

## LA VOLTA DELLA GROTTA SOTTO CA' CASTELLINA: UNA RICOSTRUZIONE CON IL LASER SCANNER

STEFANO FABBRI<sup>1</sup>, TOMMASO SANTAGATA<sup>2</sup>, VERONICA CHIARINI<sup>3</sup>,  
ANDREA COLUMBU<sup>4</sup>, JO DE WAELE<sup>5</sup>, LUCA PISANI<sup>6</sup>

### Riassunto

La Grotta sotto Ca' Castellina è una piccola cavità nei Gessi di Monte Mauro che si apre sul fondo della dolina omonima. La sua principale caratteristica è quella di svilupparsi come un'unica galleria lunga 50 metri, larga fino a 10 metri ed alta 3-4 m, il cui fondo è pianeggiante. La volta, anch'essa perfettamente pianeggiante, è caratterizzata da un reticolo di canali di volta e pendenti di rara bellezza. Il facile accesso alla grotta, unito alla comodità degli ambienti, ha permesso di effettuare un rilievo con il laser scanner per cercare di ricostruire la morfologia e, conseguentemente, la genesi dei canali di volta. Il lavoro di ricostruzione 3D dell'ambiente sotterraneo ha evidenziato tre generazioni di canali di volta, il loro andamento, e le loro variazioni morfologiche. Questo studio, ancora una volta, mette in luce la grande utilità dei rilievi con il laser scanner in ambiente sotterraneo.

**Parole chiave:** telerilevamento, morfometria, erosione antigravitativa, grotta nei gessi, speleogenesi.

### Abstract

*Ca' Castellina Cave is a small gypsum cave in Mt. Mauro area (Vena del Gesso romagnola, Northern Italy) that has its entrance on the bottom of a doline. Its main characteristic is the fact that it develops as a main 50 metres long passage, up to 10 metres wide and 3-4 metres high, with a perfectly flat floor. Also the roof is perfectly flat and characterised by a network of beautiful ceiling channels and pendants. The easy access to the cave, and its easy passages, have allowed to carry out a survey with laser scanner to reconstruct the morphologies and, in consequence, the genesis of the ceiling channels. The 3D reconstruction of the underground environment has evidenced the presence of three generations of ceiling channels, their development and their morphological changes along their path. This study, once more, confirms the great advantages of laser scanning techniques in the morphological survey of subterranean environments.*

**Keywords:** Remote Sensing, Morphometry, Antigravitative Erosion, Gypsum Cave, Speleogenesis.

<sup>1</sup> Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali, Via Zamboni 67, 40126 Bologna (BO) - stefano.fabbri21@unibo.it

<sup>2</sup> VIGEA - Virtual Geographic Agency, Reggio Emilia - tommy.san84@gmail.com

<sup>3</sup> Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali, Via Zamboni 67, 40126 Bologna (BO) - vero.ch88@hotmail.it

<sup>4</sup> Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali Via Zamboni 67, 40126 Bologna (BO) - andrea.columbu2@unibo.it

<sup>5</sup> Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali, Via Zamboni 67, 40126 Bologna (BO) / Istituto Italiano di Speleologia, Via Zamboni 67, 40126 Bologna (BO) - jo.dewaele@unibo.it

<sup>6</sup> Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali, Via Zamboni 67, 40126 Bologna (BO) / Istituto Italiano di Speleologia, Via Zamboni 67, 40126 Bologna (BO) - lucapiso94@gmail.com

## Introduzione

Da diversi anni, il laser scanner viene utilizzato sempre più spesso per realizzare rilievi di cavità naturali per scopi scientifici, grazie soprattutto allo sviluppo di nuovi strumenti e tecnologie per il rilievo tridimensionale che oggi risultano sempre più accessibili sia in termini di costo che per l'utilizzo in grotta.

Uno dei vantaggi principali dell'utilizzo del laser scanner rispetto ad altri strumenti normalmente utilizzati in ambito speleologico riguarda la possibilità di acquisire in poco tempo grandi quantità di dati metrici che possono essere utilizzati ed analizzati successivamente per diverse finalità, principalmente per scopi scientifici e divulgativi. Ma, nella maggior parte dei casi, l'utilizzo di questi strumenti in grotta è limitato solo al rilievo di parti facilmente accessibili. Molto spesso, alcuni fattori, come la presenza di pozzi verticali, strettoie o fiumi sotterranei, può rappresentare un ostacolo insormontabile per il loro utilizzo.

Il rilievo con il laser scanner, di fatto, permet-

te di ottenere milioni di misure dell'ambiente circostante (cioè una "nuvola di punti" a 360°) da cui è possibile ricavare successivamente modelli digitali e altri tipi di analisi. Ogni punto acquisito presenta infatti coordinate spaziali e informazioni sulle caratteristiche fisiche dell'oggetto rilevato, dati molto importanti che possono essere analizzati attraverso *software* che permettono di costruire modelli tridimensionali ed effettuare misure morfometriche (FABBRI *et alii* 2017).

Nella Vena del Gesso romagnola, rilievi con laser scanner sono stati effettuati in precedenza nelle Grotte del Re Tiberio (MIARI *et alii* 2013) e in quella della Lucerna (SANTAGATA *et alii* 2015), principalmente per motivi archeologici e/o didattici-divulgativi. In questo lavoro mostriamo i risultati dei rilievi realizzati con laser scanner nella piccola Grotta sotto Ca' Castellina, nei Gessi di Monte Mauro (fig. 1). Lo scopo è di ricostruire in dettaglio la volta di questa grotta, decorata da un insieme di pendenti e canali di volta peculiari, per trarre informazioni sulla speleogenesi di questa cavità (COLUMBU *et alii* 2018).

Fig. 1 – Il FARO laser scanner in una fase di rilievo dentro la Grotta sotto Ca' Castellina (foto P. Lucci).





Fig. 2 – Visione verso NW dell’ambiente principale della Grotta sotto Ca’ Castellina. Si notano il pavimento e il soffitto piatti, sedimenti che riempivano la galleria fino alla volta, e le varie generazioni di canali di volta e di pendenti. Anche il solco laterale a sinistra indica una precedente fase di erosione laterale (foto P. Lucci).

### *La volta della Grotta sotto Ca’ Castellina*

La grotta si apre sul fondo della dolina sotto la località omonima, con un ingresso disostruito ed ingabbiato da Baldo Sansavini (gabbie di ferro e lamiera di plastica rigida). In circa 7 metri si raggiunge un’ampia galleria, larga circa 10 metri ed alta 3-4, che si percorre agevolmente per una quarantina di metri in direzione NW. Il fondo è orizzontale, coperto di fango, ma la caratteristica più interessante è la volta. Questa è più o meno pianeggiante, solcata da una miriade di canali di volta dalle dimensioni da centimetriche a decimetriche (fig. 2). Tale superficie è stata incisa dai canali di volta a più riprese, come deducibile sia da gradini morfologici visibili ad occhio nudo, sia dai resti di sedimenti che riempivano i canali e i solchi laterali. Del resto, buona parte del sedimento, generalmente argilloso ma anche costituito da ciottoli immersi in una matrice fine, è ancora presente in tutta la grotta, tanto da costringere a procedere sdraiati, seguendo la volta della grotta, per raggiungere la sala finale. In quest’ultima, tondeggiante, si può ap-

prezzare uno spessore dei sedimenti di almeno 5 metri, anche se il suo limite verso il basso non è stato definito.

Questo soffitto piatto, e di conseguenza la galleria che delimita, si sviluppa tra due interstrati, inclinati di quasi 70° verso NE, per uno spessore del banco gessoso di circa 18 metri.

### *Il lavoro con il laser scanner*

Per realizzare il rilievo tridimensionale delle parti più accessibili della Grotta sotto Ca’ Castellina è stato utilizzato un laser scanner FARO modello CAM2 Focus<sup>3D</sup>, che pesa circa 5 kg e risulta essere abbastanza agevole da utilizzare in grotta, con un raggio laser che può raggiungere fino a 100 metri. Per questo lavoro, lo strumento è stato impostato per ottenere misure con una distanza media tra i punti di circa 7 mm ad una distanza di 10 metri ed una velocità di scansione di 244 mila punti al secondo in un tempo di circa 3 minuti per singola scansione. Per ottenere questa accuratezza (e facilitare le operazioni di allineamento), oltre al laser lo

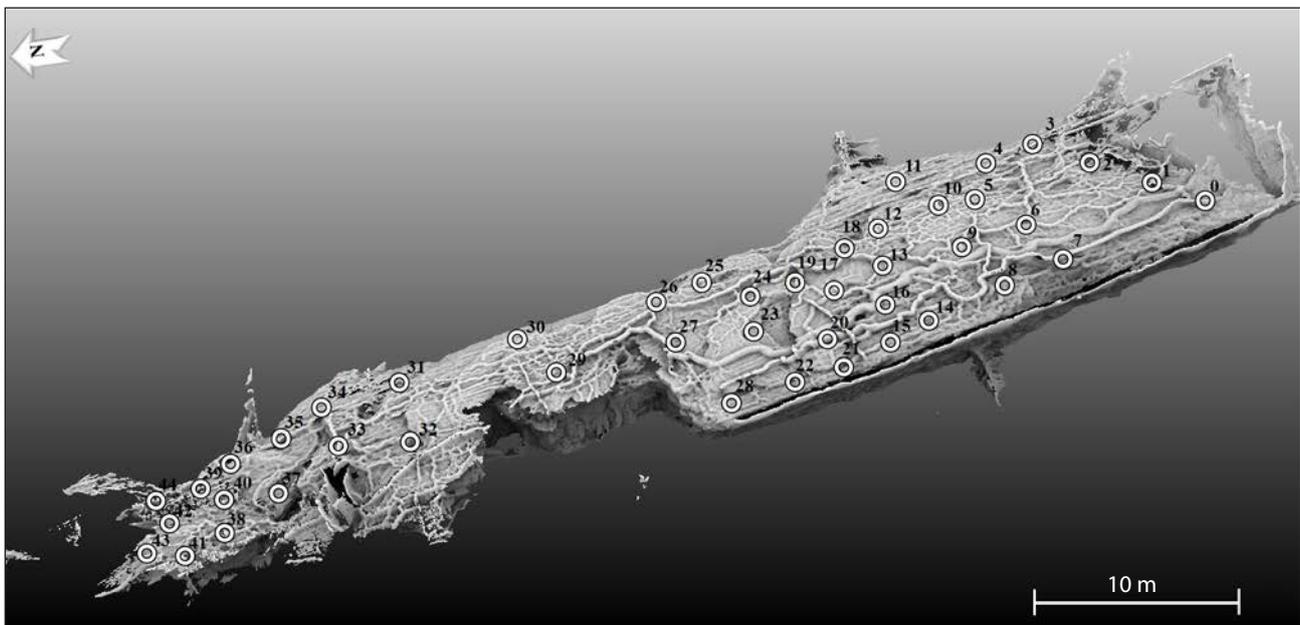


Fig. 3 – Modello della Grotta sotto Ca' Castellina ottenuto dal laser scanner con segnate le 44 stazioni di misura.

strumento è equipaggiato con altri sensori quali inclinometro, barometro, bussola elettronica, e compensatore biassiale. Le scansioni sono state effettuate in 44 stazioni diverse, mediamente distanziate tra loro di qualche metro (fig. 3), utilizzando dei target sferici di circa 14 cm di diametro distribuiti lungo la grotta per facilitare le operazioni di allineamento delle scansioni e ottenere una precisione maggiore.

#### *Elaborazione dei dati*

Una volta terminata la fase di rilievo in grotta, i dati acquisiti sono stati processati ed elaborati con diversi *software*. Il primo passaggio ha riguardato l'allineamento delle singole scansioni attraverso il *software* "SCENE" (operazione facilitata grazie al riconoscimento automatico dei *target* utilizzati in fase di rilievo). L'elaborazione e le analisi dei dati sono state realizzate utilizzando il *software open source* Cloudcompare<sup>v2</sup>, che grazie a diverse funzioni mette a disposizione strumenti molto utili per classificare le nuvole di punti a seconda di diversi parametri e realizzare analisi morfometriche, evidenziando i dati attraverso scale di colore e di intensità. Altre funzioni/elaborazioni consentono di esaltare alcune particolari caratteristiche dell'ambiente circostante e dei suoi materiali, come ad esempio la rugosità (*roughness*), o la percezione delle linee di spar-

tiacque (*ridges*), e, quindi, avere un'idea del verso e del modulo del deflusso totale (fig. 4).

#### *Discussione*

#### Paragenesi della Grotta sotto Ca' Castellina: tempi e significato paleoclimatico

Nelle aree gessose dell'Emilia-Romagna, i livelli superiori (cioè i più vecchi) dei sistemi carsici possono essere facilmente smantellati dall'abbassamento della superficie topografica, a causa del sollevamento rapido della catena appenninica e dell'alta solubilità del gesso (DE WAELE *et alii* 2017). Al contrario, la Grotta sotto Ca' Castellina (270 m s.l.m.) è un esempio di un tratto orizzontale residuo, sospeso oltre 100 metri al di sopra dell'attuale livello di base (dato dalla Risorgente del Rio Basino, a circa 160 m s.l.m.). La sua età è sconosciuta, ma paragonata al vicino sistema carsico del Re Tiberio, dove si ritiene che si siano formati livelli di grotte orizzontali a 100 e 135 metri sopra il Torrente Senio durante i periodi freddi corrispondenti rispettivamente a MIS5b e 5d (COLUMBU *et alii* 2015), è ragionevole presumere che la Grotta sotto Ca' Castellina si sia formata almeno 100 mila anni fa. La formazione e l'evoluzione speleogenetica delle grotte in quest'area sono fortemente legate agli impulsi climatici avvenuti nel corso

del tardo Quaternario che controllavano l'evoluzione dei principali corsi d'acqua, e di conseguenza il livello di base delle grotte ad esso afferenti. I fiumi tendono a scavare il proprio letto durante le fasi di raffreddamento, dopo periodi caldi, fino a raggiungere un nuovo livello di base. Le grotte seguono rapidamente, abbandonando i livelli alti e raggiungendo il livello del fiume esterno. I tratti sub-orizzontali delle cavità si sono formati quindi durante le fasi di stabilità del livello dei fiumi esterni, quando nelle grotte l'acqua scorreva a livello di base e le relative condotte fungevano così da classici collettori sotterranei epigenetici (KLIMCHOUK 2000; CALAFORRA, PULIDO-BOSCH 2003). L'ampliamento delle condotte continua fino al relativo picco freddo (cioè fasi glaciali o stadiali) (COLUMBU *et alii* 2015). Durante il periodo più freddo (attorno al picco glaciale) c'è grande disponibilità di sedimenti, e negli alvei dei fiumi esterni si accumulano dei depositi terrazzati, anche per spessori di 4-5 metri. In risposta a questo innalzamento dei letti fluviali esterni, anche nelle grotte si depositano sedimenti, innescando quindi fenomeni di paragenesi su un analogo spessore (4-5 metri) nella maggior parte delle grotte di gesso della regione (DE WAELE *et alii* 2017). Nella Grotta sotto Ca' Castellina i segni di queste alluvioni sono visibili anche sotto forma di anse laterali che si rinvergono fino a 1 metro sotto il soffitto e in alcuni punti contengono ancora

ciottoli incorporati in una matrice argillosa. Sebbene i volumi della grotta non possano essere calcolati con precisione, poiché il pavimento è coperto da sedimenti, è plausibile che lo spessore dei depositi possa essere di circa 5 metri. I canali di volta e i pendenti sono tuttavia una prova abbastanza chiara di un massiccio alluvionamento. Si sono infatti formati durante l'innalzamento del livello di base, quando i riempimenti delle grotte hanno gradualmente forzato lo scorrimento delle acque verso l'alto, innescando a un certo punto l'erosione paragenetica del tetto (PASINI 2009) in condizioni epifreatiche (o freatiche).

Un calcolo diretto della durata di questo processo è impossibile, ma va sottolineato che i depositi dei terrazzi fluviali in superficie si sono formati in circa 5000 anni, di conseguenza la paragenesi probabilmente è stata attiva durante questo lasso di tempo. Inoltre, la morfologia 2D e 3D dei canali di volta indica che il flusso nella grotta deve essere stato piuttosto moderato e tale quindi da consentire alla sedimentazione di prevalere sull'asportazione dei sedimenti stessi, questo in analogia con il comportamento dei tratti intrecciati dei corsi d'acqua superficiali (*braiding rivers*). L'esempio dei canali anastomizzati in superficie è utile per comprendere la morfologia del soffitto di questa grotta che deriva da un elevato rapporto portata solida/portata liquida del piccolo torrente sotterraneo. Durante i climi freddi, a causa dell'assenza di

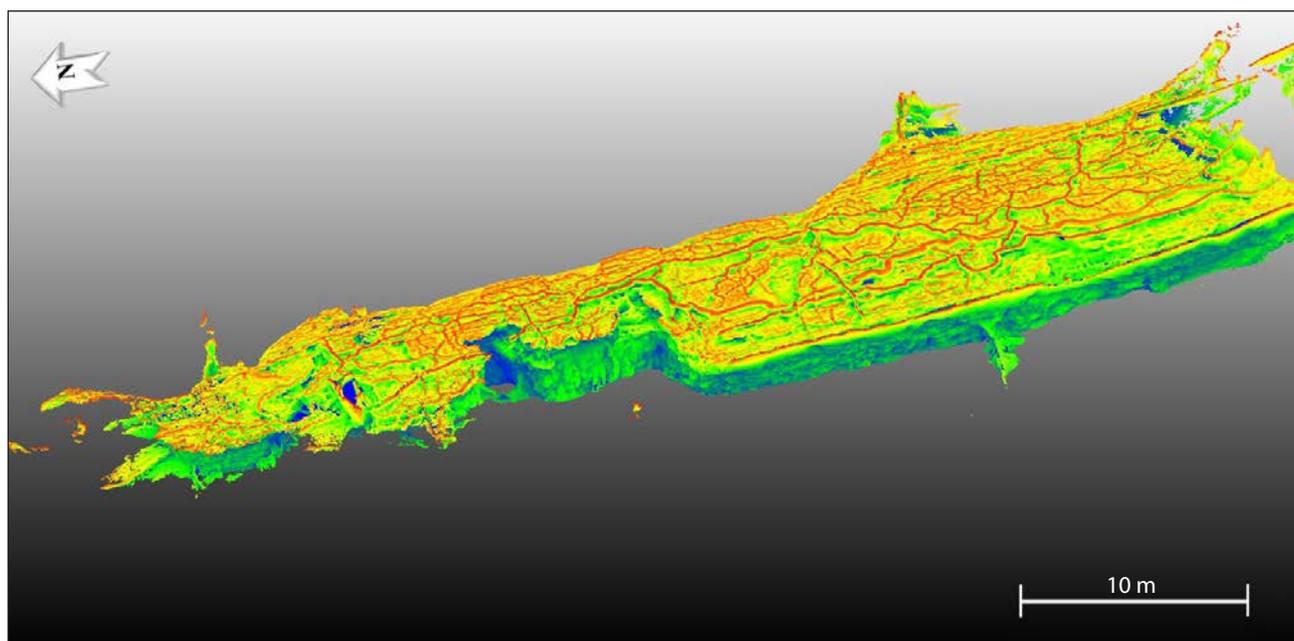


Fig. 4 – La volta della grotta in modalità PCV implementato da EDL mette in evidenza i canali di volta (in rosso), che contrastano con il verde-giallo dei pendenti.

vegetazione, i corsi d'acqua abbondano di sedimenti che sono trasportati e depositati nelle condotte e l'acqua scorre sopra di essi. Le precipitazioni sono però scarse a causa del clima secco e freddo, così i flussi superficiali e sotterranei delle acque sono limitati.

Pertanto, l'erosione paragenetica molto probabilmente si è sviluppata tra il picco di uno stadio freddo prima di 100 ka e il successivo rapido cambiamento climatico verso condizioni più calde e più umide. Questa fase climatica transitoria si svolge in un arco di tempo inferiore a 8000 anni nel Mediterraneo, come si nota ad esempio durante il passaggio dal MIS glaciale 6 al periodo interglaciale MIS 5e (DRYSDALE *et alii* 2005), o in oscillazioni climatiche più corte che caratterizzano il MIS 5d (COLUMBU *et alii* 2017). Il processo si è interrotto a causa della diminuzione del rapporto solido/liquido dell'acqua, probabilmente anche prima che fossero ristabilite le condizioni interglaciali (o interstadiali).

Inoltre, il grande pendente nell'ultima stanza della grotta mostra che questo alluvionamento si è verificato piuttosto rapidamente, non permettendo che il gesso si dissolvesse completamente e proteggendolo dalla dissoluzione dai sedimenti a grana fine che si depositano verso l'alto. Considerando che l'area è interessata da un tasso medio di sollevamento di 1 mm/anno da 150 ka BP, il riempimento delle grotte deve essere stato di almeno 2 mm/anno, se 5 metri di sedimenti sono stati depositati in circa 5.000 anni. Questo è da considerare un tasso medio, perché i nostri risultati suggeriscono che il riempimento della grotta si sia verificato non in maniera graduale, bensì come fenomeno impulsivo. In effetti, tre generazioni di canali di volta e le mensole laterali mostrano che questa sedimentazione si è arrestata almeno tre volte; in questi casi l'allargamento laterale ha prevalso sull'erosione e/o sulla dissoluzione verso l'alto.

Il primo piano di alluvionamento si trovava a circa un metro sotto l'attuale tetto della grotta, con pendenti in parte ancora conservati ai lati della condotta.

Dopo questa pausa nella sedimentazione, una seconda fase di riempimento ha portato ancora mezzo metro di sedimento nella grotta, intagliando la rete anastomizzata di piccoli canali di volta che sono ancora visibili sul tetto. Una seconda importante generazione di canali di volta, composta dai tre canali più grandi

(fig. 5), si è verificata durante un periodo in cui la sedimentazione ha causato la dissoluzione del gesso verso l'alto in un intervallo verticale di 30 cm.

Una rete di canali più piccoli, scolpiti per ulteriori 30 cm verso l'alto, è ciò che rimane dell'ultimo episodio paragenetico. La conservazione dei canali inferiori anastomizzati indica un periodo di riempimento rapido, in cui questi canali sono stati scolpiti e immediatamente protetti dai sedimenti fini che si sono accumulati dentro. Il flusso si è poi concentrato lungo i tre canali principali, probabilmente determinati da un aumento della portata, comunque caratterizzata da basse velocità e minore sedimentazione. A questo ha poi fatto seguito un nuovo episodio di riempimento, sotto un regime di portata inferiore, che ha scolpito gli ultimi canali di volta più alti.

Finalmente il livello dell'acqua si abbassa e la cavità viene gradualmente, ma solo in parte, svuotata dai sedimenti.

#### Influenza geologica e speleogenetica sulla morfologia dei canali del tetto

La grotta si sviluppa in un banco decametrico di gesso di un singolo ciclo evaporitico, delimitato a NE e SW da strati di 1 m di spessore di marne. L'acqua in questa grotta scorreva da SE a NW (cioè dall'ingresso verso il fondo della grotta, come evidenziato dall'inclinazione dei canali di volta). L'orientamento dei canali di volta segue le direzioni appenninica (NW-SE) e antiappenninica (NE-SW), e subordinatamente N-S ed E-W. La tendenza generale, tuttavia, è principalmente controllata dalla direzione di stratificazione e riflette il confinamento tra i due letti marnosi. Quando la direzione del flusso nel canale incontra una discontinuità aperta formando un angolo basso (circa  $<20^\circ$ ), l'acqua tende a seguire la debolezza strutturale; mentre, quando il flusso è perpendicolare alla discontinuità, l'acqua sembra ignorare tali direzioni, tagliando dritto attraverso il piano strutturale (fig. 6). Altri importanti elementi che controllano lo sviluppo dei canali sono le vene riempite da *cluster* di gesso secondario, sempre osservati in un ambiente "en-echelon".

Queste vene (di gesso a grandi cristalli) sono generalmente meno solubili dei cristalli di gesso più piccoli, quindi, quando queste vene sono

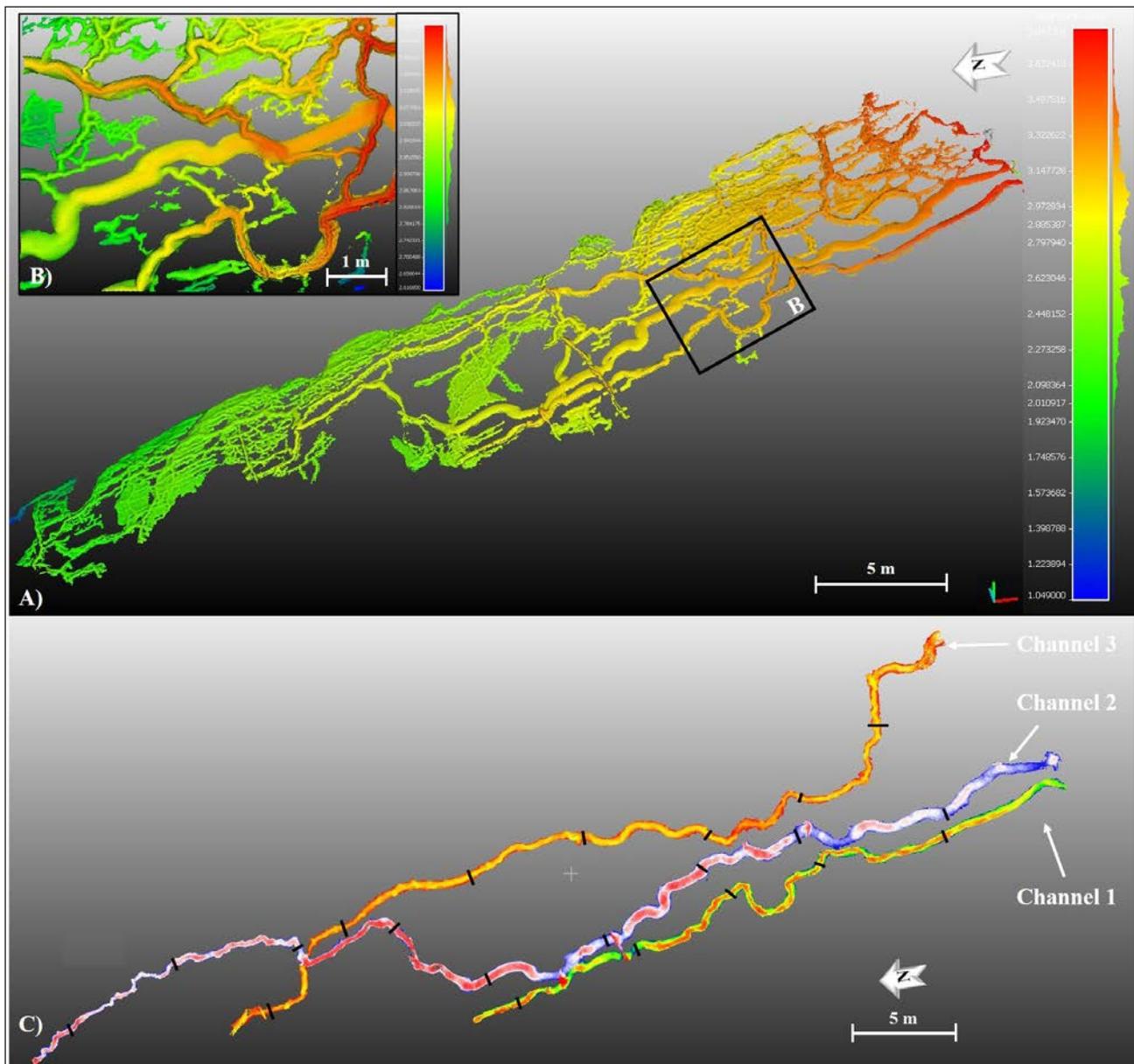


Fig. 5 – A) visione complessiva dei principali canali che compongono la rete; B) visione di una parte del soffitto nella parte iniziale della galleria, in cui si vedono bene tre generazioni diverse di canali (colori rosso, giallo e verde) e la loro generale pendenza verso NW (sinistra); C) canali 1, 2 e 3. Le barre verticali lungo i canali sono posizionate ogni 5 m misurate lungo le creste dei canali.

abbastanza spesse ( $> 10$  cm), rappresentano una barriera che obbliga il flusso a cambiare direzione. Esempi si possono osservare nei tratti finali della grotta, dove il canale di volta principale cambia direzione, controllato da un insieme di vene con orientamento NE-SW. Anche le differenti generazioni di canali di volta non sembrano seguire la direzione dei canali precedenti, poiché spesso tagliano questi ultimi con angoli molto netti. Ciò probabilmente riflette il fatto che la sedimentazione si è verificata rapidamente, proteggendo le morfolo-

gie già formate, e che il flusso d'acqua è stato guidato maggiormente dalle irregolarità nella volta di gesso che separava i canali già in posto. I soffitti dei canali di volta mostrano un andamento piuttosto ondulato, con repentini cambi di direzione pur con tendenza in genere discendente verso il fondo della grotta. Anche i canali di volta sembrano essere influenzati dalla dimensione dei cristalli di gesso. I più grandi canali sono per lo più scolpiti nella parte macrocristallina dello strato gessoso (vedi i primi 8 m dalla parete meridionale),

mentre la parte settentrionale (microcristallina) è caratterizzata da una rete più densa di canali più piccoli, associati a pendenti.

La distribuzione verticale delle generazioni di canali di volta, d'altra parte, è molto chiara. Questo accatastamento verso l'alto di canali scolpiti mostra chiaramente i processi paragenetici che si sono verificati gradualmente, con episodi di alluvione che si sono verificati abbastanza rapidamente in modo tale da consentire ai canali di volta precedenti di essere preservati dai sedimenti del riempimento. La dimensione della sezione trasversale dei singoli canali, d'altra parte, è un riflesso della quantità di acqua che li scolpisce: quelli più grandi sono infatti generati da portate maggiori.

Infine, l'analisi della rugosità nei modelli 3D consente chiaramente di distinguere le pareti di gesso levigate dalla dissoluzione in condizioni freatiche (paragenesi) con acqua a flusso lento da quelle caratterizzate da formazione secondaria di gesso (cristalli) a seguito di processi di dissoluzione da condensa. La condensazione avviene preferibilmente sulle parti più alte della volta, dove l'aria più calda e umida viene a contatto con la roccia di gesso più fredda. Le acque di condensazione sciolgono i cristalli di gesso e scorrono con flusso

laminare verso il basso, raggiungendo le parti sporgenti del tetto dove domina l'evaporazione. Questo causa la deposizione di cristalli di gesso secondario soprattutto sui bordi inferiori dei pendenti. È curioso notare i canali di volta più piccoli che modellano la volta dei canali 1 e 3 (quelli di dimensioni medie, essendo il 2 il canale più grande). Questi canali meandreggianti hanno una rugosità più elevata rispetto ai canali più grandi in cui sono scolpiti (fig. 7). Ciò potrebbe essere spiegato dalla condensa che causa una dissoluzione differenziale dei cristalli di gesso sul tetto (e quindi una maggiore rugosità).

### Conclusioni

La Grotta di Ca' Castellina è una cavità la cui condotta principale ha uno sviluppo di circa 100 m ed andamento suborizzontale, caratterizzata da un soffitto scolpito da una rete di canali di volta e pendenti antigravitativi. Un rilievo è stato effettuato con un laser scanner Faro CAM2 utilizzando 44 stazioni di scansione. La post-elaborazione delle nuvole di punti 3D ha permesso di quantificare le dimensioni, la direzione e la morfologia di questi canali e dei pendenti residui. Diverse elaborazioni

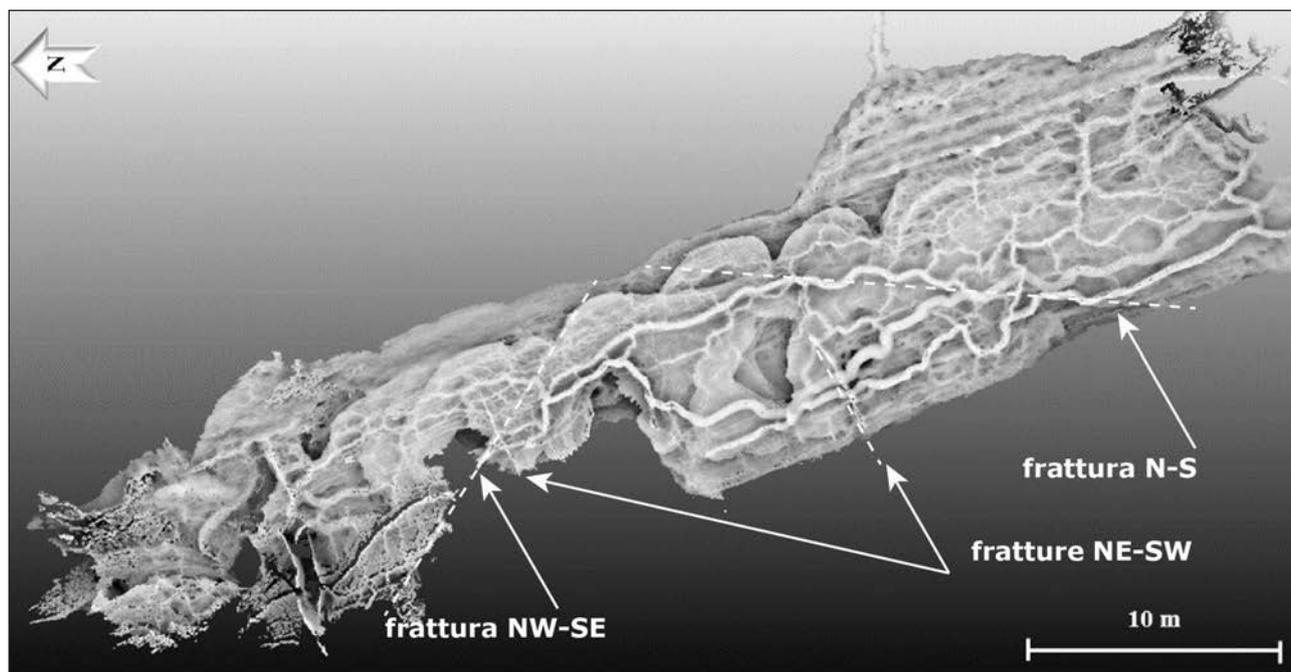


Fig. 6 – Modello della grotta (modalità PCV) in cui sono particolarmente ben evidenti, oltre ai canali, anche le varie discontinuità come la stratificazione (NW-SE, parallela alla galleria), fratture N-S e WNW-ESE che deviano l'andamento dei canalini di volta e le fratture NE-SW (antiappenniniche) che invece non influenzano la direzione dei canali di volta.

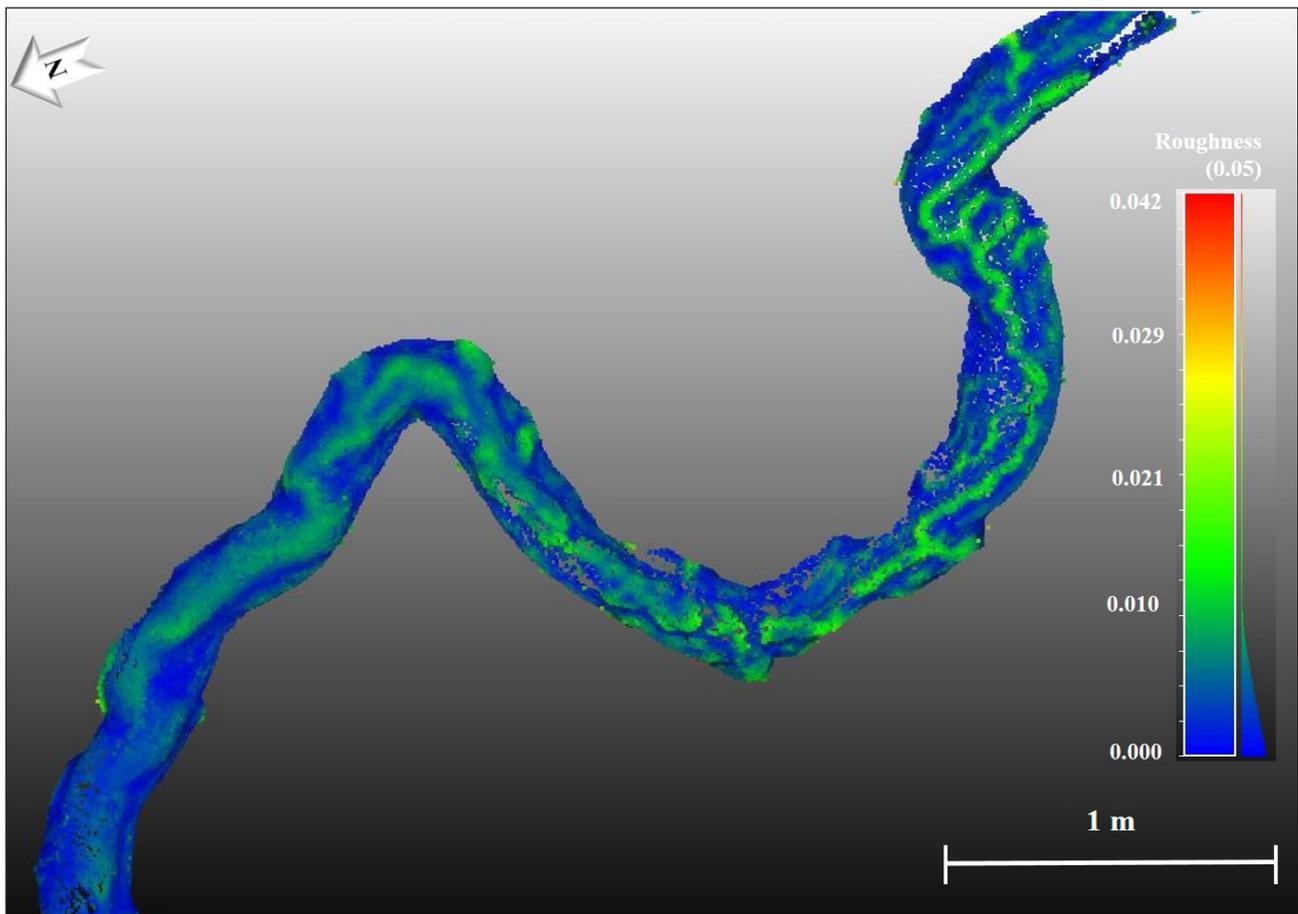


Fig. 7 – Dettaglio di uno dei canali grandi con visibile al suo interno un canalicolo, evidenziato dal suo più elevato grado di rugosità (colore verde).

(PCV, visione EDL, modelli 3D e 2D, analisi della rugosità, ecc.) hanno consentito di evidenziare aspetti distinti dei canali di volta e dei pendenti.

Il rilievo con laser scanner si è rivelata una tecnica potente per determinare e misurare le macro-, meso- e micro-morfologie in ambienti geomorfologici difficili, in questo caso una cavità relativamente piccola nel gesso. Questo studio mostra il potenziale di questo metodo per studi morfometrici dettagliati.

Questo studio ha permesso di distinguere almeno cinque fasi evolutive nello sviluppo della grotta:

1. formazione di un ampio vuoto nello strato di gesso fortemente inclinato, vicino alla falda freatica e confinato lateralmente da due interstrati marnosi;
2. alluvione e dissoluzione verso l'alto del tetto della grotta mediante erosione paragenetica su un intervallo verticale di almeno 1 m, seguito da un arresto in sedimentazione;
3. ulteriore dissoluzione verso l'alto in risposta

- all'alluvione in tre fasi successive (per spessori di sedimenti di 50, 30 e di nuovo 30 cm), con graduale diminuzione della portata;
4. abbassamento della falda freatica e contemporanea erosione del flusso sotterraneo, che ha svuotato progressivamente parte della grotta dai sedimenti precedentemente depositati;
5. stadio finale della dissoluzione per condensazione, in particolare sulle superfici superiori del tetto della cavità, e deposizione di cristalli di gesso secondari sui pendenti sporgenti per evaporazione.

## Bibliografia

- J.M. CALAFORRA, A. PULIDO-BOSCH 2003, *Evolution of the gypsum karst of Sorbas (SE Spain)*, "Geomorphology" 50, 1-3, pp. 173-180.
- A. COLUMBU, J. DE WAELE, P. FORTI, P. MONTAGNA, V. PICOTTI, E. PONS-BRANCHU, J. HELL-

- STROM, P. BAJO, R. DRYSDALE 2015, *Gypsum caves as indicators of climate-driven river incision and aggradation in a rapidly uplifting region*, "Geology" 43, 6, pp. 539-542.
- A. COLUMBU, R. DRYSDALE, E. CAPRON, J. WOODHEAD, J. DE WAELE, L. SANNA, J. HELLSTROM, P. BAJO 2017, *Early last glacial intra-interstadial climate variability recorded in a Sardinian speleothem*, "Quaternary Science Reviews" 169, pp. 391-397.
- A. COLUMBU, S. FABBRI, V. CHIARINI, T. SANTAGATA, J. DE WAELE 2018, *Laser scanning and 3D printing of Ca' Castellina cave ceiling (North Italy): a novel approach to visualize and better understand antigravitative morphologies*, "Geophysical Research Abstracts" 20, EGU2018-8362, (<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/EGU2018-8362.pdf>).
- J. DE WAELE, S. FABBRI, T. SANTAGATA, V. CHIARINI, A. COLUMBU, L. PISANI c.s., *Geomorphological and speleogenetical observations using terrestrial laser scanning and 3D photogrammetry in a gypsum cave (Emilia-Romagna, N-Italy)*, "Geomorphology".
- J. DE WAELE, L. PICCINI, A. COLUMBU, G. MADONIA, M. VATTANO, C. CALLIGARIS, I.M. D'ANGELI, M. PARISE, M. CHIESI, M. SIVELLI, B. VIGNA, L. ZINI, V. CHIARINI, F. SAURO, R.N. DRYSTALE, P. FORTI 2017, *Evaporite karst in Italy: a review*, "International Journal of Speleology" 46, 2, pp. 137-168.
- R.N. DRYSDALE, G. ZANCHETTA, J. HELLSTROM, A.E. FALICK, J. ZHAO 2005, *Stalagmite evidence for the onset of the Last Interglacial in southern Europe at  $129 \pm 1$  ka*, "Geophysical Research Letters" 32, pp. 1-4.
- S. FABBRI, F. SAURO, T. SANTAGATA, G. ROSSI, J. DE WAELE 2017, *High-resolution 3-D mapping using terrestrial laser scanning as a tool for geomorphological and speleogenetical studies in caves: An example from the Lessini mountains (North Italy)*, "Geomorphology" 280, pp. 16-29.
- A.B. KLIMCHOUK 2000, *Speleogenesis in noncarbonate lithologies*, in A.B. KLIMCHOUK, D.C. FORD, A.N. PALMER, W. DREYBRODT (Eds.), *Speleogenesis, evolution of karst aquifers*, Huntsville, pp. 430-442.
- M. MIARI, C. CAVAZZUTI, L. MAZZINI, C. NEGRINI, P. POLI 2013, *Il sito archeologico del Re Tiberio*, in M. ERCOLANI, P. LUCCI, S. PIASTRA, B. SANSAVINI (a cura di), *I Gessi e la cava di Monte Tondo. Studio multidisciplinare di un'area carsica nella Vena del Gesso romagnola*, (Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, s. II, vol. XXVI), Faenza, pp. 375-402.
- G. PASINI 2009, *A terminological matter: Paragenesis, antigravitative erosion or antigravitational erosion?*, "International Journal of Speleology" 38, pp. 129-138.
- T. SANTAGATA, S. LUGLI, M.E. CAMORANI, M. ERCOLANI 2015, *Laser scanner survey and TruView application of the Grotta della Lucerna, a roman mine for lapis specularis*, in *Proceedings of the International Congress of Speleology in Artificial Cavities*, (Rome, March 11<sup>th</sup>-17<sup>th</sup>, 2015), Rome, pp. 143-147.