

Alexander Debenjak<sup>1</sup>, Giacomo Canciani<sup>1</sup>, Luca Tringali<sup>1</sup>, Tecla Tripari<sup>1</sup>

## Le nuove tecnologie per il rilievo di pozzi non accessibili: il caso dei pozzi artificiali sopra la galleria ferroviaria del Lokavac

1) G.S.Talpe del Carso - J.K. Kraski Krti, San Michele del Carso/Vrh (Go)

**Abstract.** In this short paper we describe how our team used modern surveying technology to study an artificial pit, without endangering cavers and the infrastructure as well. We also explain how we managed to use the LiDAR cartography from Regione Friuli Venezia Giulia to build a complete model of two artificial caves and the external terrain, to get a better understanding of the system and produce a short 3D animation for the general public without expensive tools.

**Riassunto.** In questo articolo descriviamo come il nostro team ha utilizzato moderne tecnologie di rilevamento per studiare un pozzo artificiale, senza mettere a repentaglio né gli speleologi né l'infrastruttura. Spieghiamo, inoltre, come utilizzare la cartografia LiDAR della Regione Friuli Venezia Giulia per costruire un modello completo di due grotte artificiali e del terreno esterno, per comprendere meglio il sistema e produrre una breve animazione 3D per il grande pubblico senza l'impiego di strumenti costosi.

### Introduzione

Le moderne tecniche di rilievo possono essere utilizzate non soltanto per produrre rilievi graficamente più appetibili di cavità già note e ampiamente documentate, ma anche per rilevare automaticamente ambienti non sicuri per la progressione da parte di speleologi. È il caso dei camini, prevalentemente artificiali, della galleria ferroviaria del Lokavac presso San Giovanni di Duino. I rilievi tridimensionali così ottenuti possono poi essere uniti al rilievo del terreno, per ottenere un modello virtuale navigabile di un intero sistema di grotte e del terreno che lo ospita. Questo può essere utile in fase di esplorazione, per comprendere meglio la morfologia degli ambienti, ma anche per la divulgazione. È infatti possibile produrre delle animazioni didattiche o dei modelli stampabili in 3D, utilizzando software gratuiti.

### Inquadramento storico

La galleria del Lokavac fu costruita nel 1856 dall'Imperial Regia Privilegiata Società delle Ferrovie Meridionali (Kaiserlich Königliche Privilegierte Südbahn-Gesellschaft) lungo la linea che collegava Vienna con Trieste. Come da abitudine dell'epoca, la galleria presentava due camini vicini alle uscite, in modo da generare sufficiente ricircolo d'aria per evitare l'accumulo dei fumi prodotti dalla combustione del carbone. Già agli inizi delle offensive sull'Isonzo, fu riadattata dal Genio austriaco per le esigenze belliche.

Gli Austriaci persero il controllo della zona poco prima della presa di Gorizia, nell'agosto 1916, e a quel punto gli Italiani utilizzarono la galleria come deposito di materiali e riparo per i soldati. Tuttavia, poco meno di un anno dopo, tra maggio e giugno 1917, la Quinta Armata Austro-Ungarica decise di provare a riconquistare il Monte Flondar e iniziò bombardamenti massicci. Tra giugno e agosto lo Stato Maggiore italiano fu costretto a sostituire le brigate ormai decimate, schierando dal Dosso Giulio al basso Lokavac il 65° Reggimento della Brigata Valtellina (fino ad allora in sosta a Vermeigliano).

### La scoperta del primo camino

Durante una camminata nella linea di trincee sul Lokavac, due soci del Gruppo Speleologico Talpe del Carso notano un piccolo bunker in cemento, con uno scivolo interno la cui parte finale

non è visibile. Il bunker si trova non lontano dall'ingresso occidentale della galleria ferroviaria del Lokavac, leggermente spostato verso Sud rispetto all'allineamento dei binari. Il catasto delle cavità artificiali, però, non segnala alcun ambiente ipogeo nella zona, il che porterebbe a pensare che non ve ne siano degni di nota. Durante l'esplorazione dello scivolo, tramite progressione su corda, diventa invece immediatamente evidente che esso conduca a un pozzo profondo una decina di metri, che sembra terminare su un cumulo di detriti, a loro volta appoggiati su un pavimento in cemento il quale, però, pare avere una forma a botte, come se fosse il soffitto di una galleria.

Il passaggio di un treno, visibile da un foro nel cemento, durante l'esplorazione conferma che il pavimento del pozzo è in realtà il soffitto della galleria ferroviaria. A un certo punto diventa possibile camminare nell'interstizio tra la moderna copertura in cemento e l'originale galleria scavata nella pietra. Il problema che si è presentato durante l'esplorazione è che, data la posizione e l'orientamento dell'ingresso del pozzo, non sembrava possibile che il pozzo terminasse nella galleria ferroviaria. Si tratta di una situazione comune nella speleologia: inusuali forme ipogee che costringono gli esploratori a ruotare su se stessi più volte possono disorientare e dare un'errata percezione delle direzioni.

### Il rilievo 3D del bunker e del terreno esterno

Per riuscire a comprendere meglio l'esatta morfologia di questa cavità artificiale è necessario produrre un rilievo tridimensionale. Per fare questo, il nostro team ha utilizzato lo scanner Charlotte (Tringali et al., 2024), realizzando un modello 3D in formato DXF. Poi è necessario anche un modello 3D del terreno: per fortuna è possibile utilizzare i rilievi LiDAR (DTM Protezione Civile FVG passo 1 m) pubblicati dalla Regione Friuli Venezia Giulia (<https://irdat.regione.fvg.it/CTR/ricerca-cartografia/>), trasformandoli in un modello tridimensionale utilizzando QGIS. Una volta scaricata la porzione cartografica (sezione 109044\_NO), la si può caricare in un nuovo progetto QGIS tramite il menù *Layer/Aggiungi layer/Aggiungi raster*, selezionando il file in formato *asc* e utilizzando il sistema di riferimento *EPSG:3004*. Cliccando con il tasto destro sul livello appena importato e scegliendo la voce *Proprietà* si accede alla scheda *Stile* (oppure *Simbologia* in alcune versioni) ed è possibile indicare il tipo di visualizzazione come *Ombreggiatura*, *l'altitudine a 45°* e *l'azimuth a 315°*. Questo offre una visualizzazione più facilmente comprensibile.

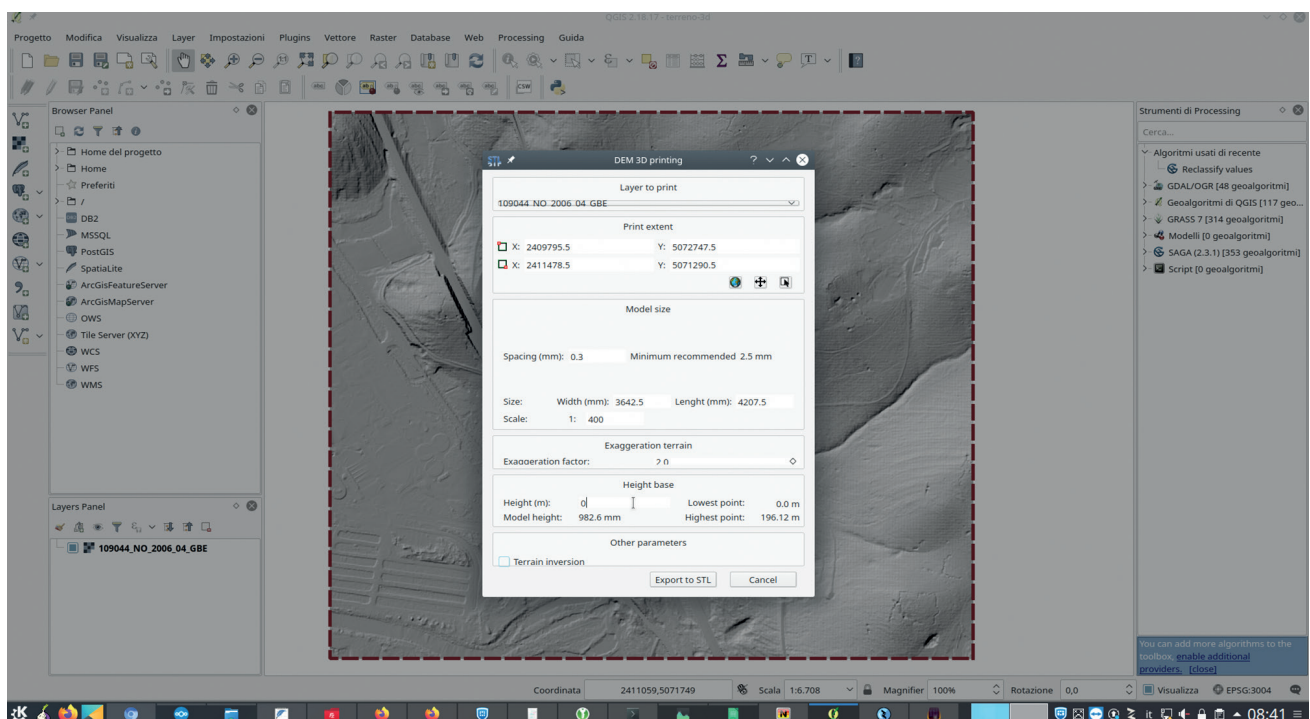


Fig. 1 - Con DEM to 3D si può esportare il modello 3D del terreno dal file .asc della cartografia regionale,

A questo punto è possibile caricare la pianta del rilievo ottenuto da Charlotte in formato KML (dal menù *Layer/Aggiungi layer/Aggiungi vettore*, selezionando il poligono e il sistema di riferimento *EPSG:4326*). Questo aiuterà ad avere un riferimento visivo per posizionare il modello 3D del pozzo su quello del terreno in Blender, quando entrambi i modelli saranno pronti. Per trasformare il livello del terreno in un file 3D vero e proprio serve un plugin chiamato *DEMto3D*, che può essere ottenuto tramite il menù *Plugins/Gestisci e installa plugin*. Una volta installato, nel menù *Raster* appare la voce *DEMto3d/DEM 3d printing* (Fig. 1). Si seleziona il livello raster che è stato importato dal file asc (un solo livello alla volta) e lo *spacing* tra i punti (circa 0,5-0,3mm per avere una buona definizione), oltre al *fattore di scala* (per esempio 1:400). Il rapporto tra fattore di scala e spacing porterà a un modello più o meno dettagliato: se si esagera si rischia di avere un modello troppo grande che consuma tutte le risorse del computer per essere caricato, ma se la risoluzione è troppo bassa si appiattiscono le depressioni meno marcate del terreno. Altro parametro da impostare è l'altezza di base (*height base*), che conviene sempre mantenere a 0 m. Cliccando su *Export to STL* si ottiene un modello 3D in formato STL, pronto da caricare in Blender.

Il file STL potrebbe anche già essere inviato a un servizio professionale di stampa in 3D, ma probabilmente conviene semplificare un po' il modello, riducendo il numero di triangoli che lo compongono per ridurre il costo. Per farlo in Blender si importa il file STL del terreno tramite il menù *File/Importa/Importa STL*. Selezionato l'oggetto relativo al terreno, si può andare nella scheda *Modifiers* e aggiungere un modificatore di tipo *Decimate* (Fig. 2): la modalità ideale è *Collapse* e si può iniziare con una *Ratio* di 0,1. In basso viene indicato il *face count* stimato, si possono modificare le impostazioni per cercare di ottenere un numero più basso.

È poi possibile caricare in Blender il modello 3D del pozzo prodotto da Charlotte (nel formato AutoCad DXF). Blender è in grado di utilizzare file DXF, ma l'opzione è nascosta di default. Per abilitarla è necessario andare nel menù *Edit/Preferences*, nella sezione *Get extensions*, e cercare *dxf*, installando il plugin per l'import dei *DXF*. Caricato il modello, lo si ritroverà centrato sull'origine, cioè il punto 0,0,0 in Blender.

Per allineare correttamente il pozzo e il terreno in Blender, ci si può aiutare con la posizione dell'ingresso del pozzo, visibile su QGIS (grazie al file KML della pianta). In QGIS è infatti possibile utilizzare lo strumento *Righello* (misura linea) per misurare la distanza dell'ingresso del pozzo dal

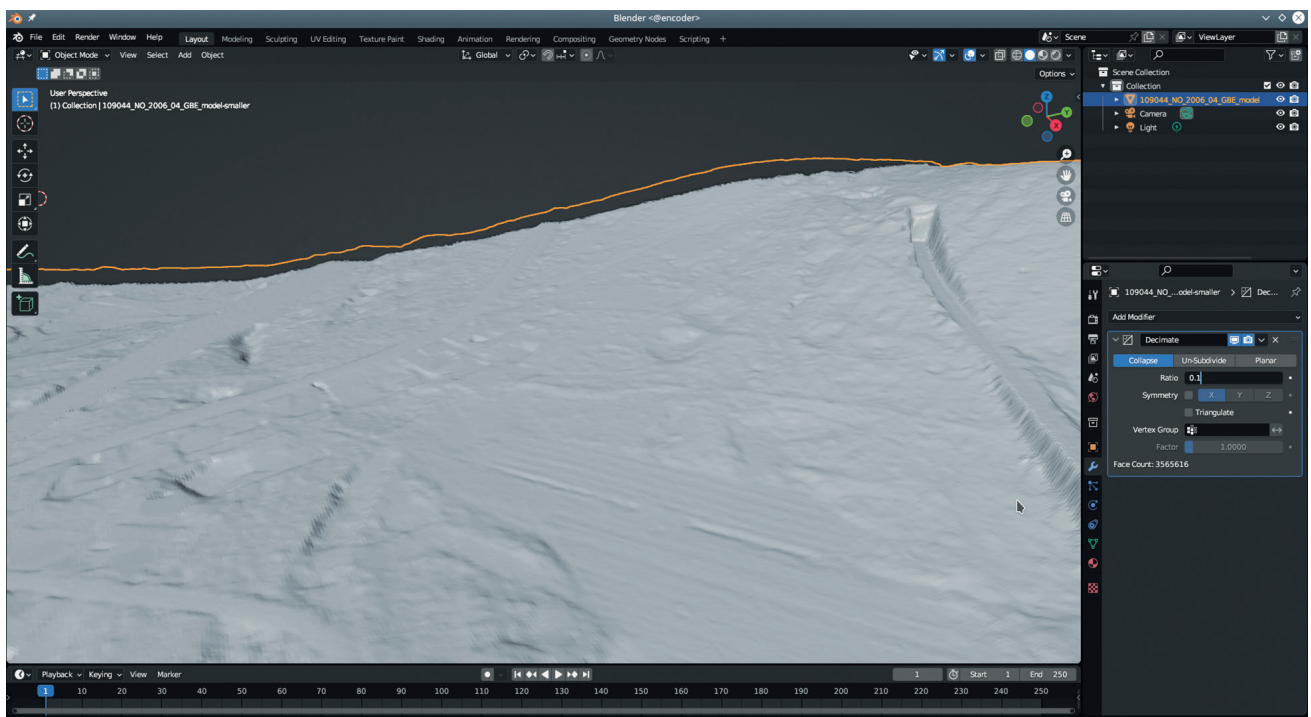


Fig. 2 - Caricamento del modello STL del terreno in Blender.

bordo sinistro e dal bordo inferiore del terreno. Si possono poi usare queste due coordinate per applicare una traslazione sul piano XY al modello del pozzo, in modo che il suo ingresso coincida con il punto corretto in base al fattore di scala. Per esempio, se secondo la scheda *Proprietà/Informazioni* del livello del terreno su QGIS la larghezza è di 1683 metri e in Blender il lato largo del terreno risulta misurare 674 metri, significa che il *fattore di scala* è 2,5. Il modello del pozzo importato dal file DXF è in scala 1:1, quindi bisogna applicare ad esso anche la trasformazione di scala, moltiplicando per 0,4 (1/2,5). L'angolo in basso a sinistra del terreno dovrebbe già coincidere con l'origine (il punto 0,0,0 in Blender), quindi basta applicare una traslazione al modello del pozzo tenendo in considerazione il fattore di scala. Se, per esempio, su QGIS l'ingresso del pozzo risulta essere a 1067 metri da sotto e 922 metri da sinistra e il modello del terreno è stato esportato in scala 1:400, il modello del pozzo dovrà essere traslato a 426 metri sull'asse Y e 368 metri sull'asse X (bisogna dividere per 2,5). È anche differente l'orientamento dei due modelli: il pozzo deve essere ruotato di 90° attorno all'asse Z.

Se poi l'obiettivo è stampare in 3D il modello del pozzo, è possibile utilizzare Blender per dare al modello un aspetto meno accurato ma più realistico, evitando i bordi squadrati. Questo è utile a maggior ragione se si sta utilizzando un rilievo prodotto con il DistoX e cSurvey che, diversamente da Charlotte, non registra le sezioni e offre un risultato ancora più squadrato. Nel progetto Blender è necessario aggiungere un oggetto di tipo *Volume*, dal menù *Add/Volume/Empty*. A questo oggetto si deve aggiungere il modificatore *Mesh to volume*, selezionando come oggetto di riferimento il modello del pozzo, aumentando il *Voxel amount* almeno a 1024 per avere maggiore definizione. Serve poi un altro modificatore, di tipo *Volume displace*, aggiungendo una nuova texture che deve essere di tipo *Clouds*. Ora è possibile aggiungere alla scena un oggetto di tipo *Cube* (un cubo) tramite il menù *Add/Mesh/Cube*, che va ridimensionato in modo che sia abbastanza grande da poter contenere il *Volume*. A questo cubo si aggiunge un modificatore di tipo *Volume to Mesh*, selezionando come oggetto di riferimento il *Volume* che era stato creato. Se si vuole stampare in 3D, il modello così ottenuto va prima pulito, per esempio entrando in *Edit mode* e scegliendo *Mesh/Separate/By Loose Parts*, per eliminare le parti non necessarie e procedere a decimare la mesh con il modificatore *Decimate* per rendere la stampa più efficiente.

Oltre che per la stampa in 3D di un modellino in scala, il progetto può essere animato direttamente in Blender per produrre un video divulgativo e raccontare meglio le proprie scoperte e attività speleologiche. È esattamente quanto il nostro team ha deciso di realizzare e presentare al convegno Speleo2025, pubblicando in seguito il video su YouTube (<https://www.youtube.com/watch?v=TGvJHfaifq0>). Per visualizzare il video è possibile inquadrare il QR code (Fig. 3) con un qualsiasi QR code reader direttamente con il proprio smartphone. Naturalmente, lo scopo primario è consentire agli speleologi di comprendere meglio come le cavità si sviluppino nel terreno circostante.

Con il modello 3D del pozzo e del terreno così ottenuto, è subito chiaro che il pozzo prende una direzione che lo porta perfettamente sopra la linea ferroviaria. Oggi la galleria ferroviaria del Lokavac è ancora in funzione sulla linea Monfalcone-Trieste, quindi non è possibile entrare e rilevarla. Tuttavia, grazie al modello 3D del terreno, è facile ipotizzare il tragitto, unendo con un arco le due estremità della galleria, perfettamente visibili. In seguito a una ricerca presso l'Archivio di Stato di Trieste è stato possibile scoprire la planimetria originale della galleria (Fig. 4), conservata nel fondo delle ferrovie austriache. Sono stati necessari alcuni anni perché l'archivio completasse il restauro del documento, ma l'attesa è stata ripagata dal fatto che la planimetria conferma la curvatura che si può intuire dal modello 3D e toglie ogni dubbio.



Fig. 3 - Il video realizzato con Blender per raccontare l'esplorazione di questi pozzi è caricato su YouTube.

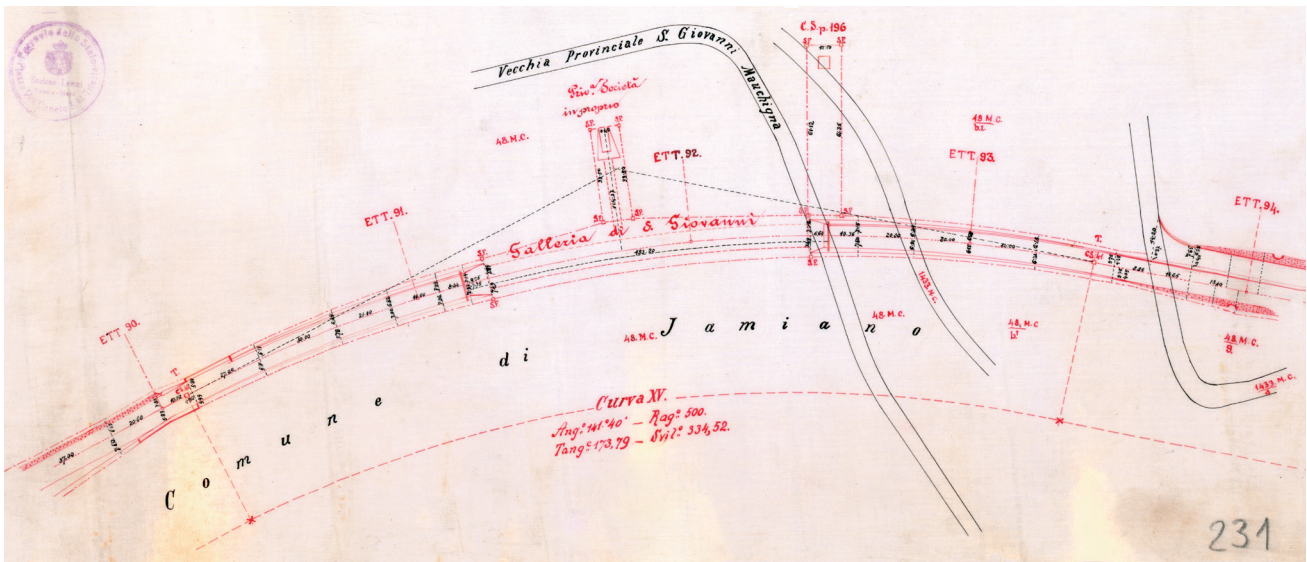


Fig. 4 - L'Archivio di Stato di Trieste conserva una bozza originale della planimetria della galleria ferroviaria.

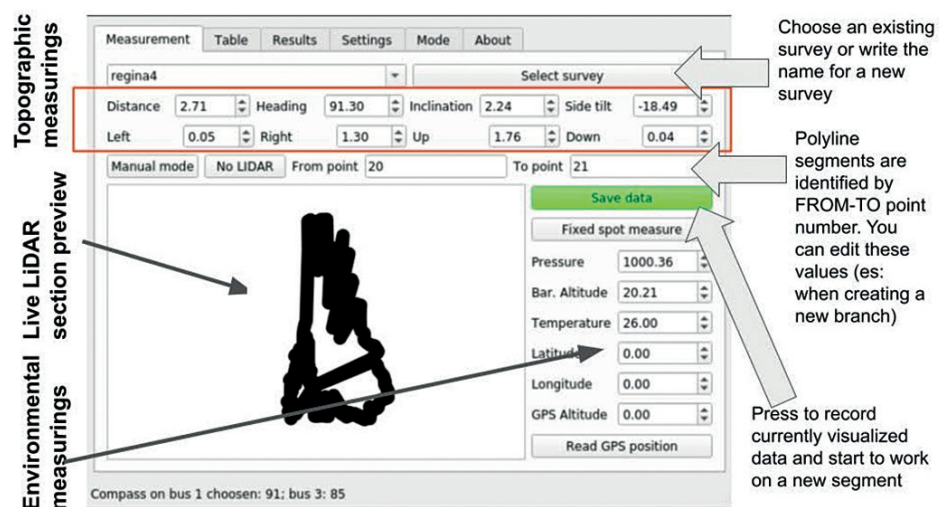


Fig. 5 - La modalità *Fixed spot measure* si attiva semplicemente cliccando il pulsante sullo schermo di Charlotte.

## Il secondo cammino

Avendo stabilito che il pozzo nel bunker è in realtà un cammino della galleria ferroviaria, il dubbio che rimane è se vi siano altri ambienti simili all'altra imboccatura della galleria. Sul lato orientale del tunnel non è presente nessun bunker, ma una lastra di cemento che a un certo punto si sostituisce inaspettatamente alla roccia carsica. Su questa lastra, un'apertura fornisce l'accesso a un pozzo che sembra avere una profondità e una direzione tali da terminare sopra i binari, esattamente come l'altro. Il problema che si è immediatamente presentato alla scoperta di questo secondo pozzo è la sua inagibilità: la lastra in cemento non è in buone condizioni, soprattutto proprio nei pressi della finestra che dà sul pozzo, e c'è un grave rischio che possano crollare dei pezzi se qualcuno provasse a calarsi in corda al suo interno. Ne consegue che l'esplorazione è impossibile. Per poter stabilire con sicurezza che anche questo sia un cammino della galleria, però, è necessario rilevarlo. Il nostro team ha quindi intuito la possibilità di sfruttare proprio lo scanner Charlotte per eseguire un rilievo senza la necessità di entrare nel pozzo (in un certo senso, un rilievo "da remoto").

La modalità *fixed spot*, cioè "misurazione punto fisso", si può attivare in Charlotte con l'apposito pulsante sullo schermo (Fig. 5). Quando è attiva, Charlotte si aspetta di procedere in linea retta, per esempio venendo calato dall'alto con una corda. In questa modalità Charlotte misura un primo punto, memorizzando la sua distanza dal fondo del pozzo. Questa distanza iniziale viene considerata la profondità totale del pozzo: da quel momento, ogni 5 secondi viene registrato un nuovo punto, e la sua distanza viene sottratta da quella iniziale. Questa differenza è la distanza tra i primi due punti. Se, infatti, la distanza dal fondo misurata nel primo punto è di 10 metri e quella del secondo

punto è di 8 metri, è evidente che la distanza tra i due punti è di 2 metri. Lo stesso meccanismo viene utilizzato per tutti i punti successivi, fino a che lo scanner viene recuperato e la modalità operativa torna a essere quella normale. Questo permette a Charlotte di produrre la tabella dei punti come per ogni altro rilievo: ogni punto, infatti, ha l'orientamento rispetto al Nord magnetico, l'inclinazione, la pendenza, la sezione completa e, grazie a questo calcolo, anche la distanza rispetto al punto successivo. Il risultato è un rilievo perfettamente identico a un qualsiasi altro rilievo prodotto in modo convenzionale.

Grazie a questa innovazione, il nostro team è riuscito a rilevare dettagliatamente il secondo pozzo sopra la galleria del Lokavac, semplicemente calando Charlotte dall'alto, con l'ausilio di due corde (per evitare l'eccessivo dondolamento che sarebbe stato prodotto dall'uso di una corda singola). Dopo avere inserito il modello 3D di questo pozzo nello stesso progetto Blender, seguendo gli stessi passaggi illustrati in precedenza, è diventato evidente che anch'esso termina perfettamente sopra i binari, ed è quindi un secondo camino della galleria ferroviaria.

### L'importanza storica dell'ambiente ipogeo

Il modello 3D completo del terreno, dei due pozzi e della galleria ipotizzata permette di avere una visione concreta della struttura reale di questo ambiente ipogeo artificiale (Fig. 6) e capire come venne utilizzato in passato. È infatti subito chiaro che originariamente i due camini dovevano servire a garantire il ricircolo d'aria nella galleria, in un periodo di treni a carbone, per evitare l'accumulo di monossido di carbonio. Dato il volume dei pozzi, è evidente che il passaggio d'aria che producevano doveva essere importante. È anche chiaro come in seguito, durante la Prima guerra mondiale, sia stato utilizzato per dare rifugio ai militari: i pozzi erano allestiti con delle impalcature in legno e la galleria poteva ospitare migliaia di persone.

Il fatto che sopra il bunker che sovrasta il pozzo occidentale vi sia un cippo commemorativo, seppure in stato di abbandono, conferma l'importanza di questo luogo per le vicende belliche. Un approfondimento sulle fonti storiche ufficiali, tuttavia, aggiunge un'informazione insospettabile: il cippo non è soltanto un semplice tributo al valore della brigata Valtellina, ma una lapide collettiva per ricordare le migliaia di soldati che hanno perso la vita in poche ore, una delle più gravi e meno note stragi della Grande Guerra sul fronte italiano.

All'alba del 3 settembre 1917, intorno alle 4:50, gli Austriaci interrompono un pesante bombardamento che coinvolge anche la zona della galleria ferroviaria del Lokavac. Ufficiali e soldati italiani sono ancora rifugiati dentro la galleria, al riparo dalle bombe. La fine del bombardamento significa che l'Esercito Austriaco sta per attaccare, quindi, gli Italiani dovrebbero organizzare la

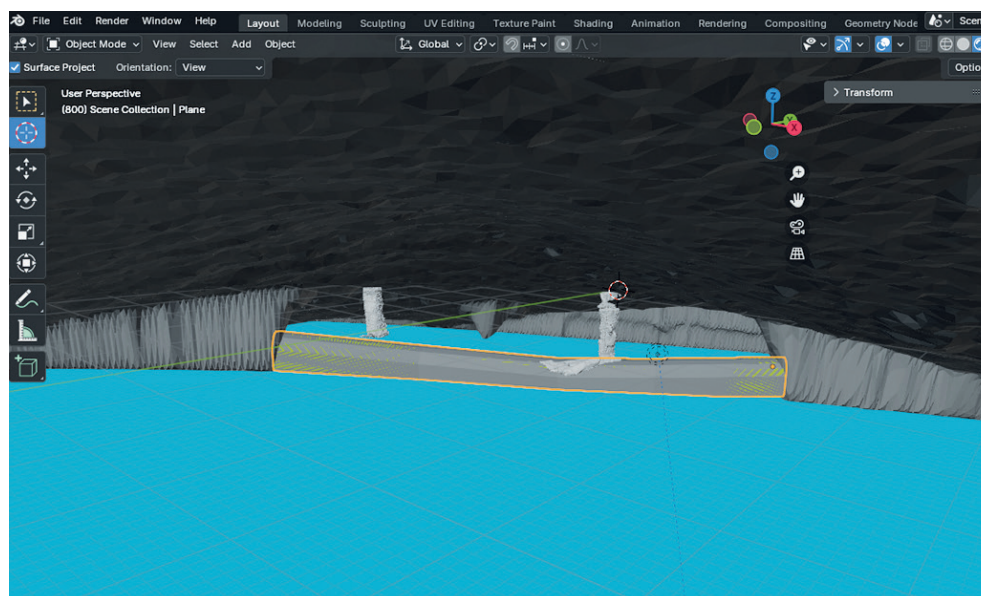


Fig. 6 - Vista sotterranea dei due modelli 3D dei pozzi ottenuti con Charlotte (bianco), assieme al modello 3D del terreno ottenuto dai dati LiDAR della Protezione Civile FVG (grigio) e al tracciato della galleria ferroviaria ipotizzato sulla base della bozza di progetto (delimitato in giallo). Sfondo colorato di azzurro, con griglia prospettica.

difesa: dalle testimonianze, tuttavia, sembra che l'ordine tardi ad arrivare. La brigata Valtellina inizia a uscire dalla galleria appena alle 5:45, ma è evidentemente troppo tardi: un reparto austriaco è già riuscito ad avvicinarsi abbastanza all'ingresso della galleria per lanciare delle bombe a mano al suo interno. Quello che i militari austriaci non possono immaginare è che proprio nei primi metri della galleria siano state lasciate delle casse di munizioni e del carburante. Una bomba a mano colpisce le casse di munizioni ed esplose innescando un enorme incendio. Secondo le testimonianze, sono sufficienti pochi secondi perché l'incendio raggiunga l'altra estremità della galleria ferroviaria e risalga anche i camini, rendendo impossibile persino la fuga verso l'alto. Migliaia di persone rimangono intrappolate in un ambiente completamente incendiato. Ora che è possibile visualizzare in 3D la struttura originale della galleria con i pozzi, è facile capire come la corrente d'aria abbia potuto alimentare tutto il materiale infiammabile al suo interno, lasciandolo bruciare per quasi due giorni.

Secondo l'Archivio dell'Ufficio Storico dello Stato Maggiore dell'Esercito, le vittime furono 2400 fra la truppa e 80 fra gli ufficiali (tra loro si conta persino il colonnello Piovano). Dai diari ufficiali della brigata le perdite ammonterebbero a 2900 persone. Una strage paragonabile, per numero di vittime, al più tristemente noto attacco con il gas del 29 giugno 1916 sul Monte San Michele. Ma con un'importante differenza: in questo caso la battaglia, di fatto, non era nemmeno iniziata, e i soldati hanno perso la vita a causa dell'eccessiva attesa prima di uscire dalla galleria e dell'errore nel posizionamento di materiale infiammabile, proprio dove poteva facilmente essere colpito. Forse anche per l'impossibilità di assegnare la responsabilità della tragedia al nemico, questo evento ha ottenuto pochissima notorietà. Per il nostro team è stato possibile riscoprirlo soltanto grazie alla fortuita scoperta di un pozzo difficile da rilevare con i metodi tradizionali.

## Conclusioni

La moderna tecnologia ci ha quindi consentito di riportare alla luce e inviare al catasto delle cavità artificiali dei manufatti ipogei che, fino a questo momento, non erano documentati. Oltre all'interesse prettamente speleologico, questi metodi di sviluppo di modelli 3D si sono dimostrati validi anche per la produzione di contenuti multimediali dedicati alla divulgazione. Il risultato è naturalmente molto meno dettagliato rispetto a quello che si può ottenere con strumenti professionali per le scansioni 3D. Tuttavia, la nostra soluzione si basa su hardware e software open source con un costo bassissimo: se le soluzioni professionali costano mediamente intorno ai 50.000€, assemblare Charlotte costa circa 350 € (TRINGALI et al., 2024). Inoltre, i modelli 3D professionali sono molto grandi e richiedono notevole potenza computazionale ed esperienza nella grafica tridimensionale. Il nostro team è invece composto da persone prive di esperienza professionale nella grafica e sia il modelling che l'animazione sono stati eseguiti su un singolo laptop del 2014 con processore Intel i3 e 8GB di RAM, dotato di Kubuntu Linux e software gratuiti (QGIS e Blender).

Se è quindi ovvio che per le grandi produzioni sia comunque consigliabile ricorrere ai servizi di una azienda specializzata in questo tipo di rilievi e nella manipolazione di grafica 3D, riteniamo che la tecnologia che abbiamo presentato possa aiutare le associazioni speleologiche a produrre contenuti divulgativi che, altrimenti, non potrebbero vedere la luce a causa della mancanza di fondi.

## Bibliografia

- AA, sd - *Fondo Ferrovie*. Archivio di Stato di Trieste. Numero pezzo: 232, p. 190.
- REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA, SERVIZIO SISTEMI INFORMATIVI, DIGITALIZZAZIONE ED E-GOVERNMENT - *DTM Protezione Civile FVG passo 1 m, anni 2006-2010*. Trieste. <https://irdat.regione.fvg.it/CTR/ricerca-cartografia/>.
- MINISTERO DELLA GUERRA, COMANDO DEL CORPO DI STATO MAGGIORE - UFFICIO STORICO, 1939 - *L'esercito nella grande guerra (1915-1918)*. Volume IV. *Le operazioni del 1917*. Tomo I° bis. *L'ampliamento*

*dell'esercito nell'anno 1917*. Gli avvenimenti dal gennaio al maggio. Archivio Ufficio Storico Stato Maggiore dell'Esercito. Istituto poligrafico dello Stato, Roma.

MINISTERO DELLA DIFESA, STATO MAGGIORE ESERCITO - UFFICIO STORICO, 1954 - *L'esercito nella grande guerra (1915-1918). Volume IV. Le operazioni del 1917. Tomo 2°. Gli avvenimenti dal giugno al settembre*. Archivio Ufficio Storico Stato Maggiore dell'Esercito, Istituto poligrafico dello Stato, Roma.

MINISTERO DELLA GUERRA, COMANDO DEL CORPO DI STATO MAGGIORE - UFFICIO STORICO, sd - *Diario ufficiale della brigata Valtellina*, Archivio Ufficio Storico Stato Maggiore dell'Esercito, Istituto poligrafico dello Stato, Roma.

TRINGALI L., CANCIANI G., DEBENJAK A. & TRIPARI T., 2024 - *Charlotte: a modern tool for cave surveying*. International Journal of Speleology, 53 (3): ijs2496. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.53.3.2496>.