

Tecnica di acquisizione del laser scanner da foro: applicazione al rilievo di cavità ipogee nell'abitato di Cutrofiano (Salento, Puglia)

*The borehole laser scanner technique: application to the survey of
underground quarries in the town of Cutrofiano (Salento, Apulia
region, Southern Italy)*

SPALLUTO L. (*), FIORE A. (*), LEPORE D. (*),
LUISI M. (*), MICCOLI M.N. (*)

RIASSUNTO - La tecnica del rilievo con il laser scanner da foro è stata applicata con successo al caso studio dell'abitato di Cutrofiano (Le) caratterizzato dalla presenza di alcune di antiche cave ipogee, con gli accessi verticali oggi obliterati, realizzate in calcareniti tenere appartenenti alla Formazione della Calcarenite di Gravina (Pliocene superiore – Pleistocene inferiore). Lo scanner è stato inserito all'interno di due fori di sondaggio a carotaggio continuo, rivesti con tubo in pvc, realizzati dal Comune di Cutrofiano nell'ambito di una campagna di indagini geognostiche tese all'individuazione delle cave ipogee presenti nel centro urbano.

Il risultato del rilievo è stato quello di ottenere delle nuvole di punti all'interno degli ambienti di due distinte cave ipogee da cui è stato successivamente ottenuto, attraverso un software specifico di triangolazione dei punti, un rilievo tridimensionale delle caratteristiche geometriche dei vuoti senza che fosse necessario accedere direttamente agli ambienti ipogei e senza avere una conoscenza preliminare della reale dimensione e distribuzione delle gallerie e dei pilastri nel sottosuolo. L'acquisizione della nuvola di punti in un sistema georeferenziato (sistema UTM datum WGS 84 fuso 33) è stata ottenuta mediante due distinte scansioni facendo ruotare la sonda sui suoi assi sia in senso orizzontale che verticale in maniera da scansionare con un buon dettaglio oggetti a sviluppo sia verticale che orizzontale. Il rilievo tridimensionale è stato proiettato in pianta in modo da poter visualizzare su una mappa la distribuzione delle cavità al di sotto degli edifici e delle strade della periferia meridionale di Cutrofiano. I dati planimetrici sono stati implementati in sistemi GIS in maniera da poter essere visualizzati su differenti basi topografiche e su ortofoto a scala di grande dettaglio.

La ricostruzione tridimensionale delle geometrie dell'in-

tradosso delle cavità, delle pareti laterali e del pavimento delle cavità è stata realizzata in maniera da evidenziare la presenza di fenomeni di dissesto in atto (nicchie di distacco dalla volta, espulsione di materiale dalle pareti laterali ecc.) e di cumuli di materiali sul pavimento riconducibili a crolli parziali o deposito di materiale durante e dopo le fasi di lavorazione. I risultati ottenuti hanno permesso di evidenziare la sostanziale regolarità delle geometrie delle gallerie, segno che gli ambienti non sembrano aver registrato particolari fenomeni di dissesto.

Il rilievo ha evidenziato inoltre la probabile estensione delle gallerie anche in zone limitrofe a quelle raggiunte dal rilievo laser scanner; pertanto, sono state individuate le aree in cui si dovranno approfondire le indagini geognostiche per completare il rilievo delle cavità ipogee che si sviluppano al di sotto della porzione dell'abitato di Cutrofiano indagata.

PAROLE CHIAVE: laser scanner da foro, rilevamento di cave ipogee, modello geometrico tridimensionale di cavità, pericolosità da sinkhole in aree urbane, Cutrofiano, Salento, Regione Puglia.

ABSTRACT - The borehole laser scanner technique was successfully applied to two ancient underground quarries located in the subsurface of the town of Cutrofiano, Salento, Apulia, southern Italy. The two quarries were caved during the first part of the 20th century in soft calcarenites of the Calcarenite di Gravina Fm (Late Pliocene-Early Pleistocene) and, after their dismissing, the vertical access bores were completely buried. As a consequence, during the last decades the two quarries were incorporated in the urban district of the town of Cutrofiano. The borehole laser scanner was displayed in

(*) Autorità di Bacino della Puglia, c/o INNOVA PUGLIA S.P.A. – (EX TECNOPOLIS CSATA). Str. Prov. per Casamassima km 3 - 70010 - Valenzano (Bari); email: luigi.spalluto@adb.puglia.it

two boreholes cored by the Cutrofiano city administration in order to individuate the position of quarries below the urban area. The laser scanner surveys allowed us to have a cloud of points of the internal environments of the two quarries in order to reconstruct a 3D model of the voids without accessing directly into the cavities and without knowing the true dimensions and distributions of galleries and pillars in the subsurface.

Clouds of points were acquired in a georeferenced system (UTM datum WGS 84 zone 33) rotating, for each scanning, the head of the probe along its axes both horizontally and vertically. The 3D georeferenced surveys were projected in a plan view in order to display the distribution of underground galleries over an orthofoto map of Cutrofiano.

The reconstruction of the 3D model was addressed to the analysis of the geometries of vaults and pillars of underground quarries in order to verify the occurrence of instability processes and the deposition of debris due to the piling up of material collapsed from the roof of the cavities. The analysis of the 3D models of the two quarries show quite regular geometries indicating the absence of relevant instability processes inside the cavities. However, the two models reveal a possible prosecution of the quarry galleries beyond the survey boundaries; as a consequence, it is proposed to extend geognostic investigations in some adjoining areas in order to have a complete survey of the two quarries in the subsurface of Cutrofiano.

KEY WORDS: borehole laser scanner, underground quarry survey, 3D geometric model of subsurface voids, sinkhole hazard in urbanized area, Cutrofiano, Salento, Apulia Region.

1. - INTRODUZIONE

Il territorio pugliese è caratterizzato dalla presenza di una successione calcarenitica plio-pleistocenica spessa alcune decine di metri e distribuita ai margini dei rilievi carbonatici del Gargano, delle Murge e del Salento (CIARANFI *et alii*, 1988) (fig. 1). Tali calcareniti per le loro peculiari caratteristiche fisiche e meccaniche sono da considerarsi delle rocce tenere (ANDRIANI & WALSH, 2002; CHERUBINI *et alii*, 2007); pertanto, sono state estensivamente utilizzate come materiale da costruzione venendo estratte in conci da cave realizzate sia in superficie che nel sottosuolo (BARNABA *et alii*, 2010). La diffusione dell'attività estrattiva in sottoterraneo ha portato alla formazione di numerose cavità, in alcuni casi realizzate anche su più livelli, in parte inglobate nei centri urbani in espansione (BUZZANCA *et alii*, 2009; CAGGIANO *et alii*, 2007; 2008a, b). Queste ultime sono spesso in condizioni di stabilità precaria e rappresentano un livello significativo di rischio per beni e vite umane. Per tale ragione, l'Autorità di Bacino della Puglia ha predisposto un atto d'indirizzo per la messa in sicurezza dei territori a rischio cavità sotterranee evidenziando come tali criticità rappresentino uno dei principali fattori di pericolosità geomorfologica del territorio pugliese (FIORE, 2006; PARISE 2010; 2011; FIORE & PARISE, 2012; 2013).

Tra i numerosi siti pugliesi, il distretto estrattivo di Cutrofiano è uno dei più importanti del Salento per la presenza di una attiva coltivazione in sotterraneo mediante la realizzazione di numerose cave ipogee (MENEGATTI & TONI, 1970; TONI & QUARTULLI, 1986; TONI, 1990; MAINARDI, 1999; DE PASCALIS *et alii*, 2010). Terminata la coltivazione, le cave ipogee furono abbandonate, in alcuni casi riempite di rifiuti e i pozzi di accesso chiusi o addirittura tombati.

L'occorrenza di fenomeni di dissesto geomorfologico nel territorio di Cutrofiano, legato alla formazione di voragini per il collasso delle volte delle gallerie, ha evidenziato la necessità di procedere ad un approfondimento della conoscenza del territorio attraverso il rilevamento delle caratteristiche geometriche e plano-altimetriche delle cave in sottoterraneo. Infatti, allo stato attuale delle conoscenze non esiste ancora una documentazione completa soprattutto per le cave che si sviluppano al di sotto della periferia meridionale dell'abitato. Di queste infatti si era persa del tutto la memoria dopo l'abbandono e il riempimento dei boccapozzi, di conseguenza l'espansione territoriale degli ultimi anni ha fatto sì che parte dell'abitato di Cutrofiano sia stato edificato senza considerare la presenza di cavità antropiche nel sottosuolo.

Al fine di procedere a un censimento delle cave in sottoterraneo presenti nel territorio comunale di Cutrofiano, l'amministrazione ha finanziato alcuni rilievi speleologici finalizzati alla ricostruzione della distribuzione plano-altimetrica delle cave nel sottosuolo. L'attività di rilevamento degli ipogei non è stata possibile in tutti quei casi in cui in seguito alla cessazione dell'attività estrattiva, i boccapozzi sono stati tombati impedendo agli speleologici l'accesso diretto alle cavità. Questa situazione è presente in corrispondenza della periferia meridionale dell'abitato di Cutrofiano dove i boccapozzi non sono più individuabili in superficie. La presenza di cavità collocate in corrispondenza della porzione più a sud dell'abitato di Cutrofiano espone ad un evidente rischio gli abitanti e le infrastrutture presenti e ha spinto l'amministrazione comunale a finanziare nell'ambito delle attività del redigendo Piano Urbanistico Generale (P.U.G.) uno studio geologico e geofisico specifico nel tentativo di individuare la presenza delle cavità di origine antropica (LIGORI, 2013). Nell'ambito di questa attività e al fine di aggiornare il Piano stralcio di Assetto Idrogeologico (P.A.I.) per gli aspetti relativi alla pericolosità geomorfologica, l'Autorità di Bacino della Puglia ha condotto dei rilievi laser scanner da foro per ricostruire le geometrie tridimensionali delle cavità ipogee utilizzando come vie d'ingresso i fori dei carotaggi realizzati dall'amministrazione comunale.

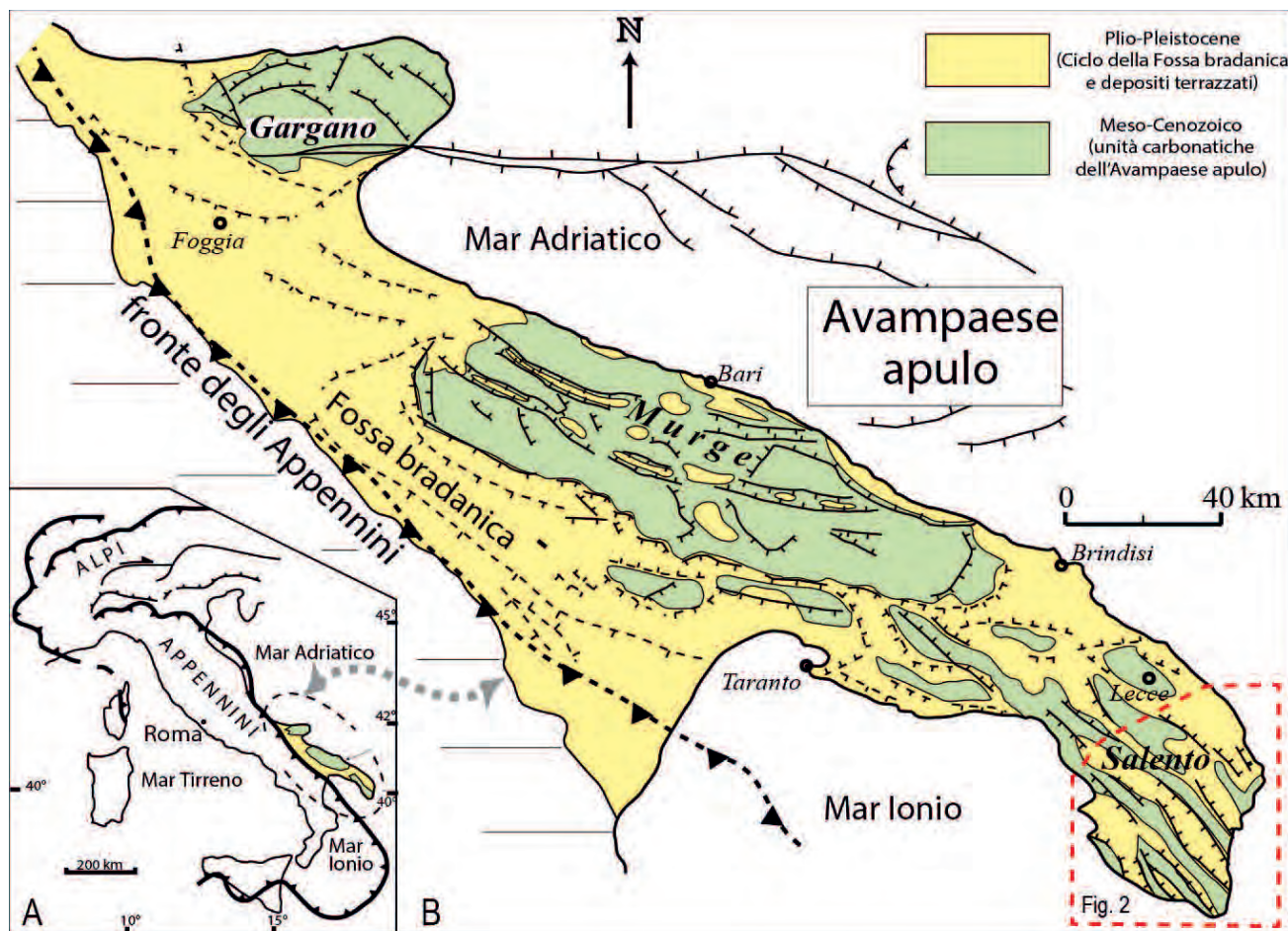


Fig. 1 – Carta geologica dell'Avampaese apulo (modificato da PIERI *et alii*, 1997). L'area rappresentata in figura 3 è delimitata dalla linea rossa tratteggiata.
 – Geologic map of the Apulian foreland (modified after Pieri *et alii*, 1997). The area showed in figure 3 is delimited by the red dashed line.

Al fine di implementare le tecniche di rilevamento delle cavità di origine antropica nel territorio pugliese, il presente lavoro illustra l'applicazione della tecnica di rilevamento tridimensionale del laser scanner da foro al caso studio di due cave ipogee, non accessibili direttamente da operatori, situate nel centro urbano di Cutrofiano in corrispondenza di via Otranto e di via Brindisi.

2. - METODOLOGIA

Lo strumento utilizzato per il rilievo delle cave ipogee di Cutrofiano è il laser scanner 3D C-ALS della società MDL realizzato in maniera specifica per essere utilizzato all'interno di fori di sondaggio per il rilevamento di ambienti inaccessibili posti a profondità variabili da pochi metri fino ad alcune decine di metri dal piano campagna.

La sonda misura la forma tridimensionale dell'ambiente ipogeo e la riflettività della superficie. La tecnica di misura delle distanze è basata sul calcolo del "tempo di volo" che impiega il laser per

colpire le superfici riflettenti (superfici rocciose e altri oggetti distribuiti nella cavità) e ritornare indietro. Questo permette di fare misure accurate in aree inaccessibili, quali a esempio cunicoli e cavità ipogee, senza la necessità di piazzare dei riflettori sui bersagli.

Lo strumento ha una forma cilindrica (diametro 5 cm), è lungo un metro e monta lo scanner ad una delle estremità; quest'ultima è costituita da una testa motorizzata che ruota su 2 assi (fig. 2) assicurando così una copertura a 360° dell'ambiente ipogeo permettendo l'acquisizione di oggetti posti ad una distanza compresa tra un minimo di 30 cm fino a un massimo di 150 m. Il tasso di acquisizione dei dati è di circa 200 punti per secondo con un'accuratezza di +/- 5 cm. Oltre allo scanner, la sonda monta sensori di inclinazione e di rotazione, i quali consentono di registrare i dati di posizionamento dello strumento in continuo sia durante le operazioni di inserimento e dispiegamento della sonda nel foro di sondaggio che durante la fase di scansione. Questo permette l'accurato posizionamento e orientamento della sonda mentre la scan-



Fig. 2 - Rilievo con laser scanner da foro. A) preparazione dello strumento e acquisizione dell'azimuth con una bussola; B) fase iniziale dell'inserimento del laser scanner nel foro di sondaggio; C) dispiegamento della sonda nel foro di sondaggio con aste snodabili; D) dettaglio della sonda montata alla testa dello strumento, sono indicate le parti dello strumento che ruotano durante la scansione.

– Borehole laser scanner survey. A) probe preparation and azimuth acquisition by means of a field compass; B) probe deployment in the borehole by means of articulated rods; C) detail of the probe set at the head of the device, rotating parts of the probe are indicated by fingers.

sione laser è in corso e assicura che ogni punto nella risultante nuvola di punti possa essere correttamente geo-referenziato. Una telecamera da foro è integrata nella parte anteriore della testa dello scanner, è fondamentale nelle operazioni di inserimento e posizionamento della strumentazione in luoghi privi di illuminazione e consente di evitare l'impatto con ostacoli o ostruzioni, eventualmente presenti nel foro di sondaggio o nella cavità, che potrebbero danneggiare la strumentazione o impedirne il recupero.

L'acquisizione della nuvola dei punti è avvenuta con il software proprietario della MDL *Cavity Scan* 2.13, i dati di *input* inseriti sono le coordinate GPS (X,Y e Z) acquisite nel sistema di riferimento UTM *datum* WGS 84 fuso 33 e l'azimuth misurato lungo la direzione di inserimento della strumentazione del foro di sondaggio misurato con una bussola. La sonda è stata calata nei fori di sondaggio attraverso una batteria di aste estensibili, lunga 34 metri, costituita da segmenti piegabili lunghi un metro; durante il dispiegamento il posizionamento della

sonda è stato rilevato a ogni metro fino al raggiungimento di una posizione ritenuta idonea per iniziare il rilevamento delle cavità (v. fig. 2).

L'elaborazione della nuvola di punti e la ricostruzione delle geometrie tridimensionali degli ipogei è stato effettuato con il *software* Voidwork 2.0 della Maptek.

3. - INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il Salento è parte del settore poco deformato dell'Avampese apulo ed è costituito, nelle sue linee più essenziali, da un substrato sedimentario calcareo cretaceo e miocenico, appartenente rispettivamente alle formazioni del Calcarea di Altamura (Cretaceo superiore) e della Pietra Leccese (Miocene), dislocato da faglie, a prevalente componente estensionale, orientate circa NO-SE (MARTINIS, 1962; CIARANFI *et alii*, 1988) (fig. 3). Le faglie delimitano delle dorsali strette e allungate (horst delle Serre salentine) separate da depressioni morfo-strutturali (graben e semi graben) parzialmente colmate da unità plio-pleistoceniche a prevalente composizione carbonatica in assetto sub-orizzontale. In particolare, le unità plio-pleistoceniche affioranti sono costituite da calcareniti e calciruditi macrofossilifere in assetto sub-oriz-

zontale, spesse al massimo alcune decine di metri, appartenenti alla Formazione della Calcarenite di Gravina (TROPEANO *et alii*, 2004). Tale formazione è informalmente suddivisa in due distinti intervalli: uno inferiore, spesso circa 20-25 metri, costituito da calcareniti macro e microfossilifere poco cementate localmente noto con il termine di "carparo"; uno superiore, spesso pochi metri, costituito da calcareniti e calciruditi macrofossilifere ben cementate, noto con il termine di "mazzaro". Sulla Calcarenite di Gravina poggia in continuità di sedimentazione una successione costituita da depositi clastici a prevalente composizione argillosa appartenente all'unità informale delle argille subappennine (CIARANFI *et alii*, 1988) (fig. 4).

Le unità plio-pleistoceniche sono ricoperte in più punti lungo il settore occidentale del Salento da più unità litostratigrafiche terrazzate del Pleistocene medio e superiore costituite da sabbie car-

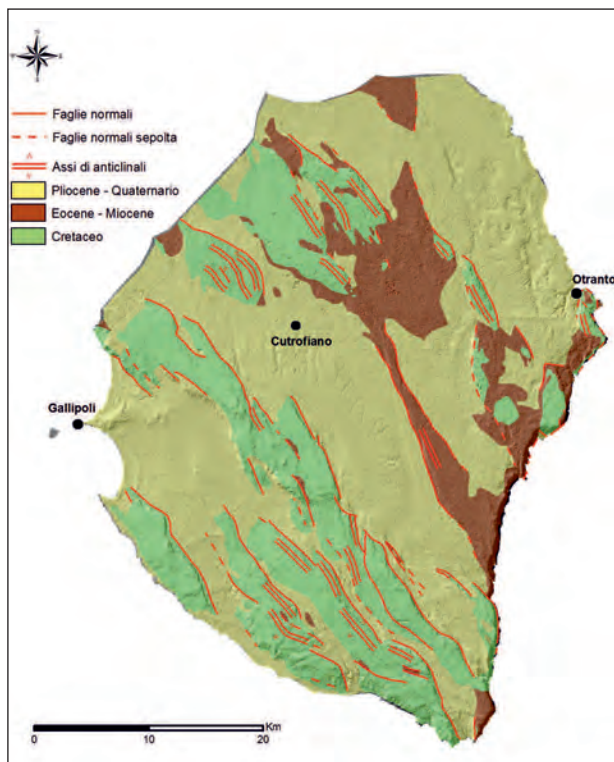


Fig. 3 – Carta geologica sintetica del Salento meridionale (modificato e ridisegnato da MARTINIS, 1962).
– Simplified geologic map of the southern Salento (modified and redrawn after MARTINIS, 1962).

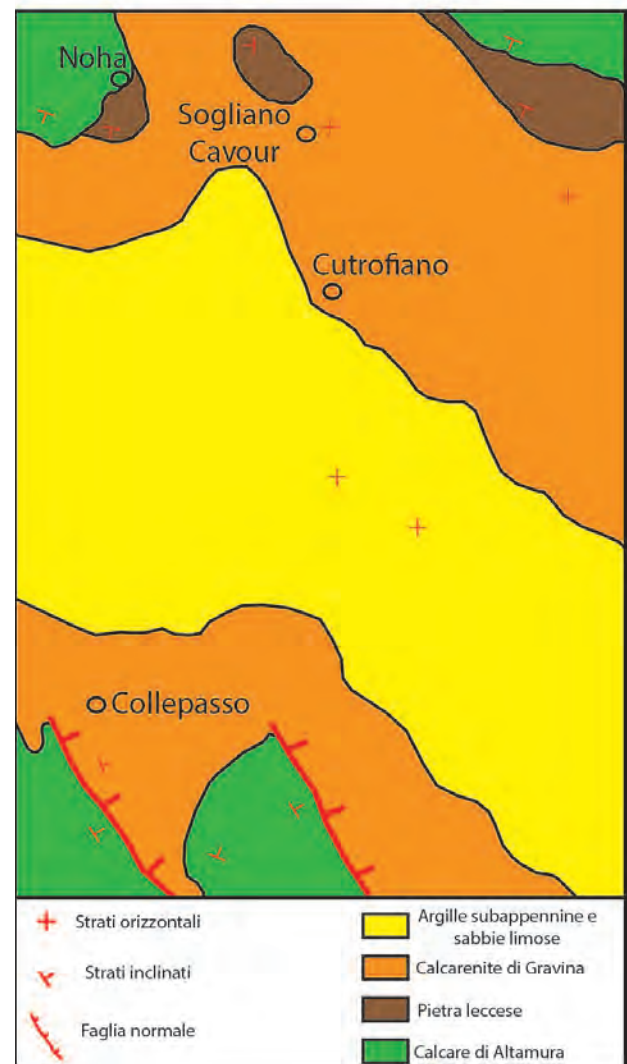


Fig. 4 – Carta geologica semplificata dell'area di studio.
– Simplified geologic map of the studied area.

bonatiche e da calcareniti bioclastiche riferibili ad ambienti di transizione (dalla spiaggia sommersa alla retrospiaggia), spesse alcuni metri, deposte durante la fase di generale sollevamento che ha caratterizzato l'intero Avampaese apulo a partire dal Pleistocene medio (CIARANFI *et alii*, 1988).

4. - RILIEVO LASER SCANNER DELLE CAVE DI VIA OTRANTO E DI VIA BRINDISI

Il *laser scanner* da foro è stato inserito in due dei fori di sondaggio rivestiti posti in corrispondenza del parcheggio di via Otranto e in via Brindisi. La proiezione in pianta del rilievo tridimensionale georeferenziato dei due rilievi ha permesso di visualizzare sulla ortofoto del 2006 della Regione Puglia l'ubicazione delle gallerie delle due cave al di sotto del centro abitato di Cutrofiano (fig. 5).

Il rilievo *laser scanner* effettuato in via Otranto ha evidenziato come il sondaggio sia stato realizzato nei pressi del pozzo d'ingresso della cava, oggi completamente tombato e posto a circa 4,5 metri di profondità. Il boccapozzo della cava presenta

un diametro nella parte sommitale di circa 2,20 metri che tende ad aumentare verso il basso, assumendo così una forma a imbuto rovesciato, fino a raggiungere il diametro massimo di circa 4 metri (fig. 6A). I dati del sondaggio a carotaggio continuo evidenziano come la base del pozzo d'ingresso, posto alla profondità di circa 11 metri dal piano campagna, corrisponde alla base del banco di calcarenite ben cementata ("mazzaro") che funge da sostegno ai carichi gravanti sulla volta delle gallerie (fig. 7). Alla base del pozzo d'ingresso della cava è presente una camera centrale da cui si dipartono tre gallerie grossomodo perpendicolari tra loro secondo quella che era la tipologia classica di coltivazione delle cave nel territorio di Cutrofiano. La geometria delle gallerie rispecchia le peculiarità classiche delle cave presenti nel sottosuolo del territorio di Cutrofiano; infatti, si tratta di gallerie a sezione quadrata o rettangolare con lato di lunghezza variabile dai 4 ai 7 metri (v. fig. 6A). La sezione tende a variare lungo la direzione di sviluppo delle gallerie anche per la presenza diffusa di detriti di scarto della lavorazione e di materiale a tessitura fine ("tufina") accumulato sul pavi-



Fig. 5 – Proiezione in pianta su ortofoto del 2006 della Regione Puglia dei rilievi tridimensionali delle due cave ipogee rilevate nel centro urbano di Cutrofiano. Con le linee tratteggiate in giallo sono indicate le aree in cui si presume l'estensione delle gallerie delle cave ipogee.

– Map projection of the 3D surveys of the two ancient underground quarries located in the subsurface of the urban area of Cutrofiano over an orthophoto map of the Apulia Region (2006). With yellow dashed lines are showed the inferred prosecution of galleries in the subsurface.

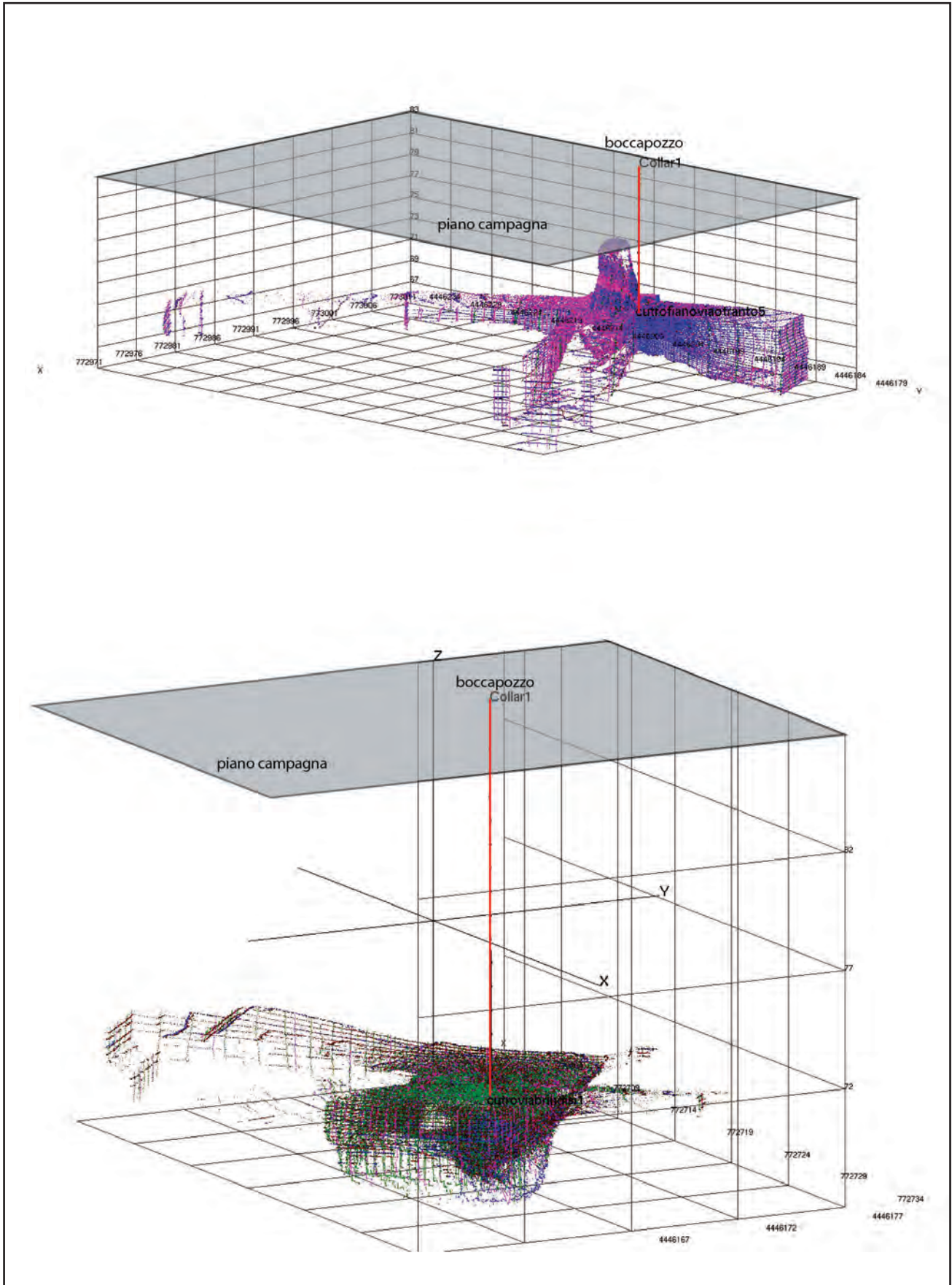


Fig. 6 – Nuvole di punti dei rilievi laser scanner realizzati in via Otranto (A) e in via Brindisi (B).
 – Cloud of points of the two laser scanner surveys performed in Otranto street (A) and Brindisi street (B).

STUDIO GEOLOGICO DOTT. FRANCESCO LIGORI VIA ROMA, 227 Galatina (Lecce)			COMMITTENTE: COMUNE DI CUTROFIANO LOCALITÀ: Via Otranto RICERCA: Sondaggio geognostico Data: 28/06/2013 Quota: 83 m s.l.m.
Profondità dal p.c. (m)	Spessore strati (m)	Stratigrafia	Descrizione
1	1		Materiale di riporto e terreno vegetale
4	3		Sabbie limose giallo-verdastre con noduli calcarei polverulenti biancastri (Depositi marini terrazzati)
6,50	2,50		Limi grigio-verdastri passanti ad argille limose grigio-verdastre con ciottoli e trovanti calcarei (argille subappennine)
9	2,50		Calcarenite grossolana giallastra (varietà "mazzaro" della Calcarenite di Gravina)
13,60	4,60		Cavità
15	1,40		Calcarenite grossolana giallastra (varietà "carparo" della Calcarenite di Gravina)



Fig. 7 – Stratigrafia ricavata dal sondaggio a carotaggio continuo realizzato in via Otranto (LIGORI, 2013). La foto mostra il contatto stratigrafico tra la calcarenite grossolana giallastra poco cementata (carparo o tufo) e la sovrastante calcarenite grossolana ben cementata (mazzaro) visibile in un affioramento nei pressi dell'abitato di Cutrofiano.

– Borehole stratigraphy from the coring drilled in Otranto street (LIGORI, 2013). The picture shows the stratigraphic boundary between the poorly-cemented, coarse-grained calcarenites (carparo or tufo) and the overlying well-cemented coarse-grained calcarenites (mazzaro) in an outcrop close to the town of Cutrofiano.

mento per stabilizzare il piano di calpestio e per realizzare rampe in modo da facilitare il trasporto dei conci di calcarenite con mezzi e animali. La camera più lunga si sviluppa per circa 36 metri in direzione NO, mentre le altre due si sviluppano rispettivamente per circa 30 metri in direzione SO e per circa 12,5 metri in direzione SE. In adiacenza alla camera centrale è stata inoltre rilevata la presenza di una piccola camera. La camera centrale è parzialmente riempita da un cono di detriti accumulati alla base del pozzo di accesso in seguito all'abbandono della cava. La videospesione realizzata con la camera posizionata alla testa del *laser scanner* da foro ha evidenziato che i detriti sono costituiti in prevalenza da frammenti di conci di calcareniti e da rifiuti solidi di vario genere. Osservando le porzioni più distali del rilievo è possibile scorgere la presenza di zone in cui la nuvola di punti sembra interrompersi delineando la possibile presenza di altre gallerie, disposte all'incirca perpendicolarmente a quelle rilevate dal *laser scanner*, oltre il limite dell'area rilevabile. Gli elementi raccolti suggeriscono di estendere le indagini geognostiche verso NO e verso SO al fine di verificare la possibile presenza di gallerie posizionate in zone non coperte dai rilievi. La ricostruzione tridimensionale delle geometrie dell'intradosso della galleria, delle pareti laterali e del pavimento delle cavità è stata realizzata in modo da evidenziare la presenza di elementi che possano indicare l'occorrenza di fenomeni di dissesto in atto (nicchie di

distacco dalla volta, espulsione di materiale dalle pareti dei pilastri ecc.) e di cumuli di materiali sul pavimento riconducibili a crolli parziali. I risultati ottenuti hanno permesso di evidenziare la sostanziale regolarità delle superfici delle pareti laterali e dell'intradosso e l'assenza di cumuli riconducibili a crolli, segno che gli ambienti non hanno subito particolari fenomeni di dissesto.

La cava rilevata nel sottosuolo di via Brindisi si sviluppa a partire dalla profondità di circa 16 metri dal piano campagna e mostra un'estensione areale del rilievo più limitata di quella in via Otranto (v. fig. 5). Il rilievo non ha permesso di individuare il pozzo di accesso alla cava. L'area rilevata consiste in due distinte gallerie che si sviluppano rispettivamente per circa 20,5 metri in direzione SO e per circa 16 metri in direzione SE (v. fig. 6B). Le camere hanno dimensioni e caratteristiche del tutto simili a quelle rilevate nella cava di via Otranto. Tuttavia, contrariamente a quanto osservato nella precedente cava, sono stati individuati due distinti cunicoli lunghi alcuni metri e ampi poco più di un metro probabilmente realizzati per saggiare la qualità del materiale nel settore a nord della cava. Gli elementi raccolti non permettono di escludere che la cava abbia una prosecuzione oltre il limite del rilievo. In particolare, la proiezione in pianta del rilievo suggerisce di programmare nuove indagini geognostiche nel settore posto a SO, in corrispondenza della galleria più lunga, al fine di verificare la possibile presenza di altre gallerie e del pozzo di

accesso alla cava. La ricostruzione delle geometrie delle pareti laterali e dell'intradosso mostra superfici abbastanza regolari che, analogamente a quanto visto per la cava di via Otranto, sembrano suggerire anche per la cava di via Brindisi l'assenza di crolli o di fenomeni d'instabilità in atto lungo le volte e le pareti laterali delle gallerie rilevate.

5. - CONCLUSIONI

La tecnica del rilievo *laser scanner* da foro dimostra una notevole utilità d'impiego in tutti quei casi in cui l'accesso diretto alle cavità è impedito in seguito alla chiusura degli accessi o per la presenza di dissesti in atto che impediscono l'accesso in sicurezza degli speleologi e dei tecnici. L'utilizzo di questa tecnica diventa in tutti questi casi l'unica in grado di rilevare in sicurezza e in un intervallo di tempo relativamente breve la distribuzione plano-altimetrica dei vuoti nel sottosuolo, la geometria tridimensionale degli ambienti ipogei e la presenza di processi di instabilità locale che potrebbero interessare le volte e le pareti laterali delle cavità. Inoltre, questa strumentazione può essere adoperata per effettuare delle scansioni periodiche per monitorare nel tempo lo stato di evoluzione dei dissesti eventualmente presenti e per individuare quelle aree in cui esistono dei fattori che potrebbero evolvere da condizioni di sostanziale stabilità a condizioni instabili. Quest'ultima considerazione è particolarmente vera nei casi in cui le cavità si sviluppano in rocce tenere, come quelle che costituiscono la Calcarenite di Gravina, caratterizzate da proprietà fisiche e meccaniche variabili nel tempo in funzione dell'esposizione dell'ammasso roccioso alle mutevoli condizioni ambientali degli ipogei (temperatura, umidità ecc.). In tal senso, è evidente come la riapertura dei boccapozzi possa rappresentare una azione di prevenzione al manifestarsi di fenomeni di dissesto poiché permette il continuo ricambio e ricircolo d'aria con l'atmosfera mantenendo i parametri ambientali degli ipogei su valori il più possibile costanti. L'apertura dei boccapozzi, individuati nel caso in esame grazie ai rilievi con il *laser scanner* da foro, permetterebbe, qualora ci fossero le opportune condizioni di sicurezza, di fare delle osservazioni dirette sulla presenza di fenomeni di dissesto e di installare strumenti per il monitoraggio ambientale e dinamico.

Analogamente all'ampio impiego che tecniche di rilievo *laser scanner* hanno avuto nella ricostruzione geometrica tridimensionale degli ipogei sia naturali che antropici, anche l'utilizzo del *laser scanner* da foro costituisce uno strumento fondamentale per ricostruire il modello geometrico del sottosuolo. La conoscenza della corretta geometria dei

vuoti permette infatti, note la stratigrafia del sottosuolo e le proprietà geotecniche dei materiali, di implementare dei modelli analitici agli elementi distinti (D.E.M per gli ammassi rocciosi fratturati) o agli elementi finiti (F.E.M. per gli ammassi rocciosi poco fratturati) per la definizione delle condizioni di stabilità delle cavità nel sottosuolo. Lo sviluppo dei modelli analitici, basati sulla conoscenza delle corrette geometrie tridimensionali dei vuoti, rappresenta certamente uno stadio fondamentale nella ricerca applicata alla valutazione della stabilità delle cavità poiché potrà suggerire scelte sempre più ragionate in termini di prevenzione dall'esposizione al rischio per la formazione di voragini in ambienti urbanizzati con conseguenti ricadute positive nella gestione sostenibile del territorio.

BIBLIOGRAFIA

- ANDRIANI G. F., WALSH N. (2002) - *Physical properties and textural parameters of calcarenitic rocks: qualitative evaluations*. Eng. Geol., 67: 5-15
- BARNABA F., CAGGIANO T., CASTORANI A., DELLE ROSE M., DI SANTO A.R., DRAGONE V., FIORE A., LIMONI P.P., PARISE M., SANTALOLA F. (2010) - *Sprofondamenti connessi a cavità antropiche nella regione Puglia*. Atti 2° Workshop Int. "I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato", Roma, 3-4 dicembre 2009, 653-672.
- BUZZANCA L., CAGGIANO T., CASTORANI A., FIORE A., DENORA D., DI SANTO A.R., PALERMO M.T. & PELLEGRINO R. (2009) - *Sistemi di monitoraggio e caratterizzazione di aree a pericolosità geomorfologica molto elevata per la presenza di cavità antropiche in aree urbanizzate dell'Avampese apulo: i casi di Altamura (BA) e Gallipoli (LE)*. Geoitalia 2009, VII Forum Italiano di Scienze della Terra, Rimini 9-11 settembre 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 & Territorio, 4 (2006)/1 (2007): 32-34.
- CAGGIANO T., FIORE A., PALERMO M.T. (2008a) - *Indagini geognostiche finalizzate alla caratterizzazione ed all'attivazione della rete di monitoraggio delle aree in dissesto connesso alla presenza di cavità antropiche nei pressi di via Firenze nell'abitato del Comune di Gallipoli (LE)*. Relazione inedita. Fondi Por-Puglia 2000-2006.
- CAGGIANO T., FIORE A., PELLEGRINO R. (2008b) - *Indagini geognostiche finalizzate alla caratterizzazione ed all'attivazione della rete di monitoraggio delle aree in dissesto connesso alla presenza di cavità antropiche in località "Fornaci-Chiancone" nell'abitato del Comune di Altamura (BA)*. Relazione inedita. Fondi Por-Puglia 2000-2006.
- CHERUBINI C., REINA A. & BRUNO D. (2007) - *Le rocce tenere del Salento: proposta di classificazione con l'uso delle caratteristiche tecniche e meccaniche*. Geologi e Territorio, 2-2007: 37-47.
- CIARANI N., PIERI P. & RICCHETTI G. (1988) - *Note alla carta geologica delle Murge e del Salento (Puglia centro-meridionale)*. Mem. Soc. Geol. It., 41: 449-460.

- 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 Int. "I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato", Roma, 3-4 dicembre 2009, 703-718.
- FIORE A. (2006) - *Pericolosità geologica connessa alla presenza di cavità sotterranee. Atto di indirizzo dell'Autorità di Bacino della Puglia*. Geologi & Territorio, 1-2-3, 3-11.
- FIORE A. & PARISE M. (2012) - *Sprofondamenti connessi a cavità di origine antropica in Puglia*. Geologia dell'Ambiente, 2 (2012): 41-45.
- FIORE A. & PARISE M. (2013) - *Cronologia degli eventi di sprofondamento in Puglia, con particolare riferimento alle interazioni con l'ambiente antropizzato*. Mem. Descr. Carta Geol. D'It, 93: 239-252.
- LIGORI F. (2013) - *Relazione geologica e geofisica inedita sulla presenza di cavità di origine antropica nel sottosuolo del centro abitato di Cutrofiano*. Comune di Cutrofiano.
- MAINARDI M. (1999) - *Cave e cavamonti*. FENEAL-UIL Lecce, Edizioni Del Grifo, 135 pp.
- MARTINIS B. (1962) - *Lineamenti strutturali della parte meridionale della Penisola Salentina*. Geologica Romana, 1: 11-23.
- MENEGATTI S. & TONI L. (1970) - *Coltivazione di tufo calcareo in sotterraneo nel comune di Cutrofiano in provincia di Lecce*. Terra d'Otranto, Lecce, XXIV, n. 10-11, 21-43, n. 12, 19-36.
- 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, 441-447.
- PIERI, P., FESTA, V., MORETTI, M., & TROPEANO, M. (1997) - *Quaternary tectonic of the Murge area (Apulian foreland southern Italy)*. Annali di Geofisica, 40(5): 1395-1404.
- PARISE M. (2011) - *Alcune considerazioni sulle cave sotterranee in Puglia e sulle relative problematiche*. VII Convegno Nazionale di Speleologia in Cavità Artificiali, Urbino, 4-8 dicembre 2010, Opera Ipogea, 1/2: 217-224.
- TONI L. (1990) - *Le cave in sotterraneo di Cutrofiano*. Edizioni Del Grifo, 125 pp.
- TROPEANO M., SPALLUTO L., MORETTI M., PIERI P., SABATO L., (2004) - *Depositi carbonatici infrapleistocenici di tipo foramol in sistemi di scarpata (Salento - Italia meridionale)*. Il Quaternario, 17 (2): 537-546.
- TONI L., QUARTULLI S. (1986) - *Coltivazione di calcareniti in sotterraneo nel comune di Cutrofiano (Lecce)*. Quarry and Construction, 23-26.