

Estratto da:

# OPERA IPOGEA

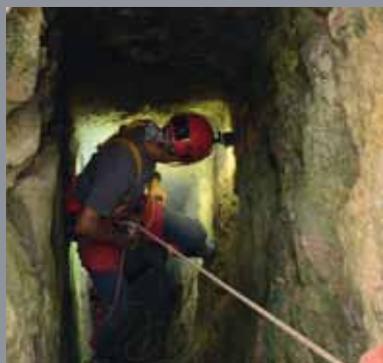
*Journal of Speleology in Artificial Cavities*

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

**HYPOGEA**



# 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.operaipogea.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.**

# 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

### Riassunto

Le tecniche geofisiche sono i metodi più efficienti per ottenere informazioni sulle strutture presenti nel sottosuolo. Ad oggi, la tomografia di resistività elettrica (ERT) è il metodo più utilizzato per il rilevamento di vuoti sotterranei, tuttavia, la combinazione con dati derivanti da diversi metodi geofisici è l'approccio più adatto per la determinazione delle cavità. Negli ultimi anni, la ERT è stata sempre più spesso congiunta alla tomografia sismica a rifrazione (SRT) al fine di ottenere interpretazioni più robuste anche utilizzando un approccio di tipo statistico. La cluster analysis eseguita su unità statistiche definite da valori di resistività elettrica, velocità delle onde P e densità sismica, ha permesso di ottenere interpretazioni ottimali delle strutture del sottosuolo. In base al numero di cluster, le mappe di distribuzione sono state costruite in uno spazio multiparametrico, consentendo di definire determinati limiti di variabilità per i parametri selezionati.

*Parole chiave:* Cavità; ERT; SRT; Cluster analysis.

### Abstract

Geophysical techniques are the most efficient methods for obtaining information on the structures present in the subsoil. Today electrical resistivity tomography (ERT) is the most used method for the detection of underground voids, however, the combination of experimental data from different geophysical methods is the most suitable approach for the determination of cavities. In recent years, the ERT has been joined more and more often to the technique of seismic refraction tomography (SRT) in order to obtain more robust interpretations also using a clustering approach. The cluster analysis performed on static units defined by electrical resistivity values, P wave velocities, and seismic density on coincident sections, allowed to interpret the subsoil structures. Based on the number of clusters, cluster distribution maps have been constructed in the multi-parameter space, allowing to define certain variability limits for the selected parameters.

*Keywords:* Cavity; ERT; SRT; Cluster analysis.

## Introduzione

Diversi casi studio mostrano l'efficacia dei metodi geofisici nell'ottenere informazioni sulle strutture presenti nel sottosuolo costituendo un eccellente strumento per l'individuazione di cavità sepolte (Imposa *et al.*, 2018). La determinazione della dimensione e della profondità delle cavità e del contrasto delle proprietà fisiche tra la cavità e le rocce circostanti, sono aspetti fondamentali per comprendere la validità di un particolare metodo geofisico (Fasani *et al.*, 2013). La letteratura, in ambito della ricerca di cavità nel sottosuolo, riporta l'utilizzo di differenti tecniche di prospezione,

come ad esempio il metodo elettromagnetico impulsivo Georadar (GPR), usato per la mappatura di cavità poco profonde (Chamberlain *et al.*, 2000), grazie alla rapidità di acquisizione dei dati e all'elevata risoluzione. Le principali limitazioni di tale tecnica derivano dall'assorbimento dell'energia elettromagnetica da parte dei materiali ed anche dalla presenza di possibili fonti di disturbo come strutture metalliche. Altra tecnica è la microgravimetria (Butler, 1984), mediante l'individuazione di anomalie generate dal contrasto di densità tra le cavità e le rocce circostanti. Tale tecnica rimane uno dei metodi teoricamente più adatto al rilevamento dei vuoti, ma la sua debolezza consiste

nell'ambiguità di interpretazione (Bitri *et al.*, 2014), essendo molto sensibile a fonti di rumore in prossimità del punto di rilievo.

Attualmente la tomografia di resistività elettrica è la tecnica più utilizzata per l'individuazione di vuoti sotterranei (Capizzi *et al.*, 2005) ed anche per la ricerca archeologica (Cardarelli *et al.*, 2008). Infatti, questa tecnica, oltre ad individuare bene le cavità per la loro alta resistività elettrica, è meno sensibile ai disturbi elettrici ed elettromagnetici rispetto ad altri metodi elettromagnetici. Tuttavia, essa da sola spesso non è sufficiente per la discriminazione univoca di una cavità rispetto ad altre strutture geologiche caratterizzate da alti valori di resistività. Di conseguenza, negli ultimi anni, alla tecnica ERT è stata sempre più spesso affiancata la tecnica di tomografia sismica a rifrazione al fine di ottenere interpretazioni più solide (Cardarelli *et al.*, 2010; Riddle *et al.*, 2010).

## Metodologie geofisiche utilizzate

Il metodo geoelettrico si basa sul principio che la distribuzione di un campo di potenziale elettrico sulla superficie dipende oltre che dalle caratteristiche geometriche della sorgente, anche dalla distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo. La tecnica ERT misura i differenti valori di resistività del terreno attraverso un set di elettrodi distribuiti lungo un profilo a distanza variabile, a seconda della risoluzione e della profondità di indagine che si vuole ottenere.

La tomografia sismica è un metodo di indagine sismica utilizzata per indagare la struttura della Terra basandosi sull'analisi dei tempi di propagazione delle onde sismiche. Attraverso l'osservazione della loro propagazione, essa studia il comportamento elastico delle rocce rilevando i tragitti e le velocità con le quali queste onde si propagano, per poter così ricostruire la geometria e la natura del sottosuolo in base alla presenza di discontinuità elastiche.

L'interpretazione congiunta e vincolata delle tecniche tomografiche sismiche ed elettriche può essere molto utile per l'identificazione di cavità e tunnel (Dahlin *et al.*, 1999), poiché consente di ridurre le ambiguità intrinseche di ciascun metodo (Linder *et al.*, 2010), migliorando allo stesso tempo la risoluzione e la compatibilità dei modelli di velocità sismica e resistività elettrica (Gallardo & Meju, 2004).

In questo studio viene utilizzata una tecnica di cluster analysis applicata a modelli inversi ERT e SRT, ricavati da dati acquisiti lungo lo stesso stendimento, e ne vengono analizzati e discussi i risultati.

## Cluster Analysis

La cluster analysis è una tecnica di analisi che ha lo scopo di raggruppare le unità statistiche tra loro eterogenee in diversi sottoinsiemi tendenzialmente omogenei, in funzione del loro livello di "somiglianza" tra le diverse unità statistiche; la scelta tra gli indici di similarità/dissimilarità è legata alla tipologia di dati che si hanno a disposizione.

Tale tecnica è stata spesso applicata al fine di correlare tra loro diverse proprietà fisiche, ad esempio velocità sismica e resistività elettrica (Bottari *et al.*, 2018), velocità e attenuazione delle onde elettromagnetiche nei dati georadar (Tronicke *et al.*, 2004), attenuazione georadar e intensità del campo magnetico (Scudero *et al.*, 2018), velocità sismica e dati audio-magnetotelurici a sorgente controllata (CSAMT) (Di Giuseppe *et al.*, 2014).

In questo lavoro viene usato un algoritmo di cluster analysis che correla tra loro la densità dei raggi sismici, la velocità di propagazione delle onde P e la resistività elettrica. Il risultato ottenuto è una sezione in cui i diversi cluster, riprodotti in differenti colori, rappresentano specifiche proprietà geologiche del sottosuolo. La rappresentazione grafica, in questo modo, riesce a facilitare la lettura delle informazioni rilevate.

## Modeling sintetico

Eseguire una modellazione sintetica significa creare un modello rappresentativo semplificato di una porzione di sottosuolo, caratterizzato da un numero finito di elementi, a ciascuno dei quali viene assegnato un valore costante del parametro fisico considerato. In questo studio, sono stati realizzati modelli sintetici che rappresentano diverse cavità, parametrizzando la velocità delle onde sismiche di compressione e la resistività elettrica. Inoltre, è stata anche eseguita una modellazione sintetica dettagliata, basata su una situazione reale in cui erano disponibili sondaggi speleologici ad alta risoluzione, al fine di confrontare i risultati previsti con quelli sperimentali, per ottimizzare la fase di inversione e interpretazione.

Sono stati creati modelli sintetici 2D con cavità (velocità sismica molto bassa e resistività molto alta) e blocchi di materiale litologico altamente coesivo (valori di velocità sismica e resistività entrambi elevati). I modelli di resistività elettrica sono stati costruiti utilizzando un valore di  $10^5 \Omega\text{m}$  per le cavità,  $5000 \Omega\text{m}$  per i blocchi di materiale altamente coesivo e  $500 \Omega\text{m}$  per il materiale di fondo. Mentre i modelli di sismica a rifrazione sono stati divisi in strati con un gradiente verticale di velocità da 400 m/s a 3000 m/s, usando un valore di 330 m/s per le cavità, 5000 m/s per i blocchi coesivi (Rohdewald *et al.*, 2010). Nelle figure a seguire sono mostrati due esempi di inversione dei dati simulati ottenuti dal modello creato con un blocco altamente coesivo e due cavità (fig. 1) e dal modello ottenuto dai rilievi speleologici della cava Foderà (fig. 2). Dai risultati ottenuti si evidenzia come la cluster analysis possa essere un valido strumento per discriminare le cavità da anomalie di altra natura.

## Il test site: Parco delle Cave di Marsala

I dati sperimentali sono stati acquisiti presso il sito di prova del Parco delle Cave di Marsala (Sicilia) per eseguire un confronto con i risultati ottenuti dai da-

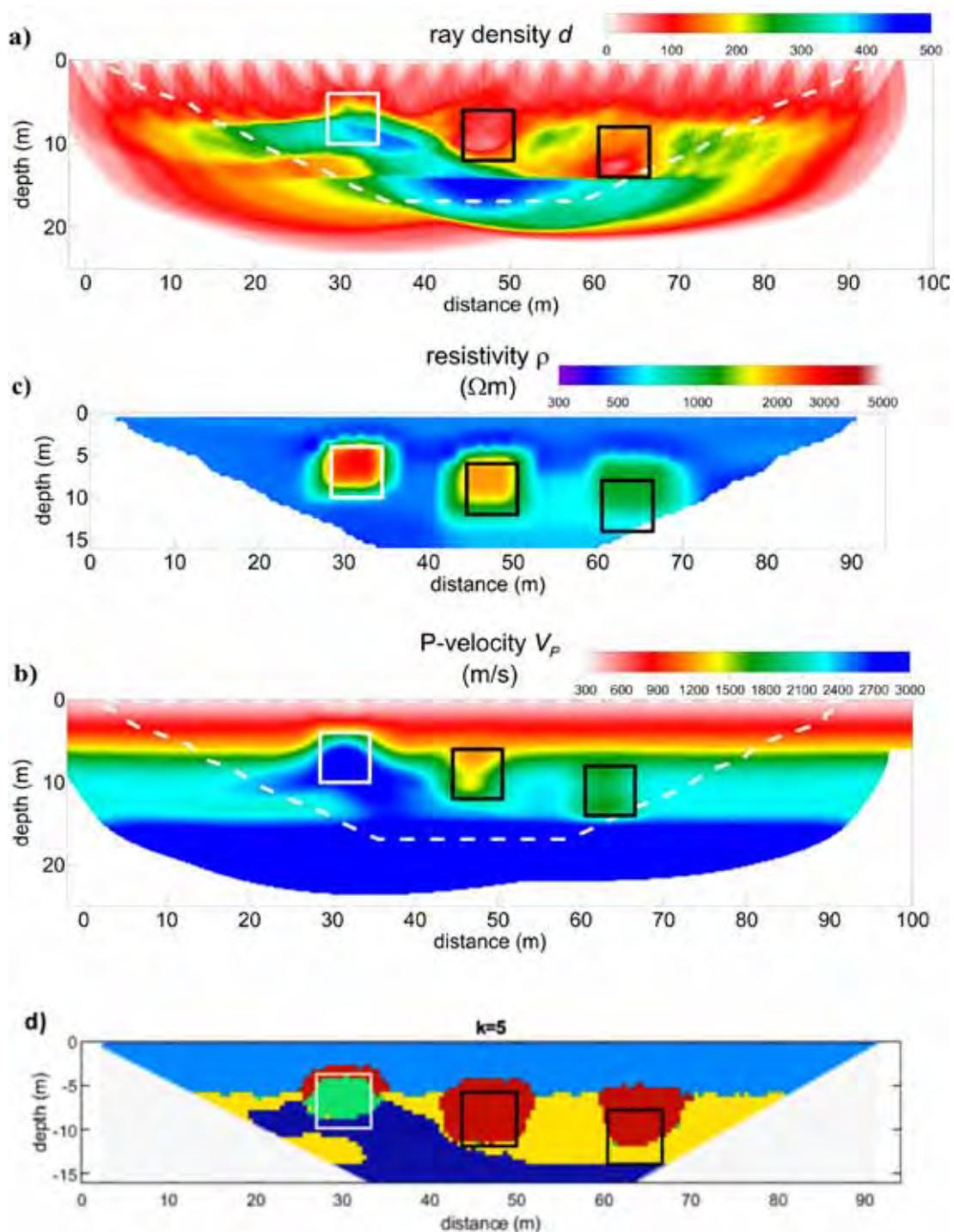


Fig. 1 – Risultati di inversione dei tempi di viaggio simulati delle onde P e dati di resistività. Modello con due cavità ed un blocco altamente coesivo: Densità dei raggi sismici  $d$  (a); SRT della velocità delle onde P  $v_p$  (b); ERT (c); mappa di distribuzione dei cluster con  $k=5$  (d). I confini delle cavità e dei blocchi compatti sono indicati rispettivamente da linee continue in nero e bianco.

Fig. 1 – Results of inversion of simulated P-waves travel-times and resistivity data. Model with two cavities and a highly cohesive block: Seismic rays density  $d$  (a); SRT of P-waves velocity  $V_p$  (b); ERT (c); cluster distribution map with  $k=5$  (d). Boundaries of cavities and compact blocks are indicated by black and white solid lines respectively.

ti teorici, ottimizzare il processo di inversione e semplificare la fase di interpretazione degli stessi dati. Dal tempo dei Fenici fino ad oggi questa zona è stata sfruttata per l'estrazione della Calcarenite di Marsala (Pleistocene Medio Inf.). Questa calcarenite si presenta omogenea e ben cementata, di colore giallo chiaro, scarsamente fossilifera, con spessori elevati, con gra-

nuli calcarei e cemento carbonatico. La roccia è vuotolare, altamente porosa e scarsamente fratturata. La cava di Foderà (fig. 3), all'interno del "Parco delle Cave", è attualmente utilizzata per attività turistiche e culturali. Le cave di quest'area sono principalmente cave a cielo aperto, con forme quasi regolari e fronti di scavo sub-verticali. La maggior parte di queste cave

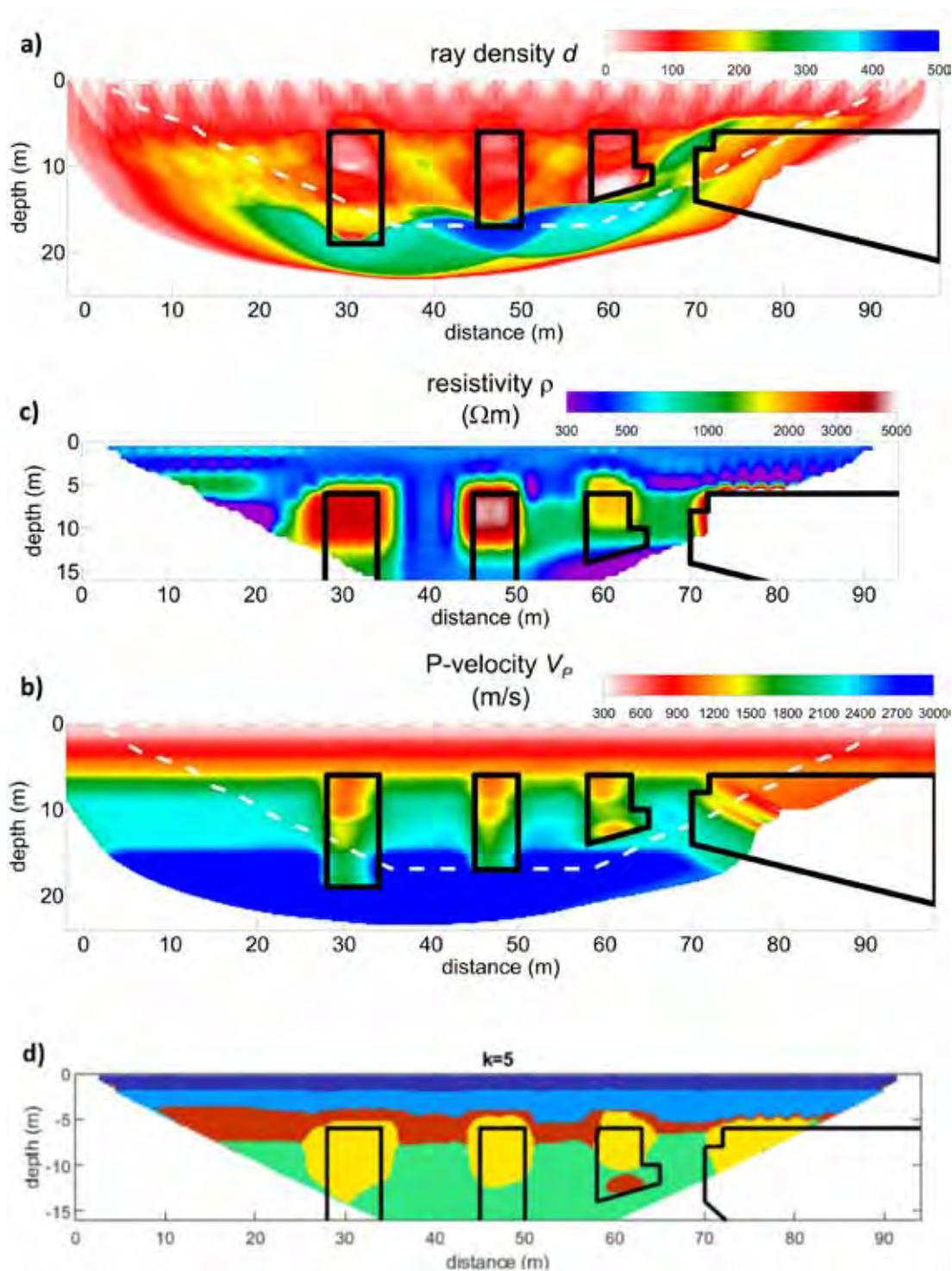


Fig. 2 – Risultati di inversione dei tempi di viaggio simulati delle onde P e dati di resistività. Modello ottenuto dai rilievi speleologici della cava Foderà: Densità dei raggi sismici  $d$  (a); SRT della velocità delle onde P  $V_p$  (b); ERT (c); mappa di distribuzione dei cluster con  $k=5$  (d). I confini delle cavità sono indicati da linee continue nere.

Fig. 2 – Results of inversion of simulated P-waves travel-times and resistivity data. Model obtained from the speleological surveys of the Foderà quarry: Seismic rays density  $d$  (a); SRT of P-waves velocity  $V_p$  (b); ERT (c); cluster distribution map with  $k=5$  (d). Boundaries of cavities are indicated by black solid lines.

sono state riempite, anche se parzialmente, con materiali di scarto provenienti da fronti di scavo della stessa cava o cavità vicine. Nel Parco sono presenti anche diverse cavità sotterranee, situate a diverse profondità rispetto al livello del suolo, realizzate mediante scavo di tunnel sostenuti da pilastri.

## Acquisizione, elaborazione dei dati sperimentali

La cava scelta come test sul campo si sviluppa in una serie di tunnel e sale collegate, la maggior parte delle quali sono state oggetto di una fase di rilievi topogra-

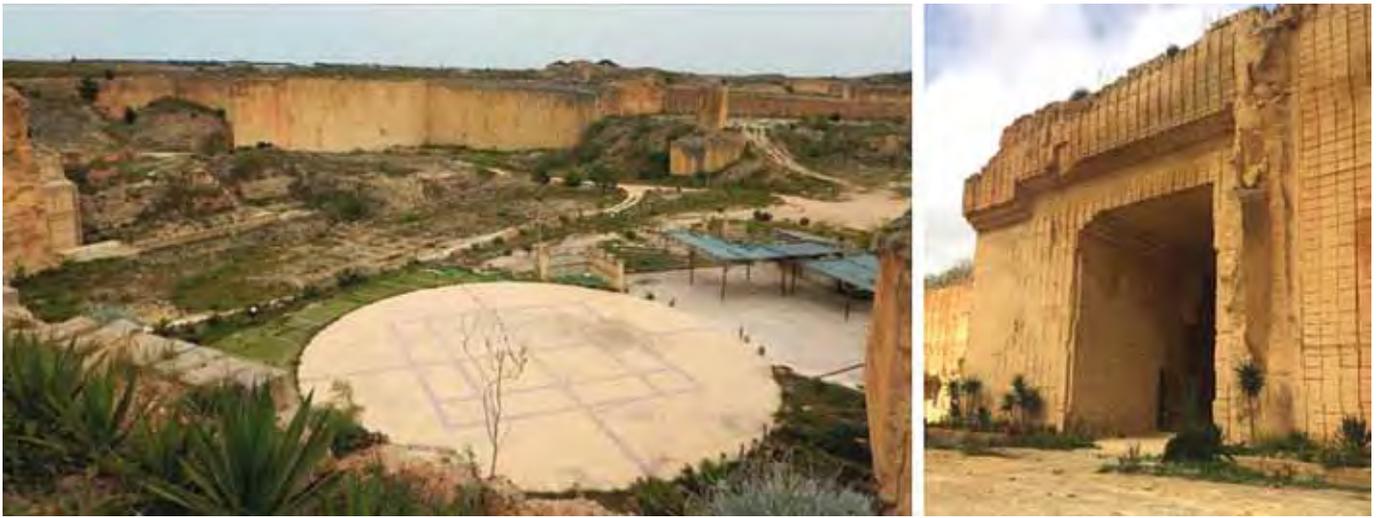


Fig. 3 – Veduta del Parco delle Cave di Marsala (a sinistra) e ingresso del tunnel principale della Cava Foderà (a destra) (foto A. Carollo).

Fig. 3 – View of Parco delle Cave of Marsala (left) and entrance of the main tunnel of Foderà Cave (right) (foto A. Carollo).

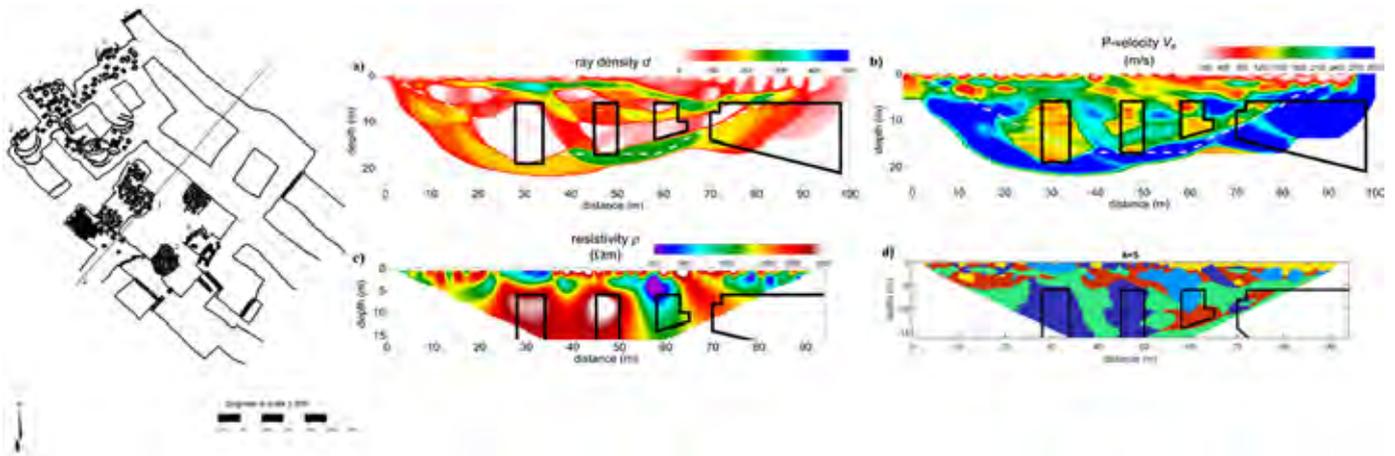


Fig. 4 – A sinistra la planimetria della cava Foderà, con la traccia dell'indagine geofisica; a destra i risultati ottenuti. Densità dei raggi sismici d (a); SRT della velocità delle onde P  $v_p$  (b); ERT (c); mappa di distribuzione dei cluster (d).

Fig. 4 – On the left the plan of the Foderà quarry, with the trace of the geophysical survey; on the right the obtained results. Seismic rays density d (a); SRT of P-waves velocity  $V_p$  (b); ERT (c); cluster distribution map (d).

fici sotterranei con strumenti e software utilizzati per attività speleologiche. In particolare, il misuratore di distanza laser Leica X310 è stato utilizzato con precisione nelle misurazioni lineari di 2 mm e 0.5° RMS per misurazioni angolari (inclinazione e bussola). Le cavità nella calcarenite del Parco delle Cave sono quasi tutte accessibili (ci sono almeno 3 ingressi), e il rilievo ipogeo effettuato ha permesso di determinare le varie configurazioni dei vuoti, delle profondità e delle loro dimensioni, permettendo di ricostruire la planimetria della cava e disegnare la sezione di riferimento (fig. 4). L'indagine di SRT è stata effettuata utilizzando 48 geofoni con intervalli di 2 m tra i geofoni. Lungo lo stesso allineamento nella direzione NE-SW è stata acquisita la ERT con 48 elettrodi, collocando gli elettrodi nelle stesse posizioni dei geofoni. I risultati dell'inversione evidenziano aree caratterizzate da una bassa densità dei raggi sismici e da bassi valori di velocità dell'onda

P in corrispondenza delle cavità (fig. 4 a-b). Inoltre, il modello di resistività elettrica identifica tre delle quattro cavità presenti nel modello reale (fig. 4 c). Per quanto riguarda i risultati ottenuti dalla cluster analysis, si individuano bene le prime due cavità discriminate dallo stesso cluster, mentre la terza cavità risulta associata ad un cluster diverso, probabilmente riconducibile alla sua forma particolare (fig. 4 d).

A tal proposito bisogna anche dire che la complessità della forma dei tunnel e delle camere della cava Foderà condiziona le inversioni 2D: queste risultano influenzate da anomalie fantasma generate dalla tridimensionalità delle strutture intercettate e dalla presenza di altre strutture vicine all'allineamento di indagine (Martorana *et al.*, 2018). Inoltre, l'ERT 2D eseguita in situ è anche influenzata dalle eterogeneità della roccia e dai detriti, che non sono previste nel modello teorico.

## Conclusioni

Questo lavoro mostra come lo studio congiunto delle tecniche di SRT e ERT facilita la individuazione di cavità sepolte nel sottosuolo, minimizzando le possibili ambiguità interpretative e producendo i risultati più robusti allo stesso tempo. La cluster analysis eseguita su unità statistiche si rivela essere un metodo efficace per caratterizzare le strutture prossime alla superficie in presenza di complessi scenari geologici.

## Bibliografia

- Bitri A., Samyn K., Jacob T., 2014, *Cavity investigation by surface wave tomography and microgravity*. In Near Surface Geoscience 2014-20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (Vol. 2014, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers, doi: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142086>.
- Bottari C., Capizzi P., Cavallaro D., Coltelli M., D'Alessandro A., Lodato L., Martorana R., Pisciotta A., Scudero S., 2018, *Coseismic damage at an archaeological site in Sicily, Italy: Evidence of Roman Age earthquake surface faulting*. Surveys in Geophysics, 39(6), 1263-1284, doi: 10.1007/s10712-018-9482-2.
- Capizzi P., Cosentino P.L., Fiandaca G., Martorana R., Messina P., 2005, *2D GPR and geoelectrical modelling: tests on man-made tunnels and cavities*. In: Near Surface 2005-11th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. European Association of Geoscientists & Engineers, 2005. p. cp-13-00172.; Code 104313, B036 1-4, ISBN 90-737-8191-4, doi: <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.13.B036>.
- Cardarelli E., Fischanger F., Piro S., 2008, *Integrated geophysical survey to detect buried structures for archaeological prospecting. A case-history at Sabine Necropolis (Rome, Italy)*. Near Surface Geophysics 6(1), 15–20, doi: <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2007027>.
- Cardarelli E., Cercato M., Cerreto A., Di Filippo G., 2010, *Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities*. Geophysical Prospecting, 58(4), 685-695, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00854.x>
- Chamberlain A.T., Sellers W., Proctor C., Coard R., 2000, *Cave detection in limestone using ground penetrating radar*. Journal of Archaeological Science, 27(10), 957-964, doi: <https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0525>.
- Dahlin T., Bjelm L., Svensson C., 1999, *Use of electrical imaging in site investigations for a railway tunnel through the Hallandsås Horst, Sweden*. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 32(2), 163-172. doi: 10.1144/GSL.QJEG.1999.032.P2.06.
- Di Giuseppe M. G., Troiano A., Troise C., De Natale G., 2014, *K-means clustering as tool for multivariate geophysical data analysis. An application to shallow fault zone imaging*. Journal of Applied Geophysics, 101, 108-115, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.12.004>.
- Fasani G. B., Bozzano F., Cardarelli E., Cercato M., 2013, *Underground cavity investigation within the city of Rome (Italy): A multi-disciplinary approach combining geological and geophysical data*. Engineering Geology 152(1), 109-121, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.10.006>.
- Gallardo L. A. & Meju M. A., 2004, *Joint two-dimensional DC Resistivity and Seismic travel time inversion with cross-gradients constraints*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 109(B3), doi: 10.1029/2003JB002716.
- Imposa S., Grassi S., Di Raimondo S., Patti G., Lombardo G., Panzera F., 2018, *Seismic refraction tomography surveys as a method for voids detection: an application to the archaeological park of Cava Ispica, Sicily, Italy*. International Journal of Architectural Heritage, 12(5), 806-815, doi: 10.1080/15583058.2017.1419311.
- Linder S., Paasche H., Tronicke J., Niederleithinger E., Vienken T., 2010, *Zonal cooperative inversion of crosshole P-wave, S-wave, and georadar travelttime data sets*. Journal Applied Geophys, 72(4), 254–262, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2010.10.003>.
- Martorana R., Capizzi P., Carollo A., 2018, *Misinterpretation Caused by 3D Effects on 2D Electrical Resistivity Tomography-Tests on Simple Models*. In 2nd Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining (Vol. 2018, No. 1, pp. cp-566). European Association of Geoscientists & Engineers, doi: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802560>.
- Riddle G. I., Hickey C. J., Schmitt D. R., 2010, *Subsurface tunnel detection using Electrical Resistivity Tomography and Seismic Refraction Tomography: a case study*. In 23rd EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (pp. cp-175). European Association of Geoscientists & Engineers, 552-562, doi: 10.3997/2214-4609-pdb.175. SAGEEP064.
- Rohdewald S., Burton B., Sheehan J., Doll W., 2010, *Processing of seismic refraction tomography data*, SAGEEP Short Course Manual, In Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Keystone, Colorado, <http://rayfract.com/SAGEEP10.pdf>, accessed April 2011.
- Scudero S., Martorana R., Capizzi P., Pisciotta A., D'Alessandro A., Bottari C., Di Stefano G., 2018, *Integrated Geophysical Investigations at the Greek Kamarina Site (Southern Sicily, Italy)*. Surveys in Geophysics, 39(6), 1181-1200, doi: 10.1007/s10712-018-9483-1.
- Tronicke J., Holliger K., Barrash W., Knoll M.D., 2004, *Multivariate analysis of cross-hole georadar velocity and attenuation tomograms for aquifer zonation*. Water Resources Research, 40(1), W01519, doi: <http://dx.doi.org/10.1029/2003WR002031>.

