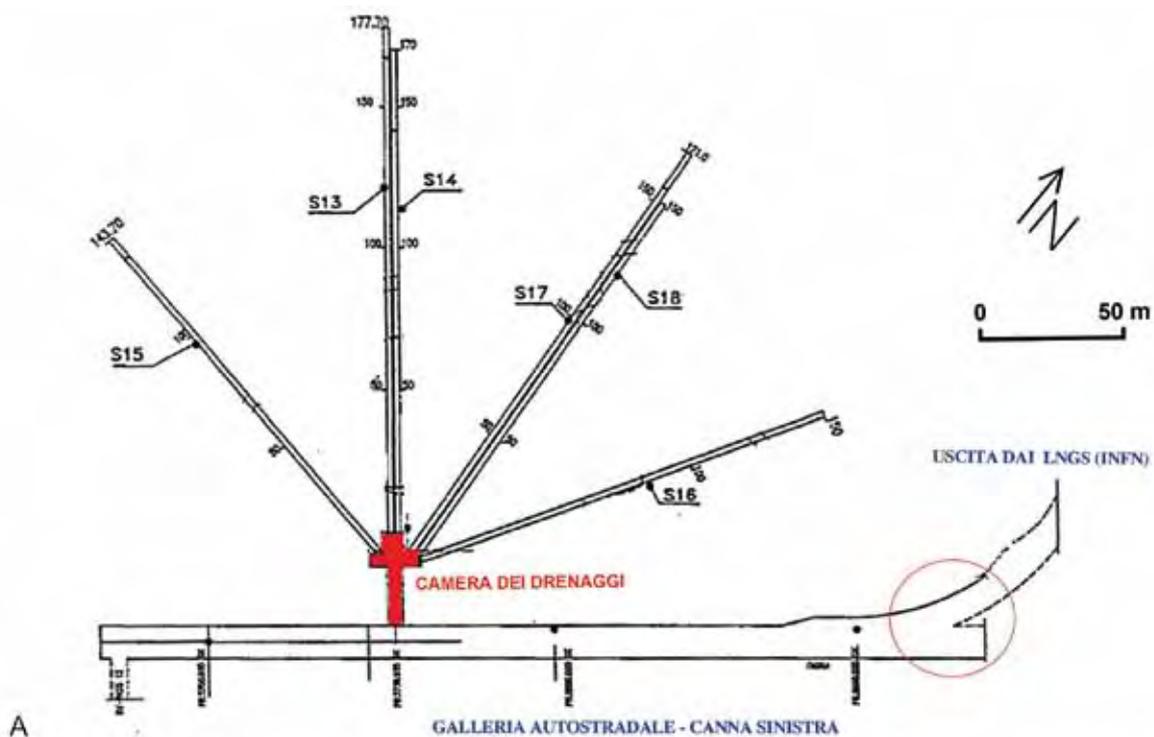


Fig. 6 – A: Indagini geognostiche (Catalano e Salsa, 2003) dei sei sondaggi presenti nella “camera dei drenaggi” (in rosso) localizzata vicino l’uscita dai LNGS; B: nella foto sono visibili le “teste” dei sondaggi orizzontali S13 ed S14 (foto G. De Luca).

Fig. 6 – A: Geognostic surveys (Catalano and Salsa, 2003) of the six boreholes present in the “drainage chamber” (in red) located near the exit from the LNGS; B: in the photo the “heads” of the horizontal boreholes S13 and S14 are visible (photo G. De Luca).

del Gran Sasso dell'INFN (periodo 1965-1985) sono rimasti accessibili alcuni sondaggi (fig. 6) che venivano realizzati per poter proseguire nelle opere di scavo (Catalano e Salsa, 2003).

Agli inizi del 2015, una ricerca nell'ambito dello studio delle interazioni tra acquifero del Gran Sasso e microsismicità locale, condotta dall'INGV in collaborazione con i LNGS dell'INFN e con il DICEAA dell'Università degli Studi dell'Aquila, ha iniziato a misurare in continuo e soprattutto ad elevato campionamento (20 sps) la temperatura, la conducibilità elettrica e la pressione idraulica utilizzando il sondaggio orizzontale S13 (fig. 6).

In concomitanza con l'evento sismico che ha colpito Amatrice nell'agosto del 2016 sono state rilevate va-

riazioni di alcuni parametri fisici delle acque sotterranee del massiccio del Gran Sasso; in particolare (fig. 7) la pressione idraulica ha mostrato evidenti anomalie a partire dal 19 agosto, cioè circa cinque giorni prima del terremoto di Amatrice (De Luca *et al.*, 2018).

Le anomalie rilevate (fig. 7) potrebbero essere classificate sia come precursori sismici a breve termine, rilevati cinque giorni prima del terremoto di Amatrice, sia come precursori sismici a lungo termine, rilevati circa 40-60 giorni prima dell'evento; infatti dalla fig. 7 si nota l'inizio di un debole cambiamento nel comportamento statistico della pressione idraulica fino a 40 giorni prima del terremoto di Amatrice (De Luca *et al.*, 2018, anche con maggiori dettagli e referenze).

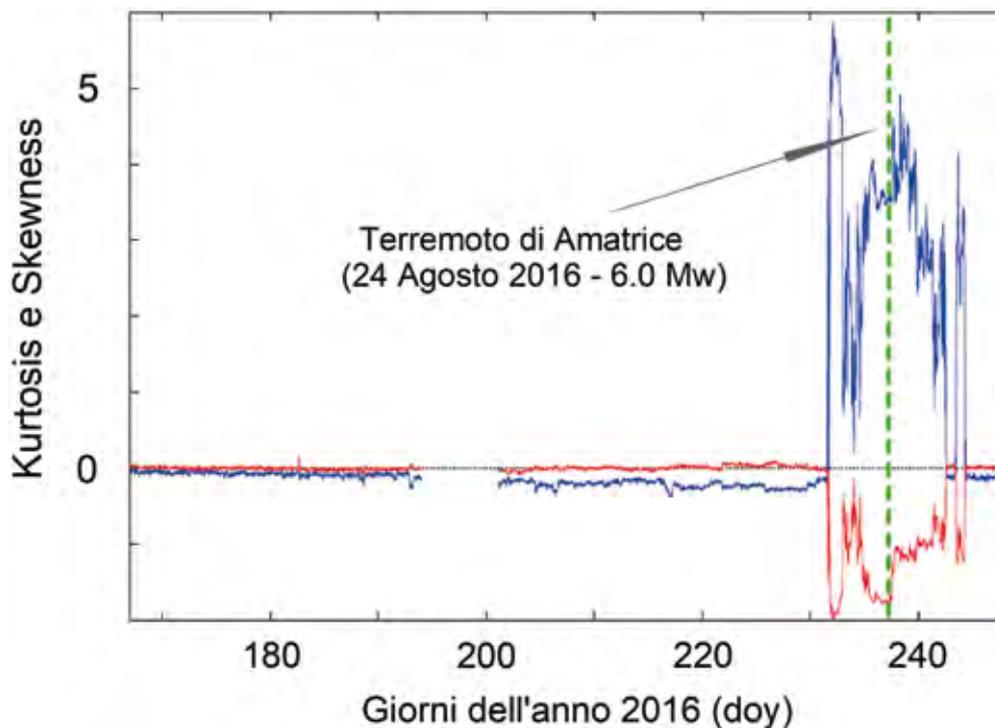


Fig. 7 – Analisi statistica: kurtosis (linea blu) e skewness (linea rossa) dal 15 Giugno (doy 167) al 4 Settembre 2016 (doy 248) calcolate dai dati di pressione idraulica del sondaggio orizzontale S13. I dati mancanti dal 12 al 19 Luglio 2016 (doy 194-201) sono legati ad una manutenzione straordinaria della strumentazione. Il terremoto di Amatrice (6.0 Mw) avviene il 24 agosto 2016 (doy 237, linea verde tratteggiata) alle 01:36:32 UT (figura modificata dalla Fig. 13 di De Luca *et al.*, 2018).

Fig. 7 – Statistical analysis: kurtosis (blue line) and skewness (red line) values from 15 June (doy 167) to 4 September 2016 (doy 248) from hydraulic pressure data of S13 horizontal borehole. Data missing (12–19 July 2016, doy 194–201) is due to instrumentation maintenance. The Amatrice earthquake (Mw 6.0) occurs on 24 August 2016 (doy 237, dashed green line) at 01:36:32 UT (from Fig. 13 modified from De Luca *et al.*, 2018).

Conclusioni

Gli ipogei si rivelano siti importanti per la collocazione di strumentazione geofisica. Le stazioni sismiche in ipogeo mostrano un segnale migliore e quando la stazione viene spostata all'esterno dell'ipogeo si assiste ad un degrado del segnale.

La particolarità degli ipogei consente di misurare altre grandezze usate in geofisica che talvolta possono essere correlate con il verificarsi di terremoti (precursori). Il monitoraggio del gas radon richiede luoghi chiusi, rocce permeabili e siti in cui il gas non venga sprigionato direttamente dalle rocce affioranti. Il monitoraggio EM in banda VLF ha bisogno invece di luoghi remoti, non raggiunti dall'inquinamento elettromagnetico. Dall'esperienza nel bunker del Soratte è già evidente che i fenomeni atmosferici tipici della banda VLF sono osservabili

all'interno della galleria parietale, malgrado la copertura umida del suolo, lo spessore roccioso e la quantità di acqua percolante. Per ottenere una selezione dei segnali provenienti esclusivamente dal sottosuolo si può suggerire l'installazione in ipogei al di sotto di boschi.

Nelle gallerie del Gran Sasso, la presenza del sondaggio orizzontale S13 sta offrendo una opportunità unica di indagare la parte più profonda dell'acquifero calcareo, situato in una zona sismicamente attiva dell'Appennino centrale. In tale area, oltre alla presenza della Rete Sismica Nazionale, è attiva da oltre 20 anni una rete regionale piuttosto densa dell'INGV. I dati raccolti durante questi anni (2015-2020), soprattutto in concomitanza della sequenza di Amatrice (ago. 2016 – gen. 2017), si stanno rivelando uno strumento utile per caratterizzare ed identificare più chiaramente le anomalie osservate e il loro possibile collegamento con fenomeni legati alla tettonica attiva, alla preparazione ad un evento sismico e all'idrogeologia.

Bibliografia

- Cannelli V., Piersanti A., Galli G., Melini D., 2018, *Italian Radon Monitoring Network (IRON): a permanent network for near real-time monitoring of soil radon emission in Italy*. Annals of Geophysics 61 (4) <https://doi.org/10.4401/ag-7604>.
- Casale P. De Martin M., Germani C., 2014, *Il progetto IPODATA: stazioni sismiche in siti ipogei*. Atti VIII Conv. Naz. Speleologia in Cavità artificiali (Sett. 2012) Speleologia Iblea, vol XV pp. 205-217.
- Catalano P. G., Cavinato G., Salvini F., Tozzi M., 1986, *Analisi strutturale nei Laboratori dell'INFN del Gran Sasso d'Italia*. Memorie della Società Geologica Italiana 35, pp. 647-655.
- Catalano P. G. e Salza R., 2003, *Laboratori sotterranei. Relazione idrogeologica e sistemi di drenaggio e canalizzazione*, [anche in Inglese], INFN report, 180 p.
- De Luca G., Di Carlo G., Tallini M., 2018, *A record of changes in the Gran Sasso groundwater before, during and after the 2016 Amatrice earthquake, central Italy*. Scientific Reports 8, doi: 10.1038/s41598-018-34444-1.
- Nardi A., Caputo M., 2009, *Monitoring the mechanical stress of rocks through the electromagnetic emission produced by fracturing*. Elsevier, Intern. Jou. of Rock Mechanics & Mining Sciences, p. 46, pp. 940-945 <https://doi.org/10.1016/j.ijmms.2009.01.005>.
- Piersanti A., Cannelli V., Galli G., 2016, *The Pollino 2012 seismic sequence: clues from continuous radon monitoring*. Solid Earth, 7, 1303-1316 <https://doi.org/10.5194/se-7>, pp. 1303-2016.
- Sorrels G. G., 1971, *A preliminary investigation into the relationship between Long-Period Seismic noise and Local fluctuations in the atmospheric pressure field*. Geoph. Jour. RAS (1971) 26, pp. 71-82.

