

# ‘Patrimonio ipogeo’ e cultura dell’acqua a Palermo, metodologie digitali per la valorizzazione

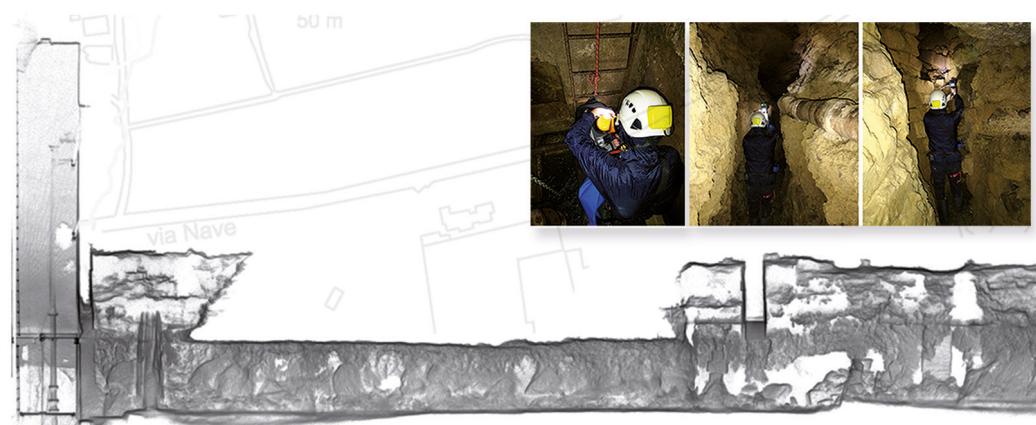
Francesco Di Paola  
Calogero Vinci

## Abstract

Lo studio si concentra sulle complesse e diffuse costruzioni sotterranee del cosiddetto ‘patrimonio ipogeo’, con particolare attenzione ai *qanāts*, sistemi idraulici costruiti nel corso dei secoli sotto il suolo di Palermo, che rappresentano un’affascinante testimonianza della cultura dell’acqua nella città antica. Attraverso un’analisi storica e tecnica, supportata dallo sviluppo di sistemi avanzati di misurazione, rappresentazione e visualizzazione tridimensionale, vengono illustrati i risultati di un progetto volto alla conoscenza e alla messa in sicurezza del ‘Corso Gesuitico alto’. Si tratta di una complessa rete di cunicoli sotterranei per la captazione e il trasporto dell’acqua, la cui esistenza è attestata almeno a partire dal XIV secolo, per la valorizzazione della quale lo studio presentato si pone anche l’obiettivo di renderli ‘accessibili’ al pubblico attraverso una fruizione virtuale. Si propone un flusso di lavoro metodologico e procedurale per l’acquisizione e l’analisi dei dati, accompagnato dalla navigazione virtuale 3D degli ambienti ipogeи esaminati. Durante la fase di rilievo integrato, è stata utilizzata, tra le tecnologie innovative, la tecnica SLAM con dispositivo WMLS. Inoltre, una piattaforma di realtà virtuale basata sul motore *UnReal* consente agli utenti di esplorare in modo immersivo le cavità antropiche, arricchendo l’esperienza con infografiche interattive che ne migliorano la comprensione durante la visita virtuale.

## Parole chiave

Patrimonio edilizio sotterraneo, *qanāt*, SLAM, digitalizzazione 3D, visualizzazione 3D, ricostruzioni virtuali.



Scansione 3D del ‘Corso Gesuitico alto’ con tecnologia SLAM.

## Introduzione

Le politiche per la valorizzazione, la tutela e la conservazione del ‘patrimonio ipogeo’ risultano spesso complesse da applicare a causa della limitata conoscenza delle strutture ipogee e delle specificità del ‘costruire sottoterra’. Questa carenza è legata a una documentazione frammentaria e incompleta, causata dalla mancanza di studi multidisciplinari coordinati su un’unica tipologia di contesto e dalla tendenza a considerare le scoperte come eventi isolati. Inoltre, l’accesso difficoltoso alle architetture sotterranee, la loro complessità strutturale e le questioni legate alla sicurezza richiedono piani di esplorazione accurati e ben strutturati.

È ormai consolidato che l’approccio alla ricerca nei processi di digitalizzazione finalizzati alla tutela, alla conservazione, debba richiedere specifica formazione, e linee di sviluppo che riconoscano il carattere multidisciplinare, anche, in un’ottica di sostenibilità sociale, economica e ambientale. Le linee guida internazionali, come quelle delineate nella Carta di Atene e, più recentemente, nella Carta di Cracovia, sottolineano l’importanza di un approccio scientifico e multidisciplinare nella conservazione e valorizzazione del patrimonio culturale.

In ambito progettuale, per avviare azioni di valorizzazione e promozione del Patrimonio culturale, le linee programmatiche del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), incentivano interventi volti a migliorare capacità attrattiva, sicurezza e accessibilità dei luoghi identitari [1]. L’impiego dei più innovativi strumenti tecnologici utili alla conoscenza, rappresentazione e comunicazione contribuisce a recuperare e salvaguardare le tracce più profonde della ‘memoria’ del passato.

Focalizzando l’attenzione sul patrimonio storico costruito nel sottosuolo, sempre più risorse progettuali vengono impiegate per interventi di riutilizzo e rigenerazione sostenibile di siti culturali aventi un’identità distintiva. Gli artefatti del patrimonio ipogeo, rappresentano importanti testimonianze e potenziali motori dei processi di sviluppo sociale ed economico all’interno delle comunità a cui appartengono. Inoltre, negli ultimi anni, l’aumento di disseti causati da attività antropiche in aree urbane e le difficoltà nell’interpretare tali fenomeni evidenziano l’urgenza di avviare studi specialistici volti a comprendere meglio le strutture storiche ipogee. Alcune associazioni come l’Unione Internazionale di Speleologia (UIS), la Società Speleologica Italiana (SSI) e il Consiglio Nazionale delle Ricerche d’Italia (CNR) hanno avviato un processo di definizione di una classe di appartenenza internazionale, introducendo alcuni criteri distintivi di classificazione di specifici manufatti storici costruiti nel sottosuolo.

Di recente, in letteratura si è introdotta la denominazione: *Underground Built Heritage* (UBH) [Varriale 2021], ma questa non è ancora considerata una classe distintiva, condivisa e riconosciuta dall’UNESCO. Il concetto di *Underground Built Heritage* è quindi ricondotto a tre presupposti: il manufatto deve essere espressione significativa della cultura materiale o immateriale dell’ambiente che l’ha generata (patrimonio); deve essere il prodotto di una costruzione o trasformazione antropica consapevole (costruito), deve essere posizionato al di sotto del piano di campagna soprastante (ipogeo).

In questa sede si descrivono alcuni risultati di una ricerca più ampia, orientata alla riscoperta e alla messa a sistema di tutti gli elementi superstiti, visibili e invisibili, epigei e ipogeи del sistema storico di gestione dell’acqua, in sinergia con la Soprintendenza e con il supporto logistico del Gruppo Speleologico CAI di Palermo. Da una prima fase di reperimento di fonti (indagini archivistiche, ricerche documentali e iconografiche, compresi grafici progettuali e rilievi), si evince che le informazioni morfometriche dei luoghi di interesse sono frammentarie e condotte con metodologie di rilievo diretto; necessita di un’implementazione di dati in grado di monitorare nel tempo le articolate strutture ipogee, per avviare strategie di conoscenza, conservazione e messa in sicurezza [Cristiano 2017].

Nello specifico si descrivono i cosiddetti *qanāts* [Todaro 1988; Vinci 2018], funzionali all’approvvigionamento idrico presente nella Piana di Palermo. Questi artefatti architettonici sono attestati a partire dal XIV secolo, ma non si esclude una datazione più alta. Le complesse e diffuse costruzioni sotterranee costituiscono la parte invisibile, e per tale ragione più vulnerabile, dell’articolato sistema che per secoli ha consentito l’approvvigionamento di

risorse materiali della città. Il sistema di trasporto e gestione delle acque ha contribuito alla creazione di un originale paesaggio idraulico, con evidenti richiami alla cultura mediorientale. Questo sistema, oggi documentato attraverso una rete frammentaria di circa 20 km, risulta ancora solo parzialmente esplorato e studiato. Esso faceva parte di un complesso più ampio, che comprendeva anche le cosiddette 'stanze dello Scirocco', ambienti utilizzati nelle ville dell'aristocrazia palermitana tra il XVI e il XVIII secolo, situate nella 'Conca d'Oro' attorno al centro storico.

Nel tempo, questo patrimonio idraulico è stato in parte distrutto dalla costruzione della città moderna, spesso realizzata senza considerare la presenza delle strutture sotterranee [2]. Di conseguenza, le sue tracce superstiti sono oggi estremamente vulnerabili e necessitano di interventi di valorizzazione e conservazione.

Grazie ad analisi storiche e costruttive, unite all'utilizzo di tecnologie innovative per la misurazione, rappresentazione e visualizzazione 3D, sono stati avviati i primi interventi multidisciplinari per riscoprire e sistematizzare i frammenti visibili e invisibili di questa rara e preziosa testimonianza dell'antica cultura idrica siciliana [Beraldin et al. 2011]. Queste iniziative hanno anche permesso di rendere accessibile virtualmente il patrimonio a persone con disabilità, che altrimenti non potrebbero visitare i siti ipogei.

### Il caso studio

I *qanāts*, diversamente dagli acquedotti, assolvono sia alla funzione di captazione che a quella di trasporto dell'acqua in superficie. Negli ultimi anni, l'interesse crescente verso le costruzioni ipogee ha permesso di individuare somiglianze e caratteristiche uniche in numerosi manufatti, sia già noti sia scoperti di recente, inserendoli in un contesto geografico, culturale e temporale più ampio. Un contributo significativo in tal senso è stato offerto dalle traduzioni e pubblicazioni di antichi testi arabi e persiani, in precedenza poco accessibili per barriere linguistiche [Ferriello 2006] [3]. I trattati riportano che la cultura tecnica dell'epoca era frutto di un'ibridazione tra tradizioni mediorientali e occidentali, come confermano i riferimenti, sebbene indiretti, alla cultura greca e romana (fig. 1).

Il caso studio presentato, la rete di canali denominata 'Gesuitico alto' nel Fondo Micciulla a Palermo, costituisce un'intricata infrastruttura sotterranea composta da gallerie scavate nella roccia o rivestite con conci squadrati. Essa si sviluppa su tre livelli distinti, differenziati per profondità, tipologie e tecniche costruttive, probabilmente in risposta al progressivo abbassamento del livello dell'acqua. Questo fenomeno richiese scavi sempre più profondi per intercettare la falda, e nei casi di rapido abbassamento del livello dell'acqua – come dopo il terremoto del 1693 – si preferì scavare nuovi canali a livelli inferiori, adottando tecniche differenti. Generalmente, nelle costruzioni ipogee, il livello più superficiale (livello 1) risulta essere il più antico. Questo segmento si estende per circa 155 m verso nord e 77 m verso sud, a una profondità di circa 6 m. La sezione delle gallerie varia notevolmente in larghezza, altezza e forma.

Una parte significativa di queste strutture è stata riempita con materiali di ipogeo provenienti dai livelli inferiori. Il secondo livello si trova a una profondità di 8,50 m, con una lunghezza di circa 110 m. Le sue gallerie hanno una sezione rettangolare, un'altezza variabile e pareti prive di rivestimento. Il terzo livello, a una profondità di 10 m, si estende per 502 m e si sovrappone parzialmente al primo livello. La notevole differenza di altezza nei diversi tratti di uno stesso livello può essere giustificata dal fatto che, quando il tracciato del nuovo canale da scavare si sviluppava al di sotto di un tratto di un canale già esistente, i due livelli venivano uniti in un'unica sezione con un'altezza compresa tra 2,50 e 3 m. Il percorso delle gallerie dei livelli 1 e 2 presenta leggere tortuosità per evitare gli ammassi rocciosi più compatti, mentre il livello 3 si distingue per lunghi tratti rettilinei, ottenuti demolendo anche le rocce più dure. Ciò evidenzia tecniche di ipogeo e costruzione più avanzate, confermate dalla presenza di numerose sezioni rivestite con conci di calcarenite posti a secco e distanziati con zeppe di pietra in modo da incrementare lo spessore dei giunti e favorire il passaggio dell'acqua proveniente dalle sorgenti dietro al muro di rivestimento all'interno del canale [4]. La copertura, nelle sezioni rive-

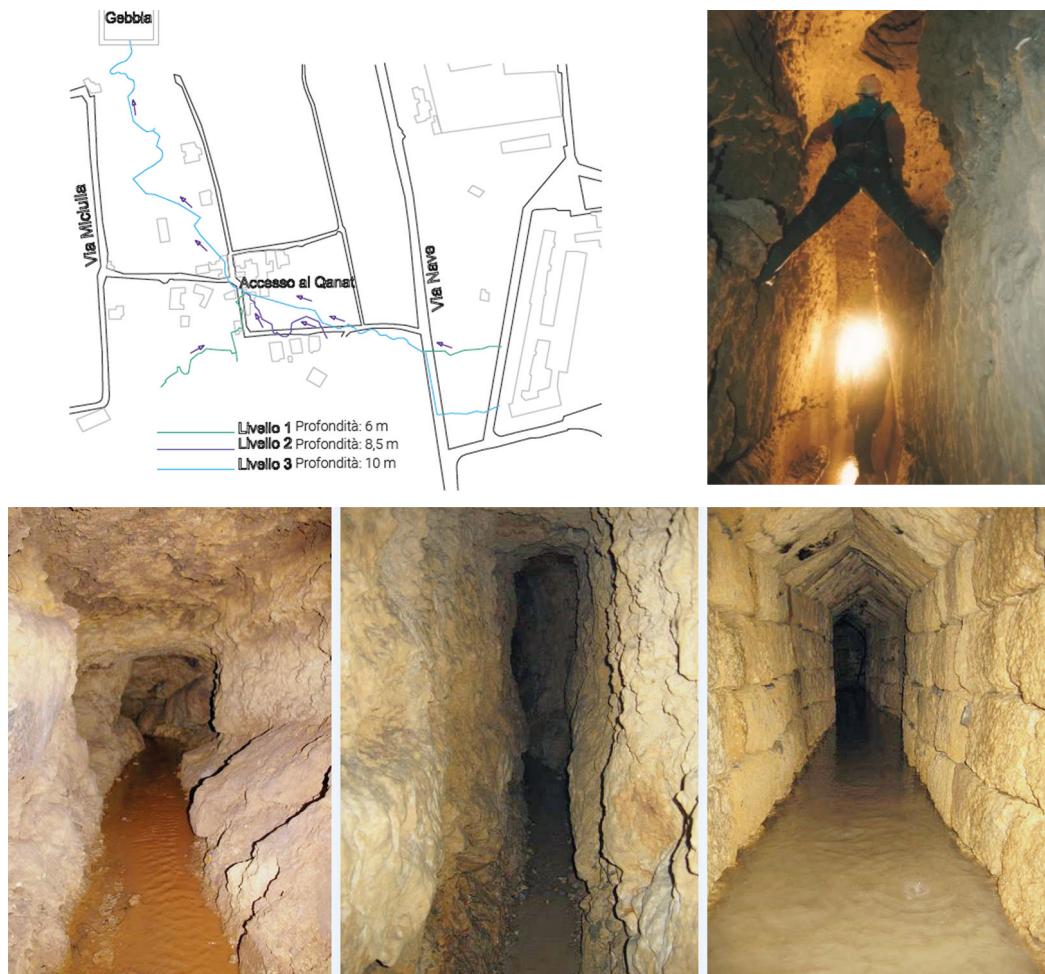


Fig. 1. 'Corso Gesuitico Alto'. In alto a sinistra, schema planimetrico; a destra, ispezione qanāt. In basso, morfologia sezioni Livello 1, Livello 2 e Livello 3.

stite, è realizzata con la tecnica della 'bocca di forno', in cui due conci inclinati formano un profilo triangolare. Questa configurazione stabilizza le pareti laterali e consente di accumulare i materiali di ipogeo sopra il solaio, riducendo i costi e i disagi legati al loro trasporto fuori dalla galleria. Il 'Corso Gesuitico alto' conserva molti elementi caratteristici: la fossa per la 'senia' alla fine del livello 2; le fosse di aerazione seriali; un repertorio di 'catusi' (tubi con conci troncoconici in laterizio) di diverse dimensioni; sistemi di sbarramento e numerosi interventi storici di restauro e di consolidamento.

#### **Analisi, ricostruzione congetturale, iter metodologico**

Dalla fase iniziale di raccolta delle fonti, emerge che le informazioni morfometriche sui luoghi di interesse sono parziali e frammentate per singoli profili trasversali, fino ad adesso, ottenuti mediante metodologie di rilevamento diretto, condotte con triplometro e livella laser. L'attuale documentazione grafica consultata ha permesso di approfondire le tipologie costruttive, ma necessita di un'implementazione di informazioni, in grado di supportare processi decisionali per pianificare azioni di intervento per la gestione del sito.

Lo studio avvia una sperimentazione di un flusso procedurale di acquisizione dati, analisi e successiva navigazione virtuale 3D in modalità tour virtuale, per ottenere uno scenario realistico del sistema architettonico ipogeo da consultare, interrogare e implementare con indicazioni eterogenee [Kalay, Kvan, Affleck 2007]. Un'ulteriore finalità, che

incentiva la divulgazione del Bene, è determinata dalla possibilità di condurre un'esperienza di navigazione gaming, con il supporto di dispositivi VR e AR, anche a utenti con disabilità fisiche o percettive o patologie particolari.

L'indagine ha approfondito il livello 2 dell'architettura ipogea dei *qanāt* Gesuitico alto, mai rilevato con sistemi di ultima generazione. Di seguito, si descrivono gli step principali del processo metodologico sperimentato e le considerazioni che hanno determinato le impostazioni dei parametri e le strategie di indagine (fig. 2).

La campagna di rilevamento avviata all'interno degli ambienti sotterranei ha come finalità quella di acquisire ad alta risoluzione una mappatura 3D delle complesse superfici geometriche in modalità non invasiva, impiegando tecniche idonee ad affrontare le numerose sfide logistiche insite nella natura dei sistemi ipogei, con spazi chiusi e di difficile accesso: presenza di umidità, aree ristrette e anguste, mancanza di luce, assenza di segnale GPS, impossibilità di stare in piedi o di effettuare rilievi ecc. [Zlot et al. 2013; Roncat et al. 2011].

Il sistema, testato per l'indagine del caso studio, appartiene alla categoria dei laser mobili indossabili (VMLS) ed è lo Zeb Horizon. Questo sistema indossabile combina la tecnologia di scansione laser (scanner laser a differenza di fase) e un'unità di misura inerziale (IMU) in un'apparecchiatura portatile che può essere gestita da un operatore mentre cammina sul sito. Il sensore acquisisce nuvole di punti in movimento utilizzando algoritmi di localizzazione e mappatura simultanea (SLAM) [Bosse, Zlot, Flick 2012; Di Filippo et al. 2018] senza la necessità di un supporto del sistema globale di navigazione satellitare (GNSS).

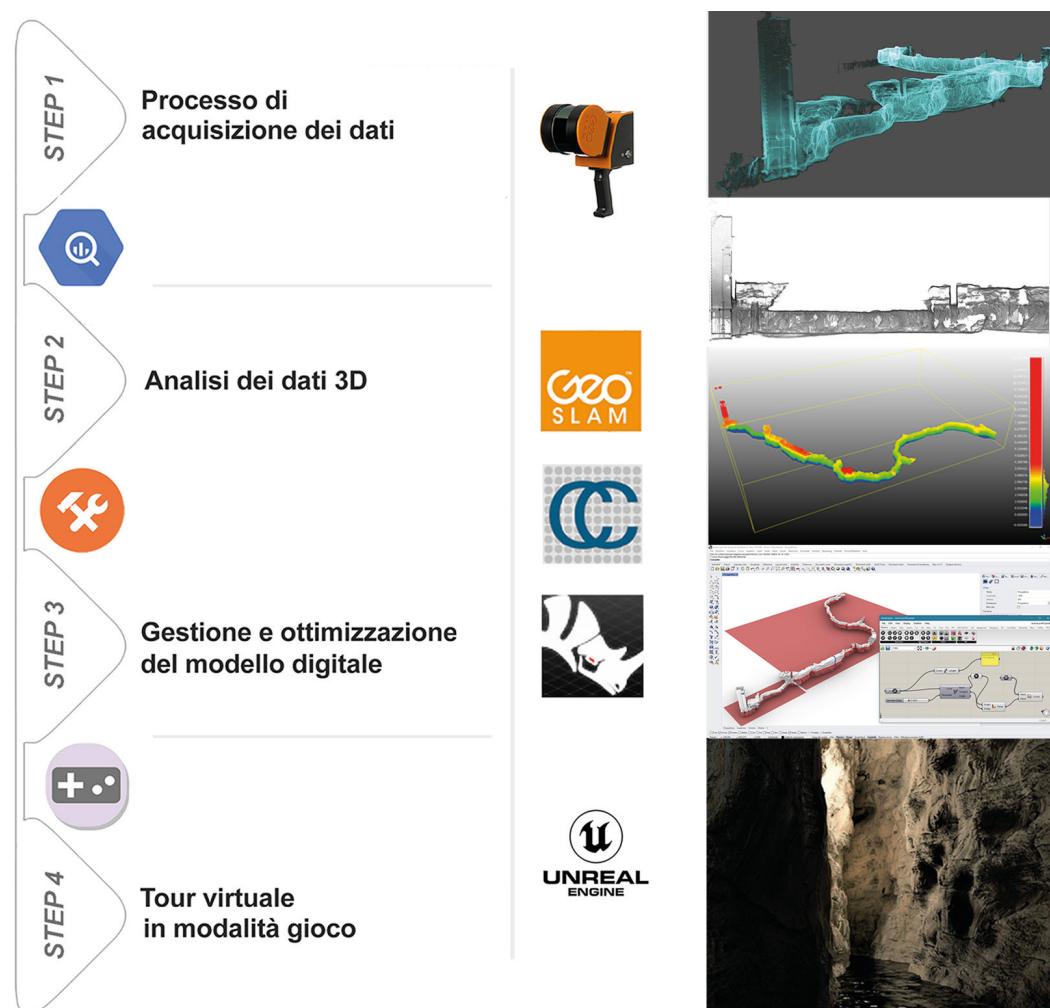


Fig. 2. Processo metodologico e iter procedurale di analisi e gestione dati.

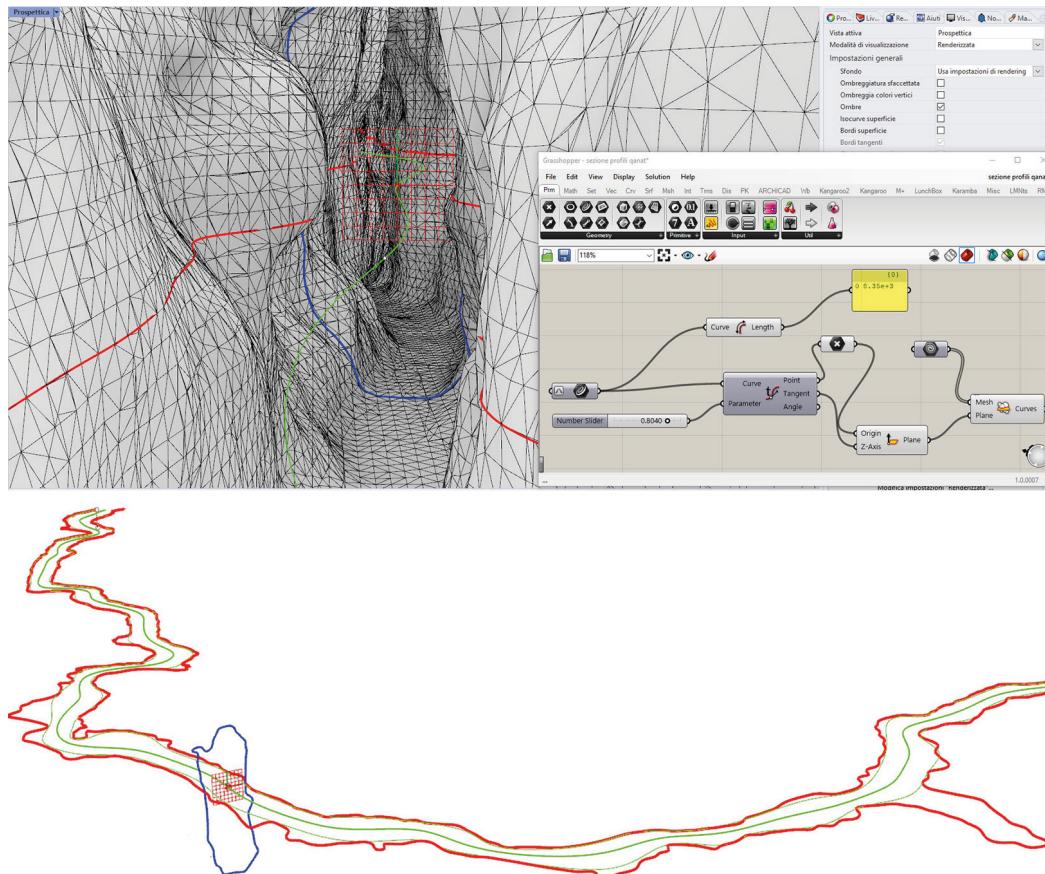


Fig. 3. Definizione parametrica di estrazione e restituzione grafica dei profili di sezione trasversali.

Le caratteristiche morfologiche e materiche hanno imposto la progettazione di una campagna di rilevamento che tenesse in considerazione diversi parametri, che avrebbero influenzato la qualità finale della nuvola di punti 3D: identificazione delle aree critiche; caratteristiche della traiettoria; previsione del percorso e della chiusura del loop; velocità di movimento; tempo impiegato per ottenere la nuvola di punti 3D; densità della nuvola di punti [Lagüela et al. 2018].

Il rilevo integrato con tecniche laser scanning SLAM e fotogrammetriche ha permesso la consultazione di un modello geometrico ad alta densità informativa indispensabile per avviare strategie di conoscenza delle differenti tipologie costruttive e materiche, di conservazione e di messa in sicurezza. Il processo è stato sviluppato seguendo i canonici step di: elaborazione della nuvola di punti (acquisizione, segmentazione, calcolo delle distanze, calcolo delle normali, ottimizzazione); esportazione di questa per la costruzione del modello geometrico poligonale mesh; estrazione e restituzione grafica di profili vettoriali di sezioni trasversali e ortogonali a una traiettoria mediana all'interno del condotto ipogeo. Le procedure metodologiche hanno richiesto l'impiego di strumenti specifici presenti in noti software di gestione quali: GeoSLAM, CloudCompare; EGS Leios, Rhinoceros, Grasshopper, Unreal, 3DVista (figg. 3, 4). L'interfaccia predisposta, all'interno dell'ambiente *UnReal Engine* (di Epic Games), consente la navigazione in due modalità di interazione. La prima permette di georeferenziare il modello 3D con infografiche e documentazione 2D (immagini, foto d'archivio, diagrammi e disegni), attraverso tag di riferimento, associati al modello geometrico del *qanāt*. L'utente può interagire con il contesto ambientale implementato con infografiche eterogenee [Di Paola, Inzerillo, Alogna 2019]. La seconda modalità permette all'utente di immergersi in uno scenario realistico e di navigare all'interno del *qanāt* in modalità gioco, simulando, ad esempio, la luce del cappello protettivo (figg. 5-7).

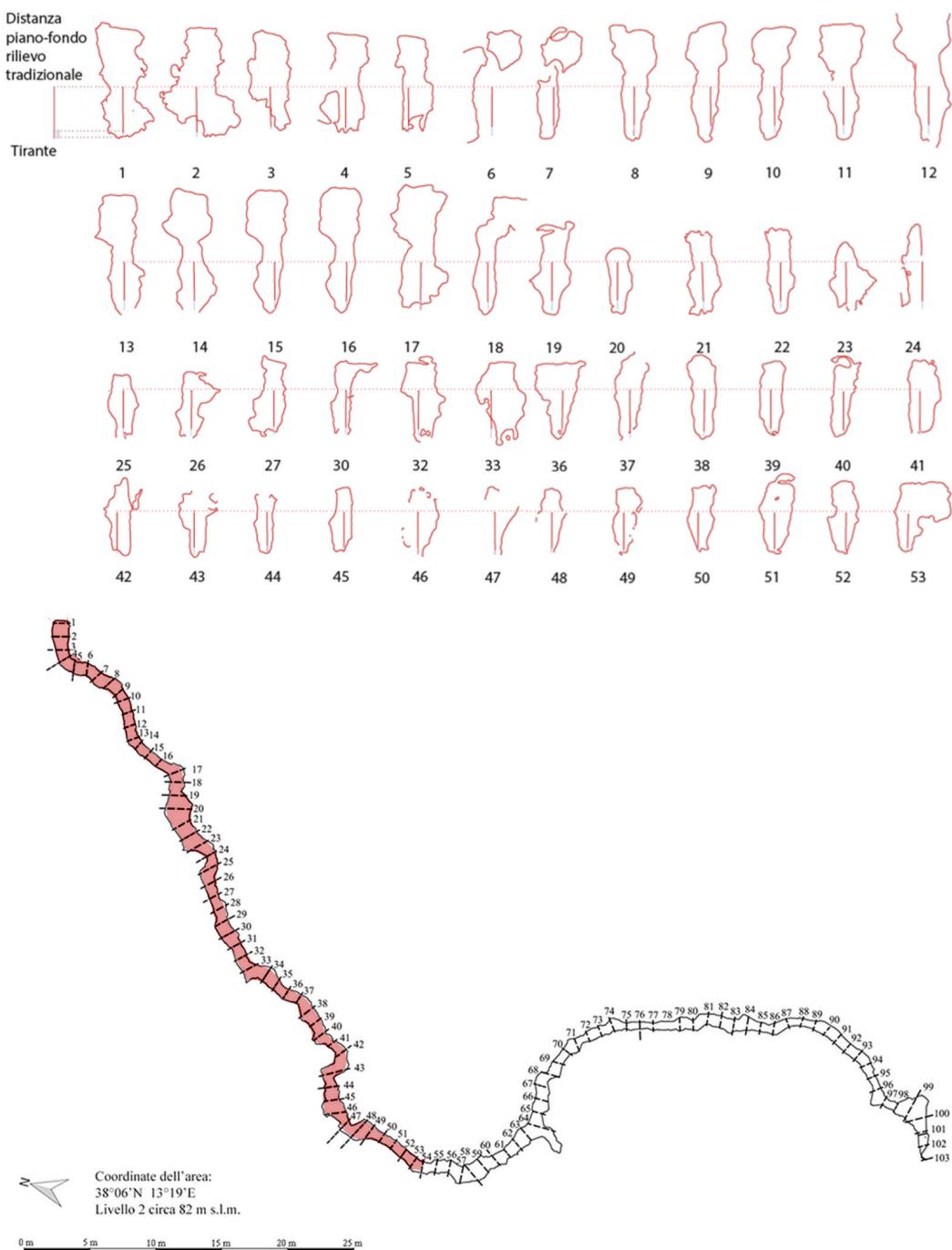


Fig. 4. Restituzione grafica delle sezioni del qanat in pianta e in prospetto.

## Conclusioni

Nel corso del XX secolo, la mancanza di manutenzione e la perdita di interesse per il patrimonio edilizio ‘invisibile’ e per l’antico sistema di approvvigionamento idrico di Palermo – considerato antigienico – hanno cancellato fisicamente, e persino dalla memoria, l’esistenza di molti edifici ipogei. Oggi un nuovo interesse sembra emergere dagli studi prodotti negli ultimi anni. Questi studi indirizzano verso un recupero che tenga conto, ove possibile, della possibile riabilitazione della funzione originaria e che

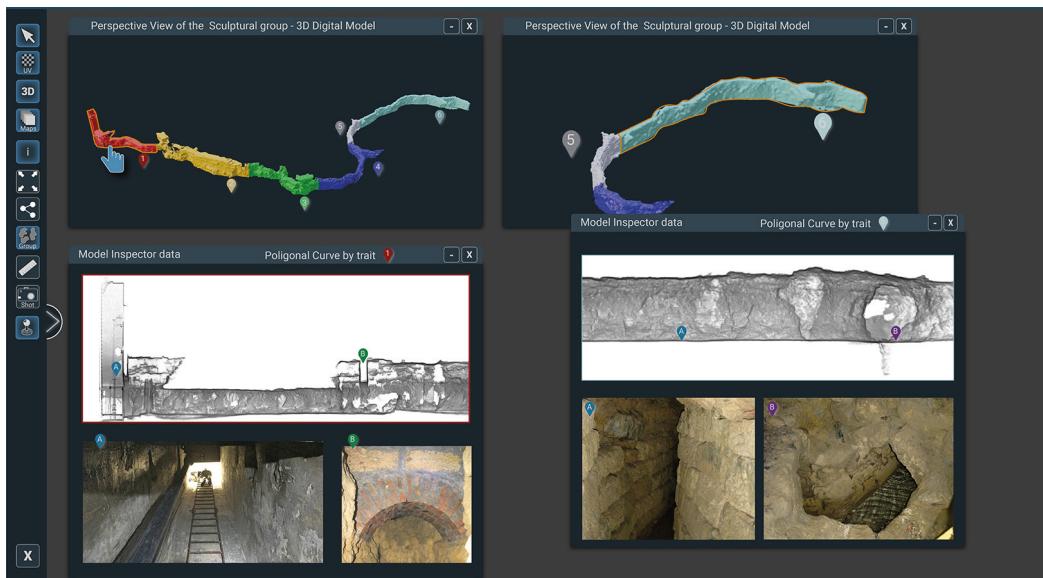


Fig. 5. Interfaccia *UnReal Engine*, modalità di navigazione integrata. Georeferenziazione del modello 3D con infografiche e documentazione 2D, attraverso tag di riferimento.

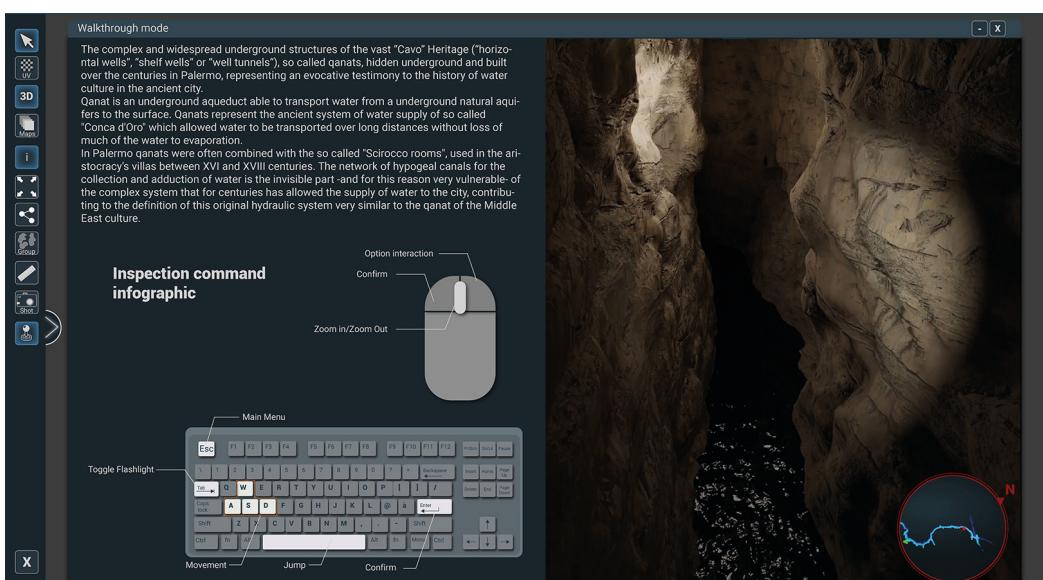


Fig. 6. Interfaccia *UnReal Engine*, modalità di navigazione di gioco all'interno del qanāt.



Fig. 7. Tour virtuale in modalità di navigazione street view con visore. Rilievo fotografico con Matterport.

porti a una valorizzazione di questo patrimonio come risorsa, anche in un'ottica di uso sostenibile. Anche se meno facili da visitare, i *qanāts*, in particolare il 'Gesuitico Alto', costituiscono un'ulteriore attrattiva per molti utenti, semplicemente affascinati dalla somiglianza con la cultura mediorientale, e per gli studiosi di diverse discipline, che vedono convergere i loro interessi intorno al tema del rapporto tra città e acqua. Rispetto a questo tema, la valorizzazione è orientata alla riscoperta e alla sistematizzazione di tutti gli elementi superstiti, visibili e invisibili, del 'sistema' storico di gestione delle acque a Palermo che, spesso, alimentava le peschiere di molti palazzi normanni.

#### Crediti

Nel presente contributo, di cui gli autori hanno condiviso l'impianto metodologico, Francesco Di Paola e Calogero Vinci hanno redatto i paragrafi: *Introduzione e Conclusioni*; Calogero Vinci ha redatto il paragrafo *Caso studio* e Francesco Di Paola ha redatto il paragrafo *Analisi, ricostruzione congetturale, iter metodologico*.

#### Ringraziamenti

Gli aAutori ringraziano:

- Microgeo Srl ([www.microgeo.it](http://www.microgeo.it)), che ci ha fornito il sistema *ZEBHorizon*;
- Speleo Team CAI Palermo, che da anni collabora con la Soprintendenza per i beni culturali e ambientali per l'esplorazione dei *qanāt* per il supporto logistico-scientifico e la preziosa assistenza nella campagna di misura;
- Il gruppo di ricerca del Progetto "iHeritage\_ITC Mediterranean Platform for UNESCO Cultural Heritage" (B\_A.2.I\_0056), finanziato dal Programma ENI CBC MED 2014-2020.

#### Note

[1] *Missione 1: Digitalizzazione, Innovazione, Competitività, Cultura e Territorio*. Tra i 17 obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile dell'Agenda 2030, sottoscritta nel 2015 da 193 Paesi delle Nazioni Unite e approvata dall'Assemblea Generale dell'ONU, il *Goal 11: Città e Comunità Sostenibili*, tra target previsti nell'ambito (target 11.4), mira a rafforzare gli impegni per proteggere e salvaguardare il patrimonio culturale e naturale del mondo.

[2] Il riconoscimento della Palermo multiculturale, sancito dall'inserimento nel 2015 del 'percorso arabo-normanno' nella lista dei patrimoni dell'umanità UNESCO, ha, inoltre, favorito un incremento significativo dei visitatori nei siti ipogei, in particolare in alcuni *qanāts* ancora accessibili.

[3] Tra questi spicca l'edizione curata da Giuseppina Ferriello del trattato tecnico-scientifico di Al-Karaji, *L'estrazione delle acque nascoste*, che ha reso noto il lavoro del matematico e ingegnere persiano vissuto intorno all'anno 1000 [Ferriello 2006].

[4] Le pareti e le coperture delle gallerie rivestite sono realizzate con conci a secco, una soluzione che garantisce stabilità ai terreni meno resistenti e, al contempo, favorisce il drenaggio dell'acqua infiltrata, aumentando così la portata della galleria.

### Riferimenti bibliografici

- Beraldin, J.A., Picard, M., Bandiera, A., Valzano, V., Negro, N. (2011). Best Practices for the 3D Documentation of the Grotta dei Cervi of Porto Badisco, Italy. In *Proc. SPIE*, vol. 7864, pp. 78640J-78640J-15.
- Bosse, M., Zlot, R., Flick, P. (2012). Zebedee: Design of a spring-mounted 3-d range sensor with application to mobile mapping. In *IEEE Trans. Robot.*, 28, pp. 1104-1119.
- Cristiano, M. (2017). La conoscenza del sottosuolo di Napoli per la mitigazione del rischio di crolli e dissesti. In *Proceedings of Colloqui.AT.e. Demolition or reconstruction*. Monfalcone: EdicomEdizioni.
- Di Filippo, A., Sánchez-Aparicio, L.J., Barba, S., Martín-Jiménez, J.A., Mora, R., González Aguilera, D. (2018). Use of a Wearable Mobile Laser System in Seamless Indoor 3D Mapping of a Complex Historical Site. In *Remote Sensing MDPI*, 10 (12). <https://doi.org/10.3390/rs10121897>.
- Di Paola, F., Inzerillo, L., Alogna, Y. (2019). A gaming Approach for Cultural Heritage knowledge and dissemination. In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W15, pp. 421-428. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-421-2019>.
- Ferriello, G. (2006). *L'estrazione delle acque nascoste. Scientific and technical treatise di Karaji*. Torino: Kim Williams Books.
- Kalay, Y., Kvan, T., Affleck, J. (2007). *New Heritage: New Media and Cultural Heritage*. London: Routledge.
- Lagüela, S., Dorado, I., Gesto, M., Arias, P., González-Aguilera, D., Lorenzo, H. (2018). Behavior Analysis of Novel Wearable Indoor Mapping System Based on 3D-SLAM. In *Sensors*, 18, 766. <https://doi.org/10.3390/s18030766>.
- Lehtola, V.V., Kaartinen, H., Nüchter, A., Kaijaluoto, R., Kukko, A., Litkey, P., Honkavaara, E., Rosnell, T., Vaaja, M.T., Virtanen, J.-P. (2017). Comparison of the selected state-of-the-art 3D indoor scanning and point cloud generation methods. In *Remote Sens.*, 9, 796.
- Roncat, A., Dublyansky, Y., Spotl, C., Dorminger, P. (2011). Full-3D surveying of caves: A case study of Marchenhöhle (Austria). In *Proc. IAMG2011 Conference*, pp. 1393-1403.
- Todaro, P. (1988). *Il sottosuolo di Palermo*. Palermo: Dario Flaccovio Editore.
- Varriale, R. (2021). "Underground Built Heritage": A Theoretical Approach for the Definition of an International Class. In *Heritage*, 4, no. 3, pp. 1092-1118. <https://doi.org/10.3390/heritage4030061>.
- Vinci, C. (2018). Il patrimonio "cavo". Architetture ipogee e spazio idraulico nella piana di Palermo. In *ReUSO 2018. L'intreccio dei saperi per rispettare il passato, interpretare il presente, salvaguardare il futuro*, pp. 997-1004. Roma: Gangemi Editore.
- Zlot, R., Bosse, M., Greenop, K., Jarzab, Z., Juckles, E., Robert, J. (2013). Efficiently capturing of large, complex Cultural Heritage sites with a handheld 3D mobile laser mapping system. In *Journal of Cultural Heritage*, 15(6), pp. 670-678.

### Autori

Francesco Di Paola, Università degli Studi di Palermo, francesco.dipaola@unipa.it  
Calogero Vinci, Università degli Studi di Palermo, calogero.vinci@unipa.it

Per citare questo capitolo: Francesco Di Paola, Calogero Vinci (2025). 'Patrimonio ipogeo' e cultura dell'acqua a Palermo, metodologie digitali per la valorizzazione. In L. Carlevaris et al. (a cura di). *ekphrasis. Descrizioni nello spazio della rappresentazione/ekphrasis. Descriptions in the space of representation*. Atti del 46° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione. Milano: FrancoAngeli, pp. 883-903. DOI: 10.3280/oa-1430-c801.

# 'Hypogeous Heritage' and Water Culture in Palermo, Digital Methodologies for Enhancement

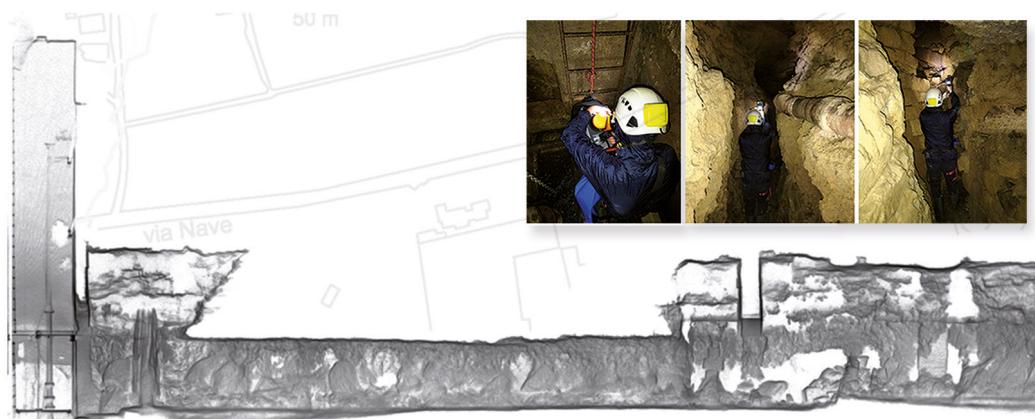
Francesco Di Paola  
Calogero Vinci

## Abstract

The study focuses on the complex and widespread hypogean constructions of the so-called 'underground heritage', with particular attention to the qanāts, hydraulic systems built over the centuries under the ground of Palermo, which represent a fascinating testimony to the culture of water in the ancient city. Through a historical and technical analysis, supported by the development of advanced systems of measurement, representation and three-dimensional visualization, the results of a project aimed at understanding and securing the 'Corso Gesuitico alto' are illustrated. This is a complex network of underground tunnels for the capture and transport of water; the existence of which has been attested at least since the 14th century, for the enhancement of which the study presented also aims to make them 'accessible' to the public through virtual fruition. A methodological and procedural workflow for data acquisition and analysis is proposed, accompanied by 3D virtual navigation of the examined hypogean environments. During the integrated survey phase, the SLAM technique with WMLS device was used among the innovative technologies. In addition, a virtual reality platform based on the UnReal engine allows users to immersively explore the man-made cavities, enriching the experience with interactive infographics that enhance understanding during the virtual visit.

## Keywords

Underground built heritage, *qanāt*, SLAM, 3D digitization, 3D visualization, virtual reconstructions.



3D scan of the 'Corso Gesuitico alto' using SLAM technology.

## Introduction

Policies for the enhancement, protection and conservation of the 'underground heritage' are often complex to implement due to the lack of knowledge of underground structures and the specificities of 'building underground'. This deficiency is related to fragmentary and incomplete documentation, caused by the general absence of coordinated multidisciplinary studies on a single type of context and the tendency to consider discoveries as isolated events. In addition, difficult access to underground architectures, their structural complexity and security issues require thorough and well-structured exploration plans. It is, by now, well-established that the approach to research in digitization processes aimed at protection, preservation, should require specific training, and lines of development that recognize the multidisciplinary approach, also, with a view to social, economic and environmental sustainability. International guidelines, such as those outlined in the Athens Charter and, more recently, the Krakow Charter, emphasize the importance of a scientific and multidisciplinary approach in the conservation and enhancement of cultural heritage.

In the project area, to initiate actions to improve and promote cultural heritage, the programmatic lines of the National Recovery and Resilience Plan (PNRR), incentivize interventions aimed at improving attractiveness, safety and accessibility of identity places [1]. The use of the most innovative technological tools useful for knowledge, representation and communication helps to recover and safeguard the deepest traces of the 'memory' of the past. Focusing on the historical heritage built underground, more and more design resources are being employed for sustainable reuse and regeneration interventions of cultural sites having a distinctive identity. Underground heritage artifacts, represent important testimonies and potential drivers of social and economic development processes within the communities to which they belong. Moreover, in recent years, the increase in disruptions caused by human activities in urban areas and the difficulties in interpreting these phenomena highlight the urgency of initiating specialized studies aimed at better understanding historical hypogean structures. Some associations such as the International Union of Speleology (UIS), the Italian Speleological Society (SSI), and the National Research Council of Italy (CNR) have begun a process of defining an international membership class, introducing some distinctive criteria for classifying specific historical artifacts built underground.

Recently, the designation: 'Underground Built Heritage' (UBH) has been introduced in the literature [Varriale 2021], but this is not yet considered a distinctive, shared and recognized class by UNESCO. Thus, the concept of Underground Built Heritage is traced back to three assumptions: the artifact must be a significant expression of the material or intangible culture of the environment that generated it (heritage); it must be the product of conscious anthropogenic construction or transformation (built); and it must be located below the ground level above (*hypogeum*).

Here we describe some results of a broader research oriented to the rediscovery and systematization of all the surviving visible and invisible, epigean and hypogean elements of the historical water management system, in synergy with the Superintendence and with the logistical support of the CAI Speleological Group of Palermo. From an initial phase of source retrieval (archival surveys, documentary and iconographic research, including design graphs and surveys), it is clear that the morpho-metric information of the places of interest is fragmentary and conducted with direct survey methodologies; it needs an implementation of data capable of monitoring the articulated hypogean structures over time, in order to initiate strategies of knowledge, conservation and safety [Cristiano 2017]. Specifically, we describe the so-called *qanāts* [Todaro 1988; Vinci 2018], which were functional for the water supply present in Palermo. These architectural artifacts are attested from the 14th century, but a higher date is not excluded. The complex and widespread underground constructions constitute the invisible, and for that reason most vulnerable, part of the complex system that for centuries enabled the supply of material resources to the city. The water transport and management system contributed to the creation of an original hydraulic landscape, with obvious references to Middle Eastern culture. This system, documented today through a fragmentary network of about 20 km, is still only partially explored and studied. It

was part of a larger complex, which also included the so-called 'Scirocco rooms', rooms used in the villas of the Palermitan aristocracy between the 16th and 18th centuries, located in the 'Conca d'Oro' around the historic center.

Over time, this hydraulic heritage has been partly destroyed by the construction of the modern city, often carried out without considering the presence of the underground structures [2]. As a result, its surviving traces are now extremely vulnerable and in need of valorisation and conservation work.

Thanks to historical and constructive analyses, combined with the use of innovative technologies for 3D measurement, representation and visualization, the first multidisciplinary interventions have been initiated to rediscover and systematize the visible and invisible fragments of this rare and precious testimony of ancient Sicilian water culture [Beraldin et al. 2011]. These initiatives have also made it possible to make the heritage virtually accessible to people with disabilities, who otherwise could not visit the hypogean sites.

### The case study

*Qanāts*, unlike aqueducts, serve both the function of capturing and transporting water to the surface. In recent years, the growing interest in hypogean constructions has made it possible to identify similarities and unique features in numerous artifacts, both already known and recently discovered, placing them in a broader geographical, cultural and temporal context. A significant contribution in this regard has been made by translations and publications of ancient Arabic and Persian texts, previously inaccessible due to language barriers [Ferriello 2006] [3]. The treatises report that the technical culture of the time was the result of a hybridization between Middle Eastern and Western traditions, as confirmed by references, albeit indirect, to Greek and Roman culture (fig. 1).

The case study presented, the network of canals known as the 'Gesuitico alto' in the Fondo Micciulla in Palermo, constitutes an intricate underground infrastructure composed of tunnels dug into the rock or lined with squared ashlar. It is spread over three distinct levels, differentiated by depth, types and construction techniques, probably in response to the progressive lowering of the water level. This phenomenon required increasingly deep excavations to intercept the water table, and in cases of rapid lowering of the water level—as after the 1693 earthquake—new channels were preferred to be dug at lower levels, adopting different techniques. Generally, in hypogean constructions, the shallowest level (level I) turns out to be the oldest. This segment extends about 155 meters to the north and 77 meters to the south, at a depth of about 6 meters. The section of the tunnels varies greatly in width, height and shape.

A significant part of these structures was filled with hypogean materials from the lower levels. The second level is located at a depth of 8.50 meters, with a length of about 110 m. Its tunnels have a rectangular cross-section, varying height and walls without lining. The third level, at a depth of 10 meters, extends for 502 m and partially overlaps the first level. The considerable difference in height in different sections of the same level can be explained by the fact that when the route of the new canal to be excavated ran below a section of an existing canal, the two levels were joined into a single section with a height of 2.50 to 3 m.

The path of the galleries of levels 1 and 2 shows slight tortuosity to avoid the more compact rock masses, while level 3 is distinguished by long straight sections, obtained by demolishing even the hardest rocks. This points to more advanced hypogean and construction techniques, confirmed by the presence of numerous sections lined with calcarenite ashlar placed dry and spaced with stone wedges so as to increase the thickness of the joints and facilitate the passage of water from the springs behind the lining wall inside the channel [4]. The cover, in the lined sections, is made using the 'oven mouth' technique, in which two inclined ashlar form a triangular profile. This configuration stabilizes the side walls and allows hypogean materials to be accumulat-

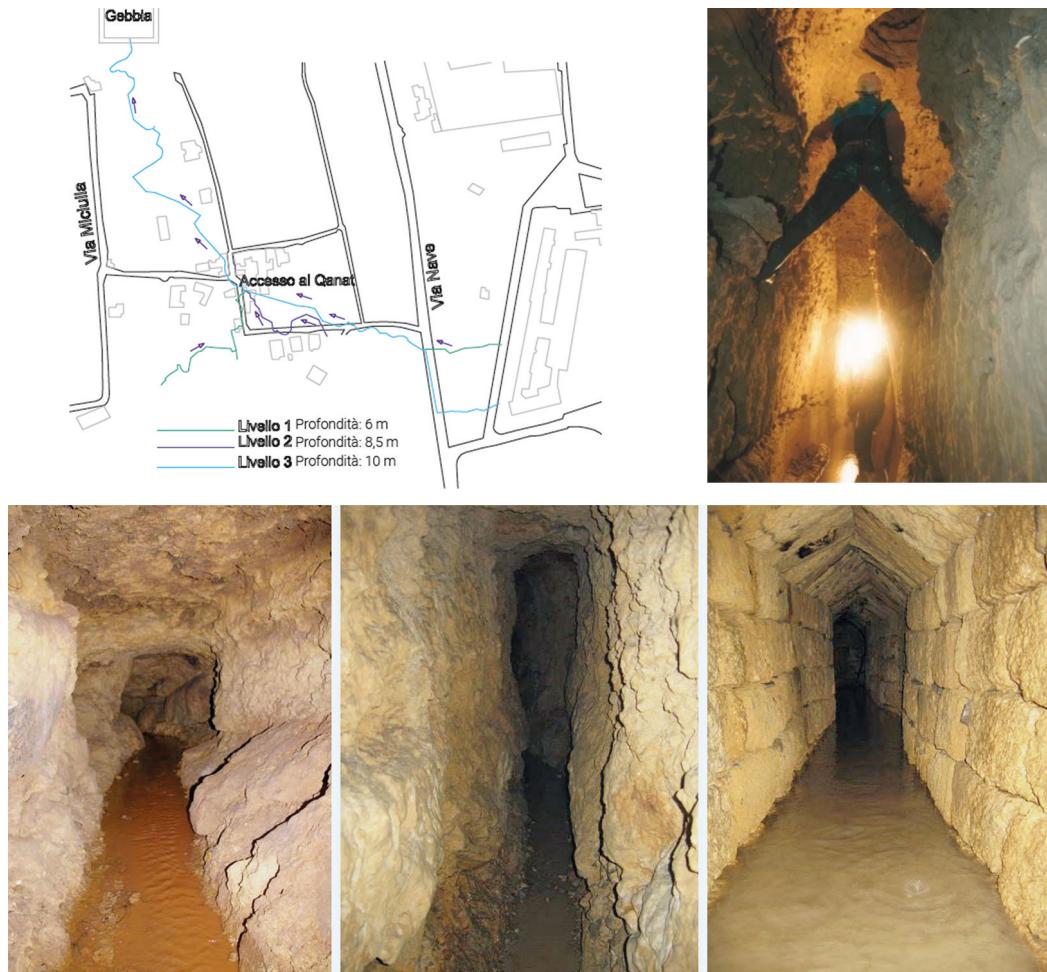


Fig. 1.'Corso Gesuitico Alto'.Top left, plan scheme; right, qanāt inspection. Bottom, morphology sections Level 1, Level 2 and Level 3.

ed above the slab, reducing the cost and inconvenience associated with their transport out of the tunnel. The 'Corso Gesuitico alto' preserves many characteristic elements: the pit for the 'senia' at the end of level 2; serial ventilation pits; a repertoire of 'catusi' (tubes with truncated ashlars made of brick) of different sizes; barrage systems; and numerous historical restoration and consolidation works.

#### **Analysis, conjectural reconstruction, methodological procedure**

From the initial phase of source collection, it emerges that the morpho-metric information on the sites of interest is partial and fragmented for individual cross-sectional profiles, until now, obtained through direct survey methodologies, conducted with a tripod and laser level. The current graphical documentation consulted has allowed for an in-depth study of building types, but it needs an implementation of information, capable of supporting decision-making processes to plan intervention actions for the management of the site.

The study initiates an experimentation of a procedural flow of data acquisition, analysis and subsequent 3D virtual tour mode navigation to obtain a realistic scenario of the hypogea architectural system to be consulted, interrogated and implemented with heterogeneous indications [Kalay, Kvan, Affleck 2007].

An additional purpose, which boosts the dissemination of the Heritage, is determined by the possibility of conducting a gaming navigation experience, with the support of VR and AR devices, even to users with physical or perceptual disabilities or special pathologies.

The investigation delved into level 2 of the hypogean architecture of the 'Gesuitico alto' *qanāt*, which has never been surveyed with state-of-the-art systems. Below, we describe the main steps of the methodological process tested and the considerations that determined the parameter settings and survey strategies (fig. 2).

The survey campaign initiated within the underground environments aims to acquire high-resolution 3D mapping of the complex geometric surfaces in a non-invasive manner; employing techniques suitable for dealing with the many logistical challenges inherent in the nature of underground systems, with enclosed spaces that are difficult to access: the presence of humidity, cramped and narrow areas, lack of light, no GPS signal, inability to stand or survey, etc. [Zlot et al. 2013; Roncat et al. 2011].

The system, tested for the case study investigation, belongs to the category of wearable mobile lasers (WMLS) and is the Zeb Horizon.

This wearable system combines laser scanning technology (phase difference laser scanner) and an inertial measurement unit (IMU) in a handheld device that can be operated by an operator while walking on the site. The sensor acquires moving point clouds using simultaneous localization and mapping (SLAM) algorithms [Bosse, Zlot, Flick 2012; Di Filippo et al. 2018] without the need for global navigation satellite system (GNSS) support.

The morphological and textural characteristics required the design of a survey campaign that took into account several parameters, which would affect the final quality of the 3D point cloud: identification of critical areas; trajectory characteristics; path pre-

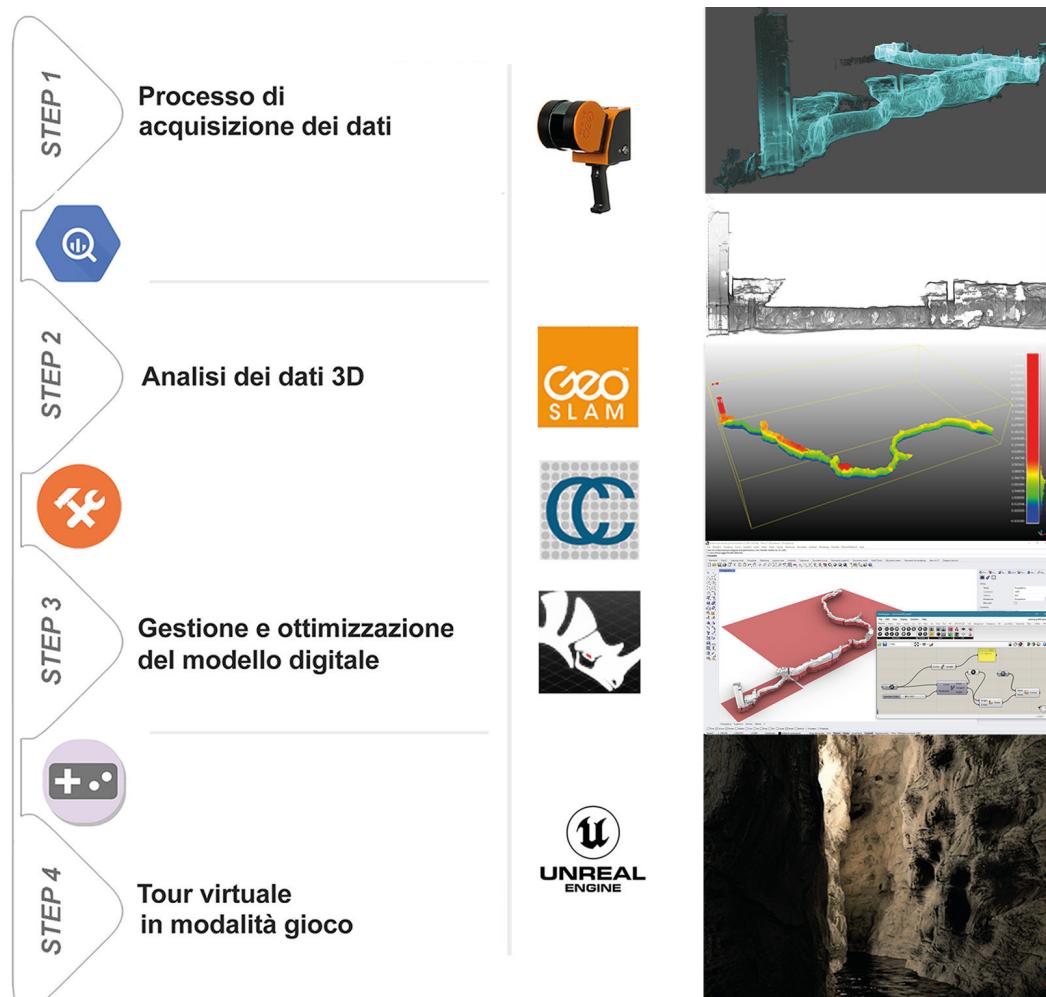


Fig. 2. Methodological and procedural process of data analysis and management.

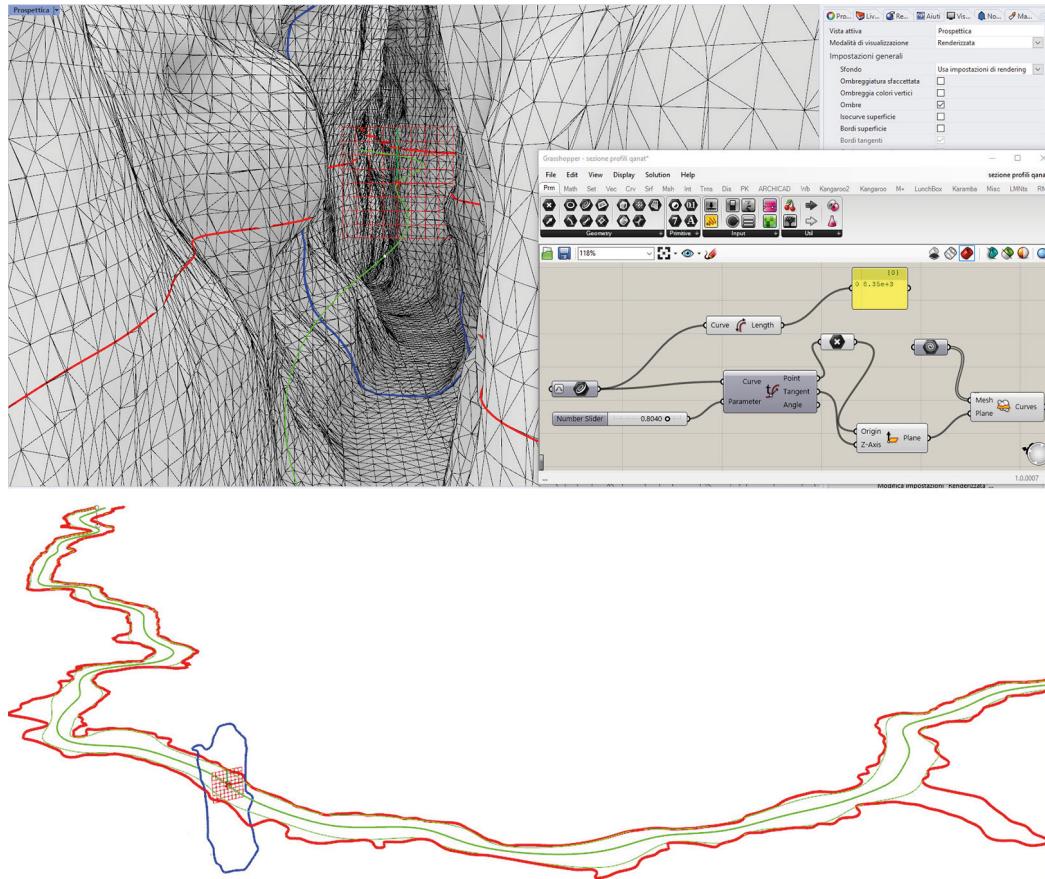


Fig. 3. Defined parametric extraction and graphical restitution of cross-section profiles.

diction and loop closure; speed of movement; time taken to obtain the 3D point cloud; and point cloud density [Lagüela et al. 2018].

The integrated survey with SLAM laser scanning and photogrammetric techniques allowed the consultation of a geometric model with high information density essential to initiate strategies for knowledge of the different building and material types, conservation and securing.

The process was developed following the canonical steps of: point cloud processing (acquisition, segmentation, calculation of distances, calculation of normals, optimization); export of this for the construction of the polygonal mesh geometric model; extraction and graphical restitution of vector profiles of cross-sections and orthogonal to a median trajectory within the hypogeal conduct.

The methodological procedures required the use of specific tools found in well-known management software such as: GeoSLAM, CloudCompare, EGS Leios, Rhinoceros, Grasshopper, Unreal, 3DVista (figs. 3, 4).

The prepared interface, within the *UnReal Engine* environment (by Epic Games), allows navigation in two modes of interaction. The first allows the 3D model to be georeferenced with infographics and 2D documentation (images, archival photos, diagrams, and drawings), through reference tags, associated with the geometric model of the *qanāt*. The user can interact with the implemented environmental context with heterogeneous infographics [Di Paola, Inzerillo, Alogna 2019].

The second mode allows the user to immerse himself in a realistic scenario and navigate within the *qanāt* in game mode, simulating, for example, the light of the protective hat (figs. 5-7).

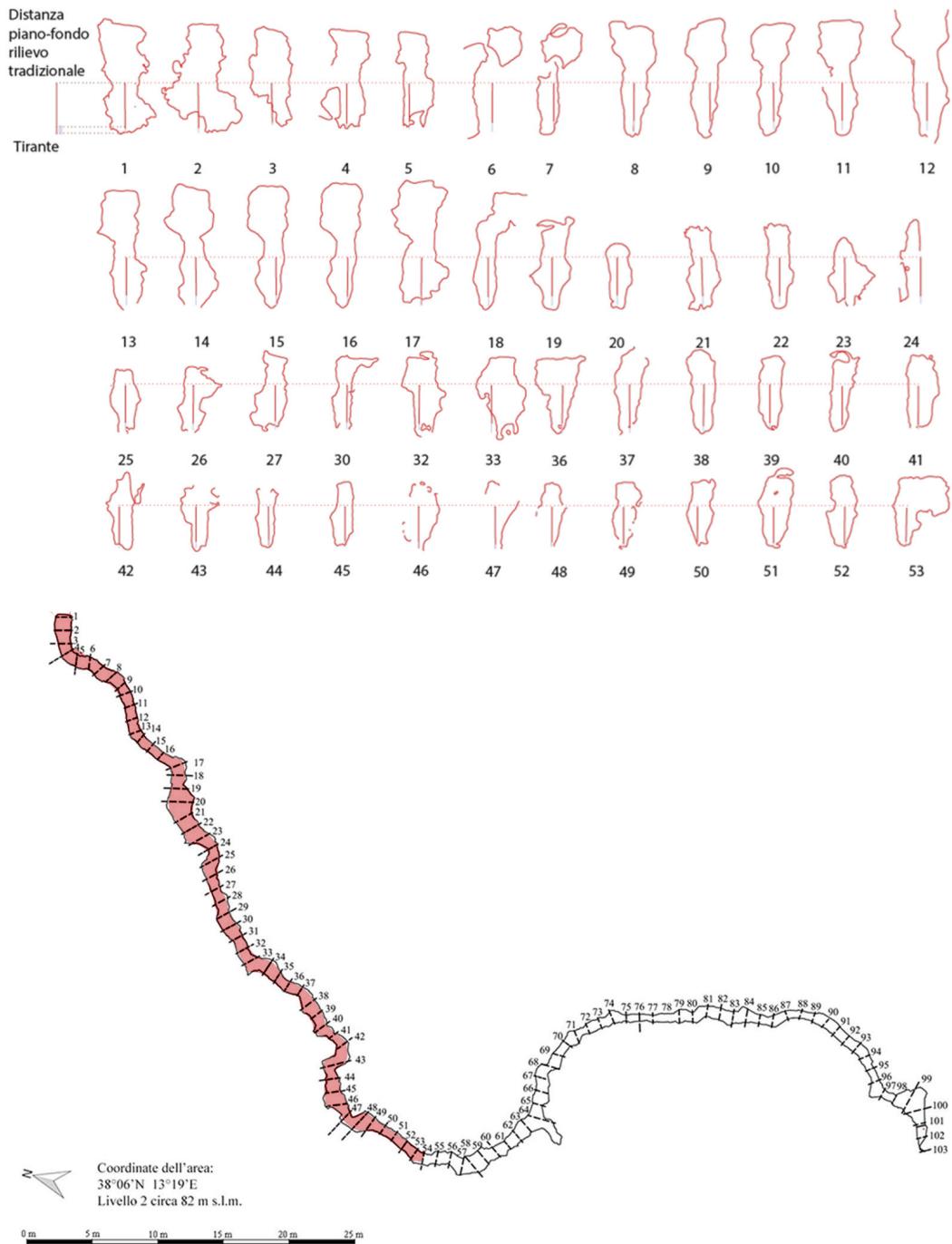


Fig. 4. Graphic restitution of *qanāt* sections in plan and elevation.

## Conclusions

During the 20th century, lack of maintenance and loss of interest in the 'invisible' built heritage and in Palermo's ancient water supply system –which was considered unhygienic– have physically erased, and even from memory, the existence of many hypogea buildings. Today a new interest seems to be emerging from studies produced in recent years. These studies are directing toward a recovery that takes into account, where possible, the possible rehabilitation of the original function and that leads to a valorization of this heritage as a resource, also with a view to sustainable use. Although less easy to visit, the *qanāts*, particularly the 'Gesuitico Alto', constitute an additional attraction for

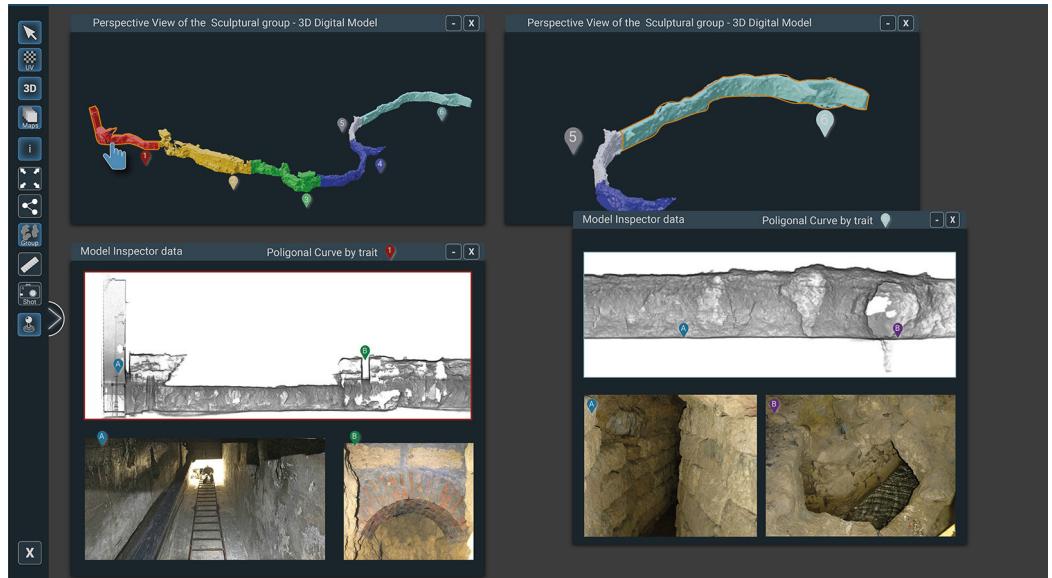


Fig. 5. UnReal Engine interface, integrated navigation mode. Georeferencing the 3D model with infographics and 2D documentation, through reference tags.

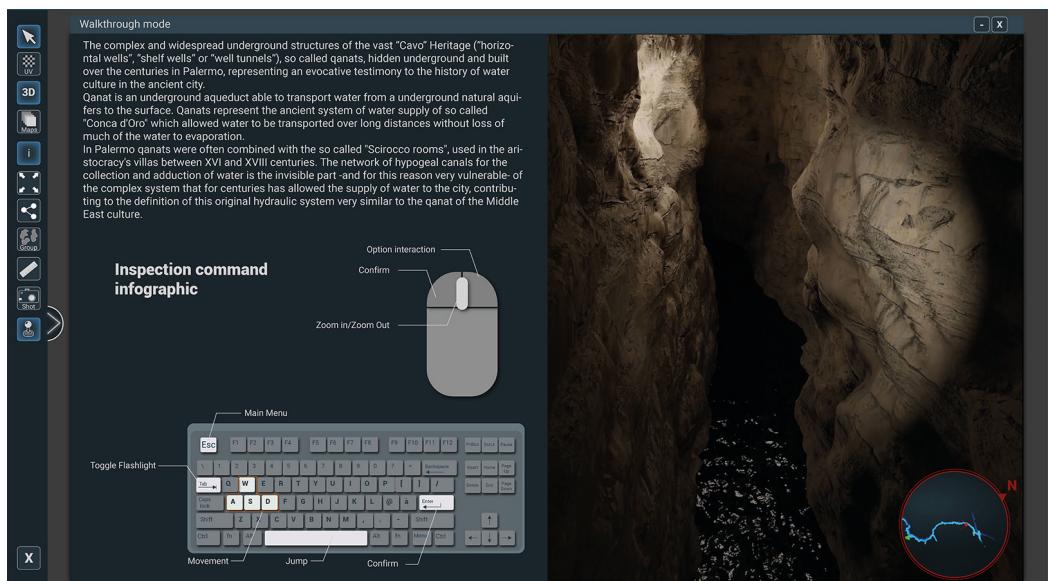


Fig. 6. UnReal Engine interface, game navigation mode within the qanat.



Fig. 7. Virtual tour in street view navigation mode with viewer. Photographic survey with Matterport.

many users, simply fascinated by their resemblance to Middle Eastern culture, and for scholars from different disciplines, who see their interests converge around the theme of the relationship between city and water. With respect to this theme, the enhancement is geared toward rediscovering and systematizing all the surviving elements, visible and invisible, of the historical 'system' of water management in Palermo that, often, fed the fishponds of many Norman palaces.

#### Credits

In this paper, whose authors shared the methodological framework, Francesco Di Paola and Calogero Vinci drafted the following paragraphs: *Introduction, Conclusions*; Calogero Vinci drafted the paragraph *Case Study*, and Francesco Di Paola drafted the paragraph: *Analysis, conjectural reconstruction, methodological procedure*.

#### Acknowledgment

The Authors thank:

- Microgeo Srl ([www.microgeo.it](http://www.microgeo.it)), which provided us with the ZEBHorizon system;
- Speleo Team CAI Palermo, which has been cooperating with the Superintendence for Cultural and Environmental Heritage for years in the exploration of the qanāt, for logistical-scientific support and valuable assistance in the measurement campaign;
- the research team of the Project *iHeritage\_ITC Mediterranean Platform for UNESCO Cultural Heritage* (B\_A.2.1\_0056), funded by the ENI CBC MED 2014-2020 Program.

#### Notes

[1] *Mission 1: Digitalization, Innovation, Competitiveness, Culture and Territory*. Among the 17 Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda, signed in 2015 by 193 countries of the United Nations and approved by the UN General Assembly, *Goal 11: Sustainable Cities and Communities*, among targets under the framework (target 11.4), aims to strengthen commitments to protect and safeguard the world's cultural and natural heritage.

[2] The recognition of multicultural Palermo, enshrined in the 2015 inclusion of the 'Arab-Norman route' in the UNESCO World Heritage List, has, in addition, fostered a significant increase in visitors to underground sites, particularly some *qanāts* that are still accessible.

[3] Prominent among these is Giuseppina Ferriello's edited edition of Al-Karaji's technical-scientific treatise *The Extraction of Hidden Waters*, which has popularized the work of the Persian mathematician and engineer who lived around the year 1000 [Ferriello 2006].

[4] The walls and roofs of the lined tunnels are made of dry ashlar, a solution that provides stability to the less resistant soils and, at the same time, promotes the drainage of infiltrated water, thus increasing the flow rate of the tunnel.

### Reference List

- Beraldin, J.A., Picard, M., Bandiera, A., Valzano, V., Negro, N. (2011). Best Practices for the 3D Documentation of the Grotta dei Cervi of Porto Badisco, Italy. In *Proc. SPIE*, vol. 7864, pp. 78640J-78640J-15.
- Bosse, M., Zlot, R., Flick, P. (2012). Zebedee: Design of a spring-mounted 3-d range sensor with application to mobile mapping. In *IEEE Trans. Robot.*, 28, pp. 1104-1119.
- Cristiano, M. (2017). La conoscenza del sottosuolo di Napoli per la mitigazione del rischio di crolli e dissesti. In *Proceedings of Colloqui.AT.e. Demolition or reconstruction*. Monfalcone: EdicomEdizioni.
- Di Filippo, A., Sánchez-Aparicio, L.J., Barba, S., Martín-Jiménez, J.A., Mora, R., González Aguilera, D. (2018). Use of a Wearable Mobile Laser System in Seamless Indoor 3D Mapping of a Complex Historical Site. In *Remote Sensing MDPI*, 10 (12). <https://doi.org/10.3390/rs10121897>.
- Di Paola, F., Inzerillo, L., Alogna, Y. (2019). A gaming Approach for Cultural Heritage knowledge and dissemination. In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W15, pp. 421-428. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-2-W15-421-2019>.
- Ferriello, G. (2006). *L'estrazione delle acque nascoste. Scientific and technical treatise di Karaji*. Torino: Kim Williams Books.
- Kalay, Y., Kvan, T., Affleck, J. (2007). *New Heritage: New Media and Cultural Heritage*. London: Routledge.
- Lagüela, S., Dorado, I., Gesto, M., Arias, P., González-Aguilera, D., Lorenzo, H. (2018). Behavior Analysis of Novel Wearable Indoor Mapping System Based on 3D-SLAM. In *Sensors*, 18, 766. <https://doi.org/10.3390/s18030766>.
- Lehtola, V.V., Kaartinen, H., Nüchter, A., Kaijaluoto, R., Kukko, A., Litkey, P., Honkavaara, E., Rosnell, T., Vaaja, M.T., Virtanen, J.-P. (2017). Comparison of the selected state-of-the-art 3D indoor scanning and point cloud generation methods. In *Remote Sens.*, 9, 796.
- Roncat, A., Dublyansky, Y., Spotl, C., Dorminger, P. (2011). Full-3D surveying of caves: A case study of Marchenhöhle (Austria). In *Proc. IAMG2011 Conference*, pp. 1393-1403.
- Todaro, P. (1988). *Il sottosuolo di Palermo*. Palermo: Dario Flaccovio Editore.
- Varriale, R. (2021). "Underground Built Heritage": A Theoretical Approach for the Definition of an International Class. In *Heritage*, 4, no. 3, pp. 1092-1118. <https://doi.org/10.3390/heritage4030061>.
- Vinci, C. (2018). Il patrimonio "cavo". Architetture ipogee e spazio idraulico nella piana di Palermo. In *ReUSO 2018. L'intreccio dei saperi per rispettare il passato, interpretare il presente, salvaguardare il futuro*, pp. 997-1004. Roma: Gangemi Editore.
- Zlot, R., Bosse, M., Greenop, K., Jarzab, Z., Juckles, E., Robert, J. (2013). Efficiently capturing of large, complex Cultural Heritage sites with a handheld 3D mobile laser mapping system. In *Journal of Cultural Heritage*, 15(6), pp. 670-678.

### Authors

Francesco Di Paola, Università degli Studi di Palermo, francesco.dipaola@unipa.it  
Calogero Vinci, Università degli Studi di Palermo, calogero.vinci@unipa.it

To cite this chapter: Francesco Di Paola, Calogero Vinci (2025). 'Hypogeous Heritage' and Water Culture in Palermo, Digital Methodologies for Enhancement. In L. Carlevaris et al. (Eds.). *ékphrasis. Descrizioni nello spazio della rappresentazione/ékphrasis. Descriptions in the space of representation*. Proceedings of the 46th International Conference of Representation Disciplines Teachers. Milano: FrancoAngeli, pp. 883-903. DOI: 10.3280/oa-1430-c801.