

Le cave Romane di Lapis Specularis della Vena del Gesso Romagnola (Ravenna, Italia)

Giovanni Belvederi ^{1, 2, 4}, Massimo Ercolani ^{1, 3}, Maria Luisa Garberi ^{1, 2, 4}
Piero Lucci ^{1, 3}, Garibaldi (Baldo) Sansavini ^{1, 3}

Riassunto

Il lavoro presenta lo studio effettuato dalla Federazione Speleologica dell'Emilia-Romagna sulle cave di epoca romana di Lapis Specularis, scoperte nell'area della Vena del Gesso (Emilia-Romagna, Italia). Il lavoro presenta la ricostruzione tridimensionale di una di queste cave, Cà Toresina, effettuata attraverso il metodo fotogrammetrico.

Parole chiave: Lapis Specularis, cava, epoca romana, fotogrammetria, Vena del Gesso, Emilia-Romagna, Italia.

Abstract

The Roman quarries of Lapis Specularis in the Vena del Gesso Romagnola (Ravenna, Italy)

The paper presents the discovery of Lapis Specularis quarries in the Vena del Gesso area (Emilia-Romagna, Italy). These quarries are from roman age and are characterized by many man-made traces of digging tools and some archeological materials. The paper presents also the methodology used for the three-dimensional reconstruction of the roman quarry Cà Toresina through the photogrammetry 3D. Using the software Agisoft Photoscan and copious sets of photos it is possible to construct an accurate 3D model useful to divulgation and scientific research.

Key words: Lapis Specularis, Roman quarry, photogrammetry, Vena del Gesso, Emilia-Romagna, Italy.

Introduzione

La Federazione Speleologica Regionale dell'Emilia-Romagna ha lanciato un progetto sullo studio delle cave di *Lapis Specularis* per cercare, studiare e rilevare tutte le cave romane della Vena del Gesso Romagnola. Il progetto è sviluppato con i seguenti partner: la Soprintendenza Archeologica dell'Emilia-Romagna, l'Ente di gestione per i parchi e la biodiversità - Romagna, le università di Bologna e Modena e Reggio, la Regione Emilia-Romagna.

Inquadramento Geografico

La Vena del Gesso Romagnola si trova nel Nord dell'Italia, nell'Appennino Romagnolo, nella Regione Emilia-Romagna, in provincia di Ravenna. Oggi quest'area è protetta con un parco: il Parco della Vena del Gesso Romagnola, che fu istituito con la Legge Regio-

nale 21 febbraio 2005, n. 10 ed ha un'area di 6,063 ettari. Il vincolo protegge gli affioramenti di gesso che si estendono per 25 chilometri dalla valle del Torrente Lamone fino a quella del Sillaro (fig. 1).

Il gesso è una roccia evaporitica, molto idrosolubile e quindi l'area è ricca di carsismo: sono state esplorate più di 200 grotte, per uno sviluppo lineare di oltre 40 chilometri. La flora e la fauna sono molto ricche, perché il microclima dei versanti delle banconate gessose esposti a sud (caldi e secchi) e di quelli esposti a nord (freddi e umidi) favorisce una forte diversificazione con presenza di specie interessanti e rare. La Vena del Gesso è molto importante anche dal punto di vista storico, essendo stata abitata fin dall'età del bronzo, con evidenze particolarmente interessanti come le cave di *Lapis Specularis*, del periodo imperiale romano. Il parco ha un buon sistema turistico, che può essere arricchito dalle ricerche sul *Lapis Specularis*, che troveranno spazio nel museo sulla storia dell'uomo nella Vena del Gesso, che è in corso di pianificazione (Costa, 2015).

¹ Federazione Speleologica Regionale dell'Emilia-Romagna

² Gruppo Speleologico Bolognese-Unione Speleologica

³ Speleo GAM

⁴ Commissione Nazionale Cavità Artificiali - SSI

Autore di riferimento: Giovanni Belvederi - giovanni.belvederi@regione.emilia-romagna.it

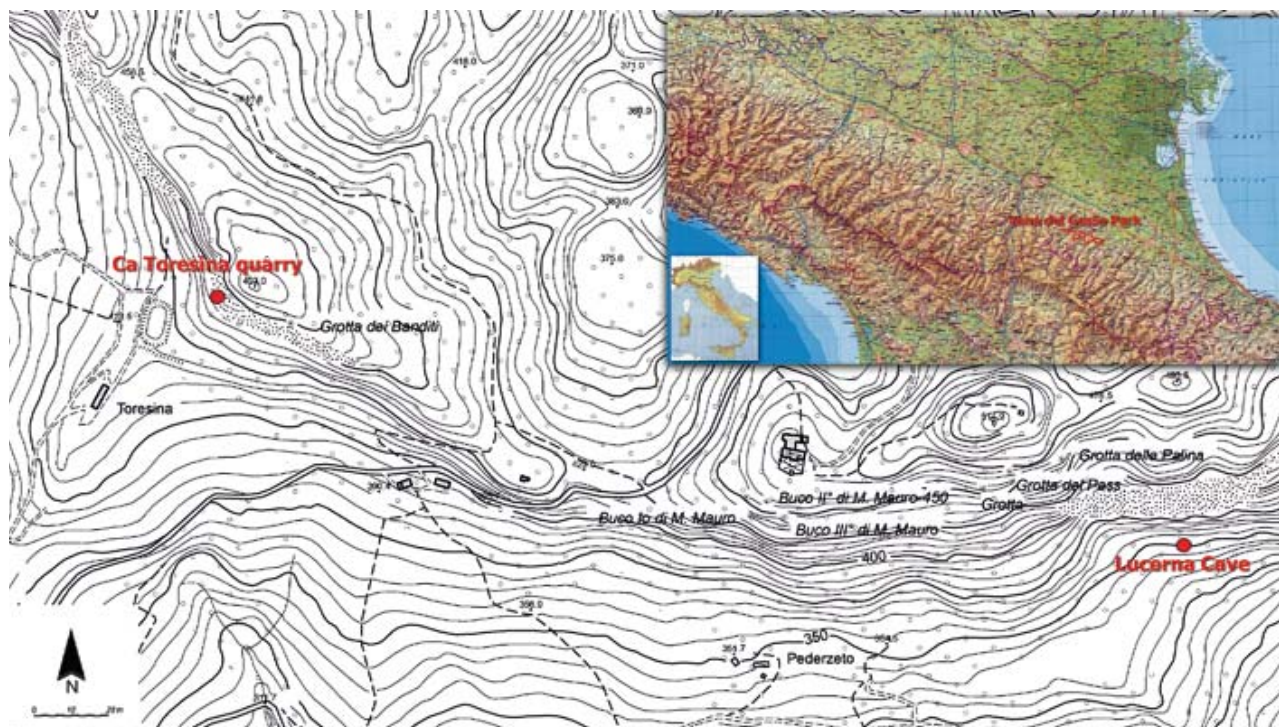


Fig. 1 - Inquadramento geografico (elaborazione M. L. Garberi).

Fig. 1 - Geographical sketch (processing M. L. Garberi).

Inquadramento geologico

La Vena del Gesso Romagnola è un eccellente laboratorio naturale per capire la prima fase della crisi di salinità che ha drammaticamente trasformato il Mare Mediterraneo in una gigantesca salina, rendendolo inospitale per molte specie.

Questi avvenimenti risalgono al Messiniano (Miocene Superiore), tra 5.97 milioni e 5.6 milioni di anni fa.

Tale crisi di salinità ha prodotto la deposizione di 16 strati di selenite nella Vena del Gesso (Gesso Primario) con cristalli fino a due metri di lunghezza, contenenti filamenti fossilizzati di cianobatteri (fig. 2).

Al termine della deposizione del Gesso, l'area è stata interessata da fenomeni tettonici che hanno dato origine ad ingenti frane sottomarine, causando lo smantellamento della formazione gessosa e la deposizione di unità di gesso risedimentato (Lugli et al., 2015).

Gli eventi tettonici hanno prodotto numerose fratture negli strati di gesso primario.

Le acque di circolazione hanno dissolto il gesso e allargato queste fratture, producendo vuoti di forma lenticolare. Le acque hanno poi depositato cristalli trasparentissimi di gesso secondario.

Lo sviluppo è stato veramente peculiare: acque sovrassature di CaSO_4 e condizioni di deposizione molto tranquille. Queste condizioni hanno permesso lo sviluppo di grandi cristalli trasparenti di gesso: il *Lapis Specularis* (Demaria, 2013).

Inquadramento storico

Le antiche fonti ci restituiscono copiose informazioni riguardanti le cave di *Lapis Specularis*, il loro uso e il loro sfruttamento. La documentazione disponibile spazia dal I secolo d.C. all'inizio del II secolo d.C., quando il *Lapis Specularis* inizia ad essere prodotto massicciamente come sostituto dei vetri da finestra. Plinio il Vecchio e Isidoro di Siviglia sono indubbiamente le fonti principali su questo tipo di pietra. Un'altra importante fonte di informazione sono le iscrizioni, che spaziano dal I secolo d.C. fino al VI secolo d.C.. Le più degne di nota sono le epigrafi funerarie di una dinastia Giulio-Claudia di liberti, chiamati "specularii" o "speculariarii", che erano artigiani impegnati nella produzione o manutenzione dei pannelli per le finestre (Tempesta, 2013).

Il gesso secondario, così trasparente, ha sostituito il vetro dall'epoca romana fino, in alcuni casi, al XIX secolo. Il *Lapis Specularis* era usato anche per costruire serre e alveari. Il Circo Massimo, a Roma, fu coperto da polvere di *Lapis* per farlo brillare durante gli spettacoli.

Il *Lapis Specularis* è presente in un certo numero di paesi del bacino del Mediterraneo. Plinio il Vecchio nella sua opera *Naturalis Historia* (XXXVI, 45-46) cita le più importanti cave situate in Spagna, Tunisia, Italia, Cappadocia (Turchia) e a Cipro. Plinio scrive: "(...) et in Bononiensi Italiae parte breves (...)" indicando l'area degli Appennini intorno a Bologna (Guarnieri, 2013a).



Fig. 2 - La Vena del Gesso Romagnola: banconate di gesso (foto P. Lucci).

Fig. 2 - The Primary Gypsum in the Vena del Gesso Romagnola (photo P. Lucci).

In Italia sono conosciute a tutt'oggi solo cave in Sicilia e in Emilia-Romagna. In questo momento la Vena del Gesso è l'unica area dell'Italia peninsulare dove sono state ritrovate le cave. Negli ultimi due anni gli speleologi hanno scoperto 15 luoghi di estrazione (fig. 3); è quindi probabile che questa attività fosse particolarmente diffusa in questi territori, durante l'epoca romana. La scoperta e l'esplorazione di cave di *Lapis Specularis* nella Vena del Gesso si è dimostrata piuttosto impegnativa. La presenza di rupi, spesso verticali e instabili, rende, infatti, problematica l'individuazione e l'accesso alle cave. Un altro motivo che rende difficile l'accesso è dovuto alla presenza di riempimenti naturali, costituiti per lo più da terriccio e da blocchi di gesso, che spesso ostruiscono l'entrata. Un esempio è costituito dalla Grotta della Lucerna, il cui accesso, al momento della scoperta, consisteva in uno strettissimo pertugio privo di evidenze che facessero ipotizzare interventi antropici. Le frane sono poi frequenti nella Vena del Gesso e si può quindi presumere che, nel corso dei secoli, anche la morfologia degli ambienti circostanti le cave di *Lapis Specularis* sia notevolmente mutata. Parte delle stesse cave, che oggi si aprono in parete, potrebbe essere stata letteralmente asportata e distrutta da frane. Gli ambienti interni presentano

poi difficoltà di esplorazione, poiché tamponati da materiale di riporto di origine antropica (per lo più scarti di escavazione). A tal proposito si ricorda come, nel caso della Grotta della Lucerna, l'asportazione di questi residui abbia richiesto alcuni anni di duro lavoro non ancora terminato (Ercolani et al., 2015).

La Grotta della Lucerna

La Grotta della Lucerna è di gran lunga la più grande e articolata cava di *Lapis Specularis* presente nella Vena del Gesso romagnola.

È stata esplorata, rilevata e in parte svuotata dagli scarti della lavorazione mineraria, dallo Speleo GAM Mezzano a partire dal Novembre 2000, data di scoperta della cavità (fig. 4).

Da un punto di vista speleologico, la grotta non ha presentato particolari problemi esplorativi, mentre lo svuotamento dei riempimenti, in gran parte di origine antropica, ha richiesto oltre un decennio di intenso lavoro, compiuto con l'assistenza degli archeologi e non ancora terminato. Questi riempimenti sono costituiti da scarti di escavazione spostati da un punto all'altro. Diversi ambienti, completamente tamponati, sono via

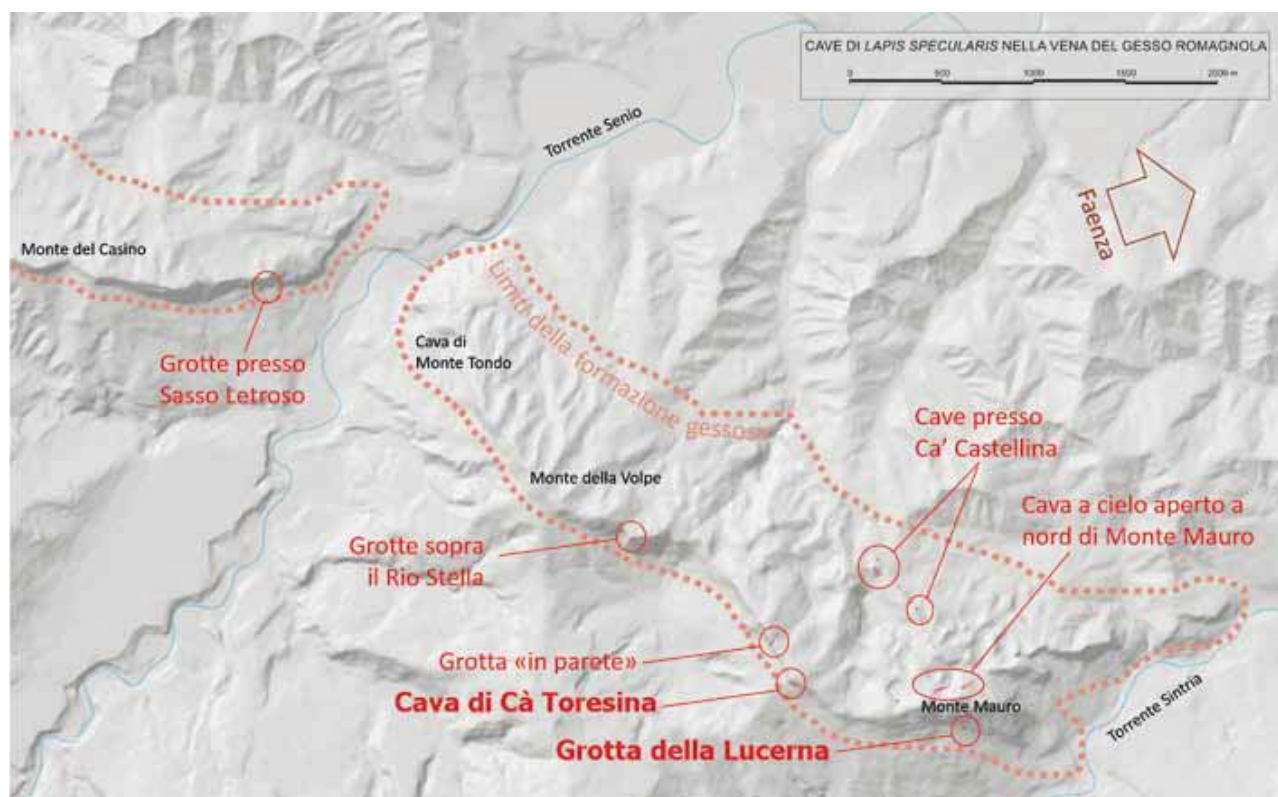


Fig. 3 - Le cave di *Lapis Specularis* nella Vena del Gesso Romagnola (elaborazione P. Lucci).

Fig. 3 - The quarries of *Lapis Specularis* in the Vena del Gesso Romagnola (processing P. Lucci).

via venuti alla luce, evidenziando nuovi aspetti della cava. Ancor oggi restano alcuni ambienti chiusi dagli scarti dell'estrazione.

Le pareti degli ambienti liberati dal detrito sono caratterizzate da numerosissime tracce di scavo con scalpelli; durante il lavoro di rimozione è stata trovata una lucerna di terracotta integra, frammenti di altre, una moneta dell'epoca di Marco Aurelio.

La Grotta della Lucerna è un inghiottitoio naturale di origine carsica, utilizzata poi come cava di *Lapis*; si apre lungo l'instabile parete Sud di Monte Mauro, l'ingresso della cava è coperto da una frana di blocchi di gesso che nascondono gli antichi gradini intagliati. All'interno sono presenti un elevato numero di evidenze manuali antropiche: nicchie per lanterne, nicchie per travi di legno, piccole nicchie per pioli di legno e infine "pedarole" scavate nel gesso. Tutte queste manomissioni servivano a migliorare le condizioni di lavoro. Molte parti della cavità sono state allargate alla ricerca delle vene di *Lapis* da asportare (figg. 5-6-7-8). In un ambiente è stato trovato un foro in uno spuntone che serviva per fare passare una corda per facilitare la discesa degli operai (Ercolani et al., 2015).

Le tracce di scalpellature sono sempre molto fitte, parallele e ravvicinate fra loro; se ne sono trovate di vari tipi:

- scalpellature a lisca di pesce, regolari, con la stessa angolatura e molto vicine fra di loro; l'utensile utilizzato è una piccozza a punta piatta;

- segni marcati, profondi e larghi, che vanno dall'alto verso il basso e che in taluni casi prendono tutta l'altezza della parete, finalizzati ad aprirsi un passaggio all'interno della cava; realizzati con piccozze a punta piatta;
- segni superficiali, quasi lisciature, fatte probabilmente per rendere meno scabrosi alcuni passaggi; realizzate con uno strumento a punta piatta e larga.

Gli strumenti utilizzati all'interno della cava erano quindi strumenti a percussione diretta come scalpelli di vario tipo utilizzati con angolature differenti, oltre a piccozze e forse asce a punta piatta, asce martello o martelline a taglio liscio con i taglienti paralleli al manico; questi attrezzi erano poi sostituiti per le operazioni vere e proprie di estrazione da strumenti a percussione indiretta come il punteruolo o cuneo e la mazzetta, impiegati per estrarre la vena di lapis (Guarnieri, 2013b).

La Grotta della Lucerna è stata rilevata interamente con il Laser Scanner ed è stato così ottenuto un modello digitale 3D (Santagata et al., 2015).

La cava di Ca' Toresina

I luoghi di estrazione sono situati in sei aree nella Vena del gesso; il presente lavoro tratta la cava presso Ca' Toresina, che si apre nella parete di gesso tra il

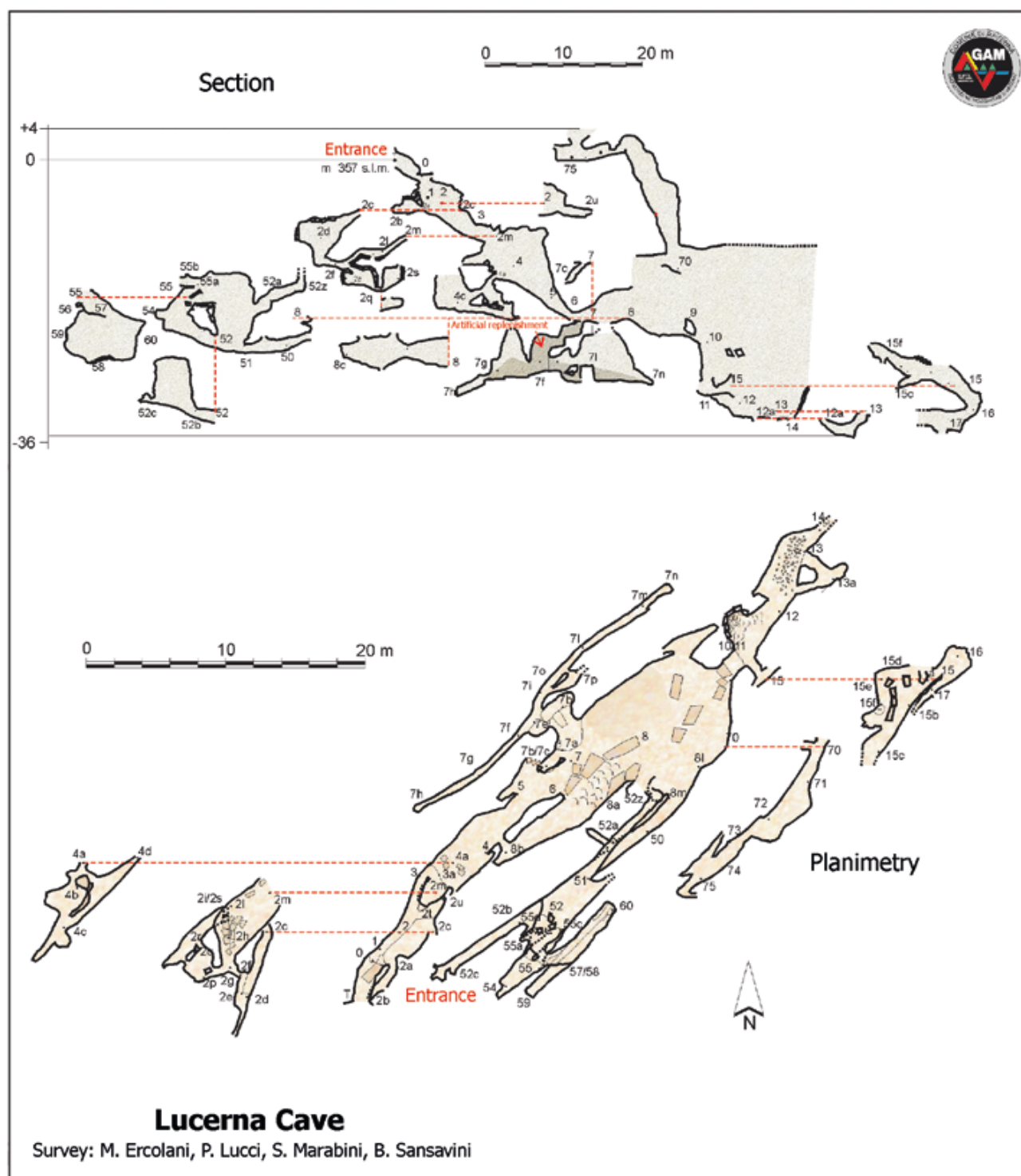


Fig. 4 - Il Rilievo della Grotta della Lucerna (Speleo GAM).
Fig. 4 - The survey of Lucerna Cave (Speleo GAM).

passo di Ca' Faggia a ovest e la cima di Monte Mauro a est. La cava è lunga circa 50 metri; attualmente è il secondo luogo di estrazione per dimensioni e importanza. Nel momento della scoperta la cavità era quasi completamente occlusa da detrito, come mostra la porzione in grigio del rilievo (fig. 9). È stato neces-

sario rimuoverlo con un duro lavoro di scavo, che ha restituito le dimensioni alla cavità: da un metro a tre metri di larghezza e fino a 7 metri di altezza. Il tunnel si presenta largamente rimaneggiato artificialmente, ma sono evidenti anche tracce di carsismo. Le pareti del tunnel presentano numerosissimi segni



Fig. 5 - Sala centrale della Grotta della Lucerna. (foto P. Lucci).
Fig. 5 - The central room of Lucerna Cave (photo P. Lucci).



Fig. 8 - Tracce di scalpello nel gesso (foto P. Lucci).
Fig. 8 - The chisel-made traces in the gypsum (photo P. Lucci).

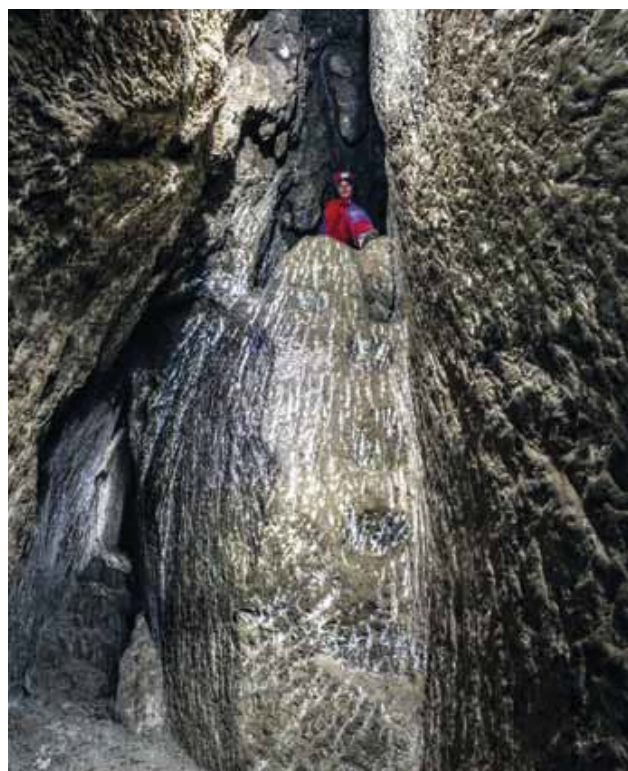


Fig. 6 - Scalini intagliati nel gesso, Grotta della Lucerna (foto P. Lucci).
Fig. 6 - Steps carved in Gypsum, Lucerna Cave (photo P. Lucci).

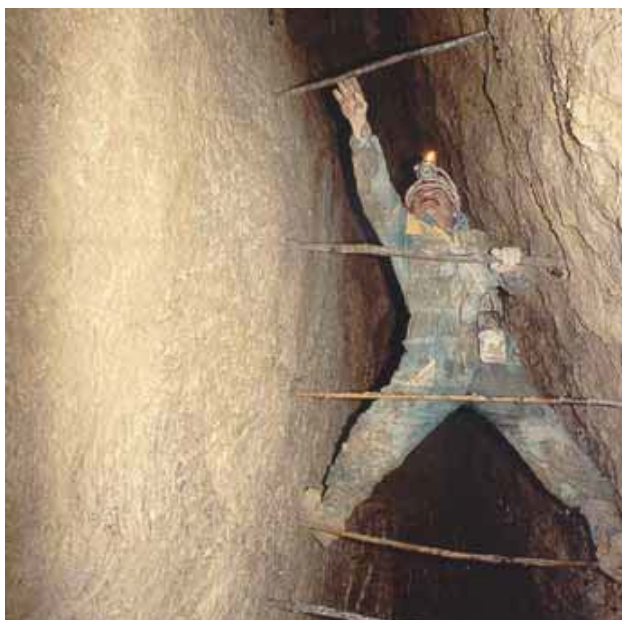


Fig. 7 - Nicchie per i pioli, Grotta della Lucerna. (foto P. Lucci).
Fig. 7 - The recesses for rungs, Lucerna Cave (photo P. Lucci).

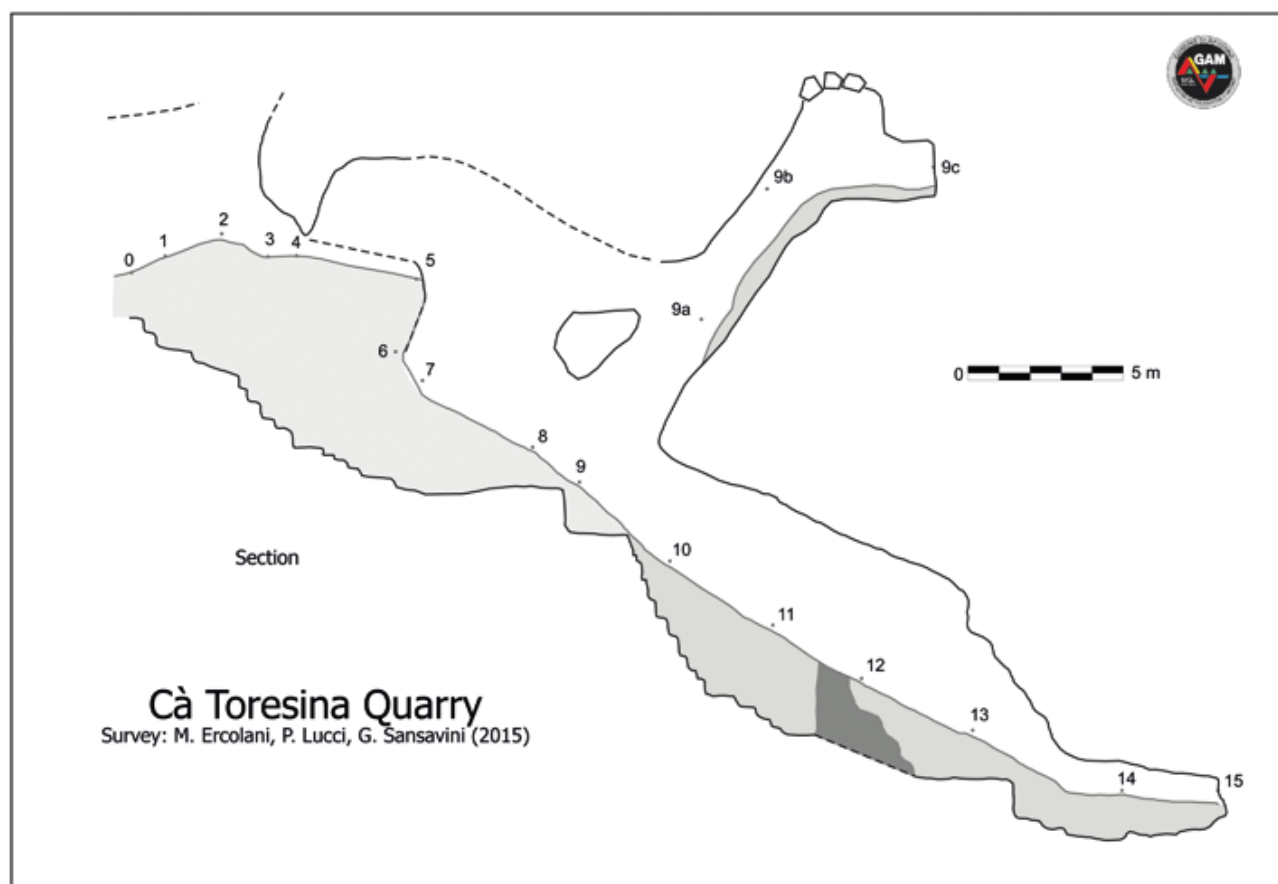


Fig. 9 - La sezione della Cava di Cà Toresina. La parte grigia indica il riempimento asportato (Speleo GAM).
 Fig. 9 - The section of the Cà Toresina quarry. The grey part is the removed replenishment (Speleo GAM).

di scalpellatura e alcune nicchie per posizionare lucerne e travi di legno, molto spesso ricoperte da infiorescenze gessose (figg. 10-11).

Nel detrito rimosso sono stati rinvenuti centinaia di pezzi di *Lapis* con evidenti tracce di taglio con la sega. È possibile che una prima lavorazione del materiale fosse effettuato già in loco. La Soprintendenza Archeologica dell'Emilia-Romagna sta coordinando lo studio dei reperti trovati nel detrito (Ercolani et al., op. cit) (fig. 12).

Ricostruzione 3D

La metodologia utilizzata per ottenere il modello 3D della cava di *Lapis* e di alcuni oggetti rinvenuti è basata su una tecnologia di ricostruzione multi-vista che opera con immagini arbitrarie ed è efficiente anche in condizioni non controllate. La forma fisica della cavità viene ripresa da più punti di vista con una serie di fotografie ad alta definizione in modo che ogni punto della superficie sia presente in due o più immagini. L'allineamento delle immagini, la creazione della nuvola di punti densa e, quindi, del modello 3D, avviene in modo totalmente automatico (Agisoft LLC, 2015).

Le immagini per la ricostruzione della cava di *Lapis* di Cà Toresina sono state scattate in cinque uscite e ammontano ad un totale di circa 4.500 fotogrammi. Le riprese fotografiche sono state effettuate con una Nikon D810, fotocamera a pieno formato con sensore da 36 megapixel, e con un obiettivo AF-S 17-35mm f/2.8 D ED stabile sulla focale 17mm. La sensibilità del sensore è stata fissata a 100 ISO per tutte le sessioni e il diaframma dell'obiettivo è fissato a 5.6. Il formato dei file immagine è stato il "Tagged Image File Format" (TIFF) consigliato anche dalle istruzioni del software. Ogni immagine a 300 dpi e con dimensioni di 7.360 x 4.912 pixel, raggiungeva un "peso" di circa 100 Mb.

Il primo passo della ricostruzione allinea le immagini ricercando dei punti comuni e collegandoli tra loro, ricostruisce la posizione della camera per ogni fotogramma e calibra la distorsione dell'obiettivo attraverso i parametri riportati nei metadati di ogni immagine. Al termine dell'operazione si ottiene il posizionamento della camera per ogni fotogramma ed una nuvola di punti di contatto ricostruiti. Le foto utilizzate per la ricostruzione definitiva sono state 1495 per 149 Gb e i punti di allineamento delle foto sono stati 230.677. Questa nuvola di punti "sparsi" (fig. 13) non viene usata direttamente per la creazione del modello 3D

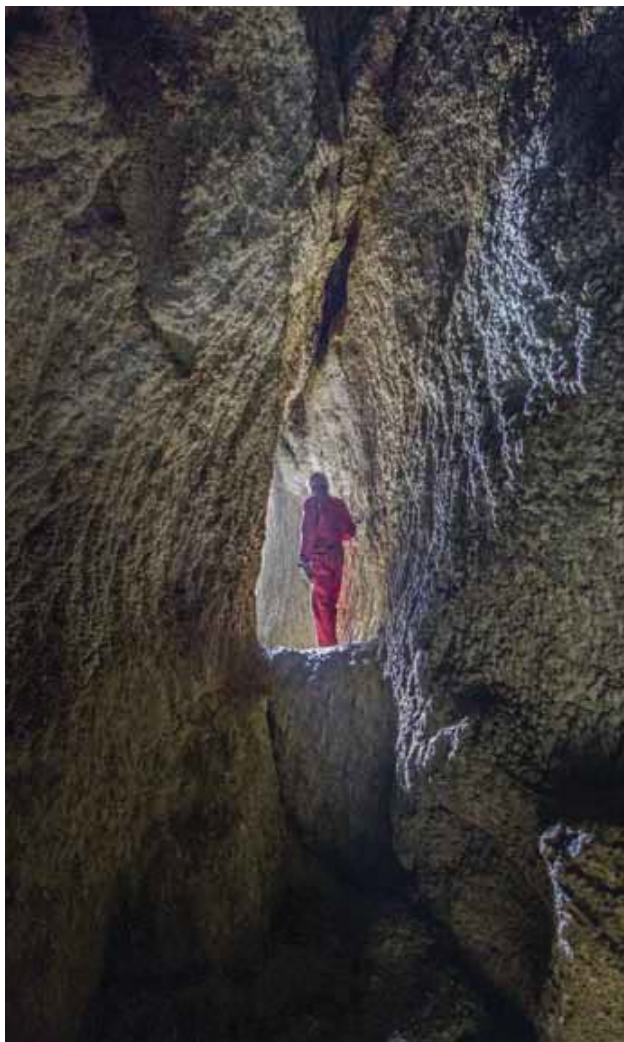


Fig. 10 - La prima parte di Cà Toresina, la parete presenta solchi da scalpello (foto P. Lucci).

Fig. 10 - The first part of Cà Toresina, the walls have many chisel scratches (photo P. Lucci).

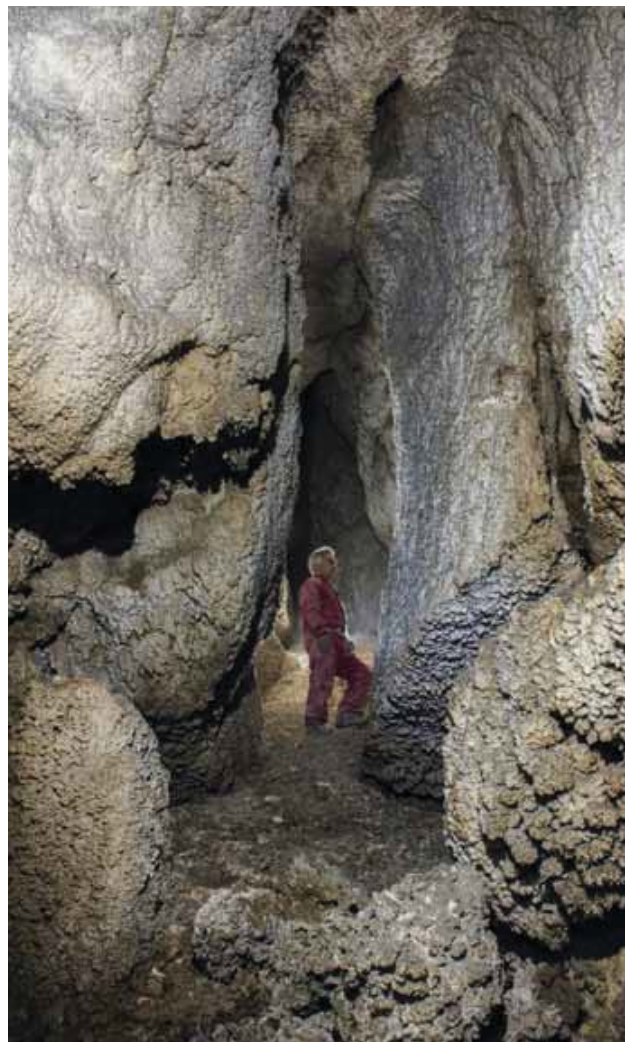


Fig. 11 - L'interno della cava. (foto P. Lucci).

Fig. 11 - The interior of the quarry (photo P. Lucci).

ma concorre insieme alle posizioni della camera per ogni fotogramma, alla creazione e calibratura della nuvola di punti densa, che consiste nel secondo passaggio di creazione (fig. 14). I punti necessari per la creazione della nuvola densa di Cà Toresina sono stati 237.921.802.

Ottenuta la nuvola di punti densa si procede alla creazione di una maglia poligonale che rappresenta la superficie dell'oggetto, nel nostro caso la galleria della cava di *Lapis*. Il passaggio finale consiste di aggiungere alla maglia poligonale la *texture* generata dalle stesse immagini originali, ottenendo l'effetto di continuità spaziale 3D voluta. Per rendere possibile il lavoro del processore la cavità è stata smontata in quattro sezioni detti *chunk* con circa 350 fotogrammi per ogni sezione, più un numero variabile di fotogrammi ripetuti per migliorare la ricopertura tra i vari *chunk*, in questo modo il software e l'hardware utilizzati riesco-

no a processare la grande massa di dati necessari per la creazione delle nuvole dense di punti. Al termine della creazione delle porzioni, queste sono state montate utilizzando i fotogrammi comuni tra loro, in modo che il software riconoscesse gli stessi oggetti nei due modelli. Per permettere un migliore raccordo tra i vari *chunk*, sono stati usati dei *marker* sul terreno sotto forma di punti ed oggetti riconoscibili (fig. 15). Tali *marker*, perché risultino affidabili, vengono posizionati non sul modello della nuvola densa dei punti ma sui singoli fotogrammi. Il software riconosce il punto della superficie del fotogramma e lo correla con i fotogrammi adiacenti e con il modello 3D, richiedendo il posizionamento su almeno 3 fotogrammi per definire accuratamente le coordinate relative del *marker*. Più il riconoscimento è preciso e definito da molti punti di vista, più la correlazione risulta precisa. L'uso di tali *marker* facilita l'allineamento dei vari *chunk* impo-



Fig. 12 - Frammenti di *Lapis specularis* con tracce di taglio (foto P. Lucci).

Fig. 12 - The *Lapis Specularis* sheets with saw traces (photo P. Lucci).

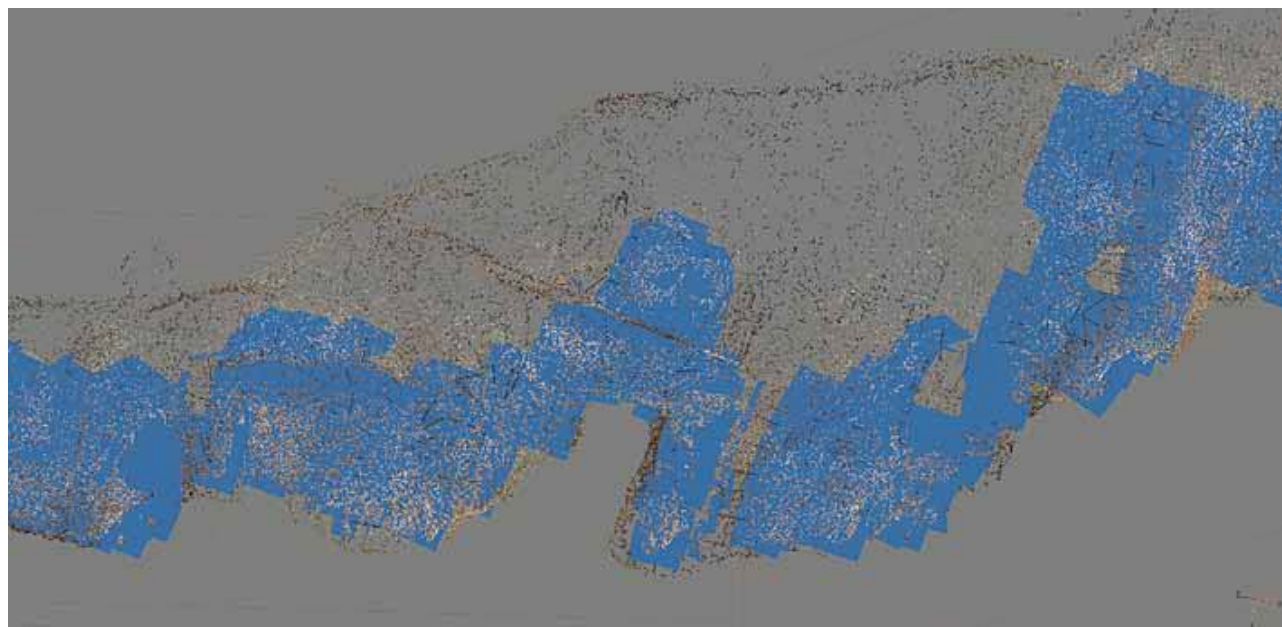


Fig. 13 - La nuvola di punti sparsi e le posizioni della camera (elaborazione G. Belvederi).

Fig. 13 - The sparse point cloud and the camera position (processing G. Belvederi).

stando in modo omogeneo orientamento e dimensione delle varie sezioni che altrimenti potrebbero risultare anisotrope.

Se correttamente eseguite, queste operazioni ottengono un continuo completo e fluido. Utili per questa operazione, sono stati anche i *marker* fisici che identifica-

no i capisaldi del rilievo della cavità. Gli stessi *marker* sono stati utilizzati per dare una dimensione reale al modello, usandoli per definire distanze fisse conosciute, in questo modo si ottengono le dimensioni spaziali di qualsiasi punto della ricostruzione finale (fig. 16). Questa metodologia ha il vantaggio di ottenere un



Fig. 14 - La nuvola densa dei punti ed i *markers* (elaborazione G. Belvederi).

Fig. 14 - The dense point cloud and the software markers (processing G. Belvederi).



Fig. 15 - I *markers* fisici posti nella cavità (elaborazione G. Belvederi).

Fig. 15 - The physical markers in the cave (processing G. Belvederi).



Fig. 16 - Il modello completo di Cà Toresina (elaborazione G. Belvederi).

Fig. 16 - The complete model of the Cà Toresina quarry (processing G. Belvederi).

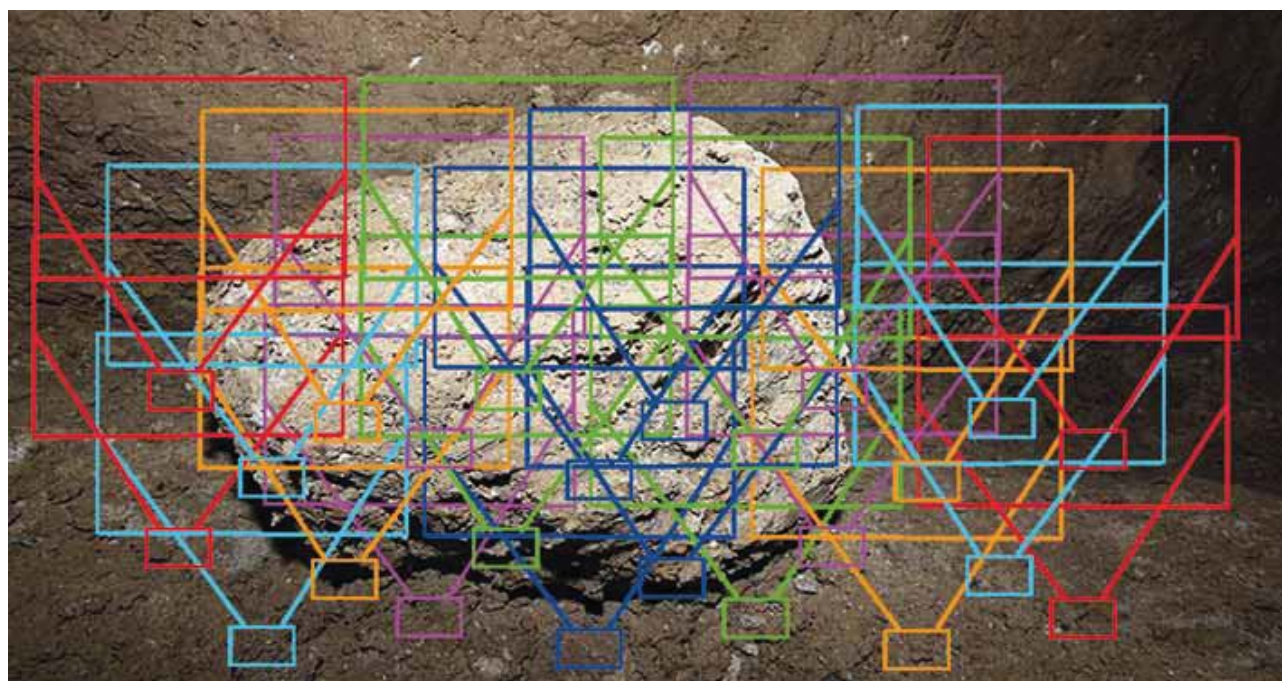


Fig. 17 - Schema di ripresa delle foto (elaborazione M. L. Garberi).

Fig. 17 - Correct position of photographic takes (processing M. L. Garberi).

modello 3D affidabile con un impiego di risorse relativamente limitato; ovviamente più la qualità, e quindi la definizione, delle immagini è elevata più la probabilità che il modello sia ricostruito fedelmente è alta. Immagini poco definite o non perfettamente a fuoco

impediscono, in alcuni casi, lo stesso allineamento con il conseguente fallimento dell'operazione di ricostruzione.

Anche la superficie dell'oggetto da ricostruire, nel nostro caso la galleria, se composta da materiale unifor-

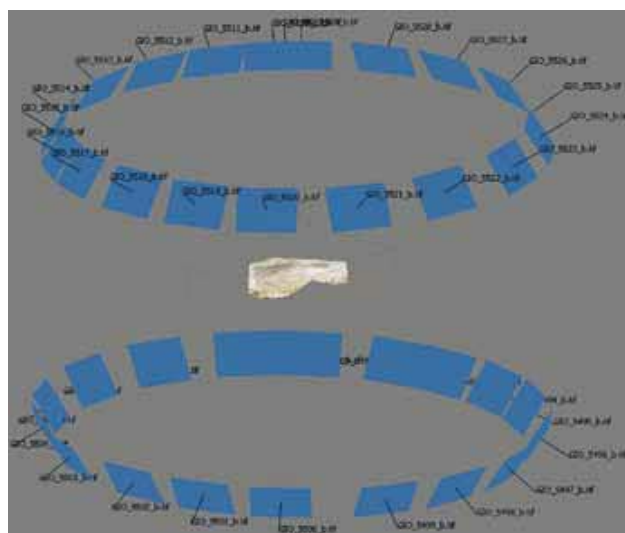


Fig. 18 - Posizione delle foto di un frammento di *Lapis* (elaborazione G. Belvederi).

Fig. 18 - The camera position of a *Lapis* sheet (processing G. Belvederi).

me e riflettente potrà complicare molto la ricostruzione. Fortunatamente le pareti della galleria presentano molti punti riconoscibili e quindi facilmente allineabili dalla procedura.

La procedura ha comunque delle criticità dovute all'elevata quantità d'informazioni da processare, che aumentano progressivamente all'aumentare della definizione delle immagini; per ovviare a questo inconveniente la ricostruzione avviene per segmenti di galleria di una decina di metri, generando una nuvola densa con un numero di punti variabile da circa 60 a circa 90 milioni di punti. Tali dimensioni sono già molto al di sopra della capacità di calcolo di un normale computer, costringendo l'utilizzatore a dotarsi di *hardware* adeguato.

Le riprese fotografiche sono un punto delicato della procedura: come abbiamo già accennato, le riprese devono essere perfettamente nitide e molto definite, l'obiettivo non deve distorcere esageratamente le immagini, quindi si possono usare obiettivi grandangolari non eccessivamente spinti. Per ottenere un buon risultato, ogni immagine deve ricoprire la precedente almeno di un 80% sia in orizzontale sia in verticale, costringendo a scattare centinaia di foto anche per ricostruzioni relativamente piccole (fig. 17). Le immagini dovrebbero essere scattate con una sequenza logica senza saltare da sezioni di cavità ad altre e senza colmare il vuoto tra loro. La ricostruzione in questo caso sarà molto complicata con il rischio di uno scarto d'immagini molto elevato. La natura stessa delle riprese in un ipogeo complica la ricostruzione. Non essendoci un'illuminazione naturale dell'ambiente bisogna ricorrere all'illuminazione artificiale, la forma e le dimensioni della galleria impongono l'uso del flash. Tale soluzione non è la più indicata, dalle stesse specifiche

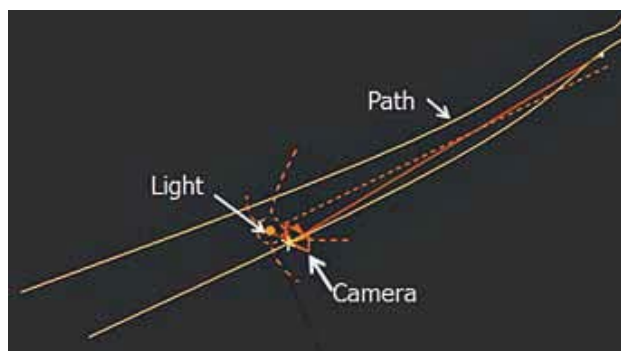


Fig. 19 - Schema del percorso della camera nel software Blender (elaborazione G. Belvederi).

Fig. 19 - The path of the camera in the software Blender (processing G. Belvederi).

del software utilizzato, perché le ombre delle asperità cambiano ad ogni fotogramma complicando l'allineamento delle immagini.

Se al termine delle operazioni di ricostruzione il modello ottenuto soddisfa la maggior parte delle aspettative, è possibile:

- visualizzare la forma della cavità;
- misurare le dimensioni nello spazio;
- esplorare virtualmente l'interno della cavità;
- riconoscere le incisioni lasciate dal lavoro di estrazione del *Lapis Specularis*, misurandone le distanze e le loro dimensioni.

La ricostruzione è molto più semplice per un oggetto isolato, come ad esempio un frammento di *Lapis Specularis*, che è stato ricomposto tridimensionalmente per ottenere un file PDF interattivo, che permettesse di muovere ed effettuare misure nelle tre dimensioni. Nella figura 18 si vede l'oggetto ed il posizionamento delle foto che sono state necessarie per ricostruirlo. Il rilevamento e la riproduzione digitale di oggetti può essere molto vantaggiosa per i reperti archeologici, perché è così possibile lo studio anche a distanza, senza essere in presenza fisica del reperto stesso, con la possibilità di ruotarlo e di farne misure reali.

Animazione 3D

Il modello è stato esportato in formato Stanford PLY per essere utilizzato da Blender, un *software* libero e *open-source* professionale di 3D *computer graphics*. Blender permette la creazione di film animati, effetti artistici visuali, applicazioni interattive 3D e video giochi. Per creare l'animazione è necessario muovere un punto di vista all'interno del modello, che dia l'impressione di percorrere a volo d'uccello la cavità, creando una visita virtuale della cava romana. È quindi necessario definire il percorso all'interno del modello che dovranno seguire la camera e l'illuminazione. Nel caso del filmato di Cà Toresina le luci utilizzate so-

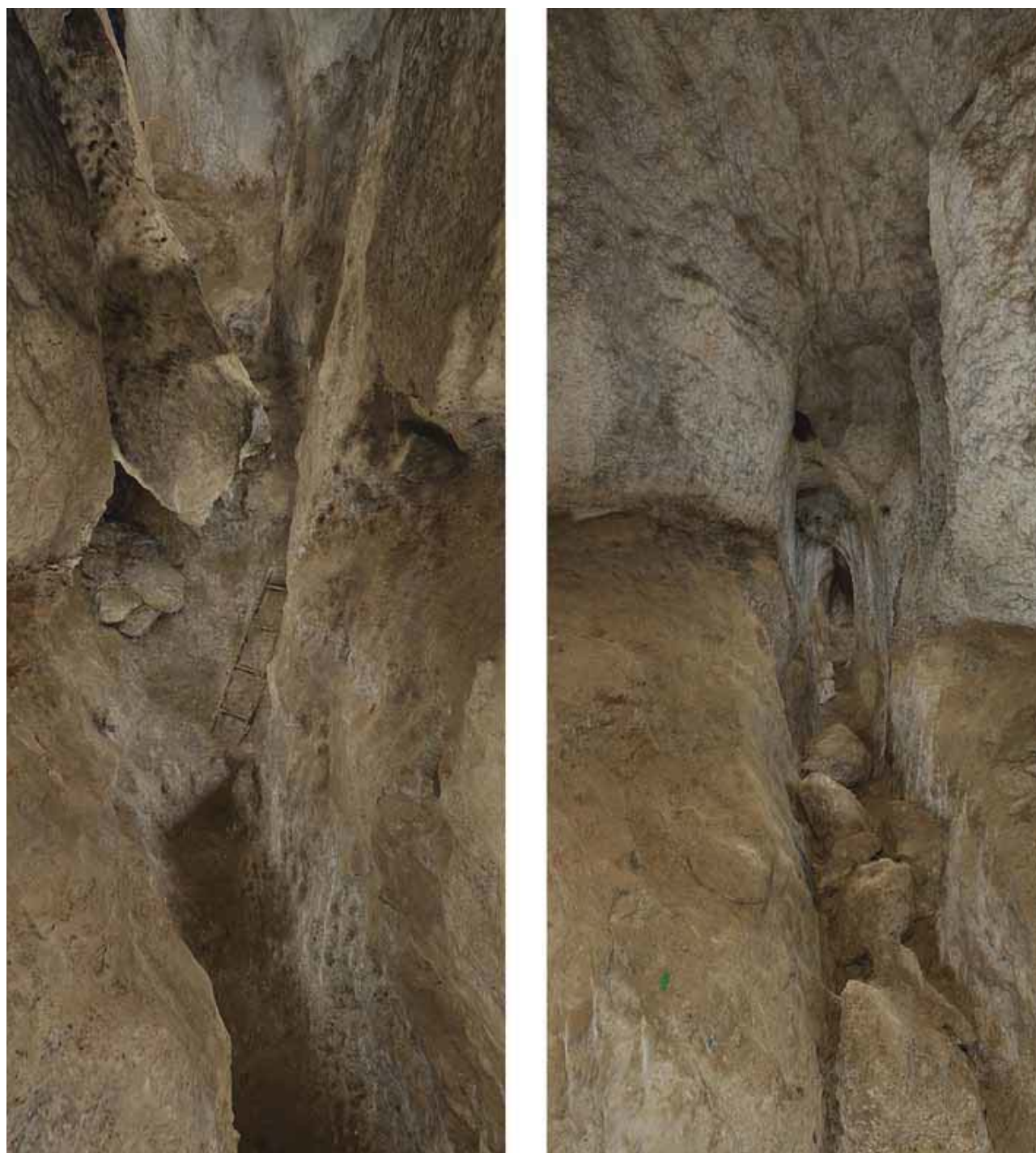


Fig. 20 - L'interno della cava nella ricostruzione tridimensionale (elaborazione G. Belvederi).
 Fig. 20 - The inside of the quarry in the 3D reconstruction (processing G. Belvederi)

no due: una fissa all'esterno e una che accompagna la camera durante il volo all'interno della cava (fig. 19). Il percorso viene definito attraverso una funzione matematica che connette una serie di vertici, in cui la camera cambia direzione. I vertici sono definiti durante la creazione del percorso. La camera è, ovviamente, il punto di vista della ripresa. Il *software* permette la

creazione anche di un video del modello visto dall'esterno, al cui interno è possibile osservare il movimento della camera, identificata dalla sorgente di luce che l'accompagna. Sono stati così generati i due filmati, montati in un unico video che alterna le immagini del volo virtuale all'interno con riprese del volo della camera viste dall'esterno del modello.

Conclusioni

La cava di *Lapis Specularis* di Cà Toresina è costituita da una lunga galleria con tre livelli principali di pavimentazione che si abbassano progressivamente dall'ingresso fino al fondo. La cavità ha sempre dimensioni orizzontali contenute, che vanno da circa 2 metri a poche decine di centimetri. Nei punti più stretti, dovendo riprendere ortogonalmente le pareti, è stato necessario scattare numerosissime fotografie per avere la certezza del ricoprimento, poiché era impossibile controllare l'inquadratura. Il soffitto della cavità è quasi sempre irraggiungibile sia dagli operatori che dall'illuminazione delle riprese fotografiche, essendo alto una decina di metri, pertanto in varie sezioni della galleria il soffitto non è stato ricostruito nel modello 3D, che risulta aperto.

La fase di ricostruzione ha bisogno di un hardware non convenzionale adeguato alla mole di dati, quindi non è gestibile la ricostruzione di cavità che superino poche decine di metri. Le sessioni di ripresa delle immagini, devono essere pianificate in modo da poter predisporre accuratamente i *marker* fisici in previsione dell'allineamento dei fotogrammi e della successiva produzione del modello.

Il metodo fotogrammetrico offerto dal *software* utilizzato è senza dubbio versatile ed economico rispetto ad altri metodi di ricostruzione 3D di ambienti ipogei (Laser scanner, ecc.), non presuppone una formazione eccessiva per l'operatore e le attrezzature possono essere relativamente semplici. L'economicità delle attrezzature necessarie è relativa, perché, per ottenere buoni risultati, la fotocamera deve essere di ottima qualità e gli obiettivi non devono avere distorsioni eccessive.

Lo specifico caso della cava di *Lapis Specularis* di Cà Toresina evidenzia come questo metodo possa ottenere un'accurata ricostruzione 3D di un ambiente ipogeo molto aderente alla realtà (fig. 20). Il modello e le sue esportazioni verso il *software* di animazione possono essere usati per fini di divulgazione, di documentazione e di studio archeologico. I prossimi passi nella continuazione del progetto saranno di estendere la ricostruzione ad altre cave di *Lapis Specularis* trovate nell'area di Monte Mauro.

Bibliografia

- Agisoft LLC, 2015, *Agisoft PhotoScan User Manual*, St. Petersburg.
- Costa M., 2013, *La vena del Gesso romagnola tra natura e cultura*, in *Il vetro di Pietra*, Atti I° Convegno Internazionale Museo Civico di Scienze Naturali di Faenza 26-27 settembre 2013, pp.193-198.
- Demaria D., 2013, *La lucerna di Plinio*, in *Il vetro di Pietra*, Atti I° Convegno Internazionale Museo Civico di Scienze Naturali di Faenza 26-27 settembre 2013, pp. 89-98.
- Ercolani M., Lucci P., Sansavini G., 2015, *Le nuove cave di lapis specularis nella Vena del Gesso Romagnola*, Atti II Convegno Internazionale sul lapis specularis: "El cristal de las minas. El "lapis specularis" en el mundo romano. Un recurso patrimonial, turístico, geológico y medioambiental", Cuenca 1-3 ottobre 2015, in corso di stampa.
- Guarnieri C., 2013a, *Il lapis specularis: un'introduzione*, in *Il vetro di Pietra*, Atti I°Convegno Internazionale Museo Civico di Scienze Naturali di Faenza 26-27 settembre 2013, pp. 11-15.
- Guarnieri C., 2013b, *Indicatori relativi allo sfruttamento della Cava della Lucerna: segni estrattivi e materiali archeologici*, in *Il vetro di Pietra*, Atti I°Convegno Internazionale Museo Civico di Scienze Naturali di Faenza 26-27 settembre 2013, pp. 115-126.
- Lugli S., Manzi V., Roveri M. 2015, *Geologia dei gessi di Brisighella e Rontana*, in *I gessi di Brisighella e Rontana*, Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia s. II, 28, pp. 17-26.
- Santagata T., Lugli S., Camorani M.E., Ercolani M., 2015, *Laser scanner survey and true view applications of the "Grotta della Lucerna" (Ravenna, Italy), a Roman mine for Lapis Specularis*, in *Proceedings of International Congress of Speleology in Artificial Cavities Hipogea 2015*, Rome March 11-17, 2015, pp. 411-418.
- Tempesta C., 2013, *Quod vitri more transluceat. Il lapis specularis nella testimonianza delle fonti*, in *Il vetro di Pietra*, Atti I°Convegno Internazionale Museo Civico di Scienze Naturali di Faenza 26-27 settembre 2013, pp. 45-55.