

Laser scanning e 3D modeling per la conoscenza e la valorizzazione delle chiese rupestri

Alessio Cardaci (*), Antonella Versaci (**)

(*) Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Bergamo, alessio.cardaci@unibg.it
(**) Facoltà di Ingegneria e Architettura, Università Kore di Enna, antonella.versaci@unikore.it

Riassunto

Le chiese rupestri sono architetture ipogee interamente scavate in banchi di roccia, sovente situate lontano dai centri urbani, spesso, a torto, trascurate dalla storia dell'architettura per la loro condizione di "povertà". Tale patrimonio presenta delle peculiarità uniche perché unici sono gli spazi non caratterizzati da regolarità o proporzioni tipiche delle configurazioni architettoniche epigee. L'analisi morfologica e il rilievo geometrico di questi spazi sono attività complesse se eseguite con metodologie tradizionali, perché essi non sono riconducibili a superfici piane e regolari. La necessità di operare notevoli semplificazioni dei volumi al fine dell'ottenimento di un'attività mensurativa precisa e rigorosa, rende invece vantaggioso l'utilizzo delle tecniche 3D *laser scanning*. Questo lavoro riassume le specificità di uno studio condotto sulla *Grotta dei Santi* a Enna, al fine di migliorarne la conoscenza, oggi limitata ad analisi e rilievi convenzionali. Esso intende, inoltre, approfondire i temi riguardanti la valorizzazione e la fruizione di questo patrimonio e all'implementazione di banche dati, evidenziando le possibilità offerte dalle nuove tecnologie di restituzione grafica fotorealistica, nonché dalla navigazione in ambienti virtuali via *web*.

Abstract

Rock churches are underground architecture entirely carved from rock, often located far from urban centers and neglected by the history of architecture. However, this heritage is "unique" because so are their spaces, not characterized by the regularity or proportions typical of epigeous architecture. Morphological analysis and geometric survey of these underground spaces are difficult activities when carried out by traditional methods, because they are not reducible to flat and regular surfaces. The need to operate significant volume simplifications in order to carry out precise and rigorous metric activities makes, instead, the laser scanning survey the optimal solution. This work aims to illustrate the specificity of a research focusing on the *Grotta dei Santi* in Enna, in order to extend and deepen its knowledge, now limited to conventional analyzes. It also intends to investigate issues related to the valorization and promotion of this heritage, highlighting the possibilities offered by new photo realistic graphic technology, as well as by the Web-navigation..



Figura 1. La Grotta dei Santi di Enna.

Premessa

Il rilievo e la rappresentazione degli ambienti ipogei è operazione molto complessa in quanto gli elementi naturali mal si adattano ad essere identificati e adattati a geometrie elementari. Ciò ha comportato la produzione di una documentazione grafica molto differente e strettamente legata “alla mano dell’autore”, ovvero sia disegni schematici ed essenziali molte volte non esplicativi delle caratteristiche morfologiche della cavità che rappresentazioni molto elaborate, quando non eccessivamente artistiche e fantasiose, arricchite di particolari non coerenti e rispettosi della vera natura del sito, soprattutto in rapporto a scala e proporzioni. La mancanza di una codifica grafica e di norme nella rappresentazione ha fatto sì che il *Catasto Nazionale delle Grotte d'Italia*, archivio che nasce nel 1928 con l’intento di censire sia le cavità naturali (anche di piccole dimensioni), oggi gestito dalla Società Speleologica Italiana ed esteso anche a quelle artificiali, presenti una documentazione varia e differenziata, in particolar modo negli allegati grafici delle schede di censimento (cfr. il sito della Società speleologica italiana: <http://www.ssi.speleo.it>).

Negli anni '70, in seguito al decentramento del catasto su base regionale e, grazie alla produzione di una manualistica per il rilievo ipogeo considerata quale strumento di particolare importanza - il *Manuale del Rilievo Ipogeo* edito dal CAI e dalla Regione Friuli Venezia Giulia (1990) e le pubblicazioni dei *Quaderni Didattici* curati dalla Commissione Nazionale Scuole di Speleologia (Salvatici, 1981; Silvestro, 1999) -, si è giunti a una regolamentazione sulle tecniche da adottare per il rilievo delle grotte e sul come rappresentarle tramite un codice grafico che, seppur in mancanza di veri atti legislativi, è almeno stata ufficiosamente riconosciuta. Questa manualistica, nata perché anche “il neofita possa trovare sia spiegazioni sui mezzi e sui sistemi d'orientamento, sia chiare e semplici norme da seguire per fare il punto sulle carte topografiche ed anche le essenziali tecniche da usare per effettuare il rilievo di una grotta” (*Manuale di Rilievo ipogeo*, 1990) è un punto di riferimento importante e fornisce indicazioni e ottimi suggerimenti per il rilievo e le rappresentazioni anche dei siti rupestri. In più, da pochi anni è nata la rivista *Opera Ipogea: Journal of Speleology in Artificial Cavities*, con la finalità di documentare e preservare la memoria delle antiche opere sotterranee create dall'uomo al fine di comprendere le consuetudini di vita quotidiana delle culture che si sono succedute nel tempo.

La misura di ambienti ipogei si esegue con metodologie integrate di rilevamento strumentale e tecniche dirette, essenzialmente il c.d. “rilievo a vista”. Le problematiche dettate dal lavorare in ambienti freddi, con elevata umidità e scarsa illuminazione, spesso disagiati per la natura accidentale del suolo, impone che le fasi di misurazione siano svolte rapidamente. È prassi consolidata che l’equipe di “rilevamento” sia costituita da uno “strumentista” e da un “disegnatore”: il primo occupato a misurare le distanze tra i capisaldi di una rete poligonale (agganciata ad una rete esterna che dall’ingresso raggiunge le parti più interne della cavità) e il secondo impegnato nel

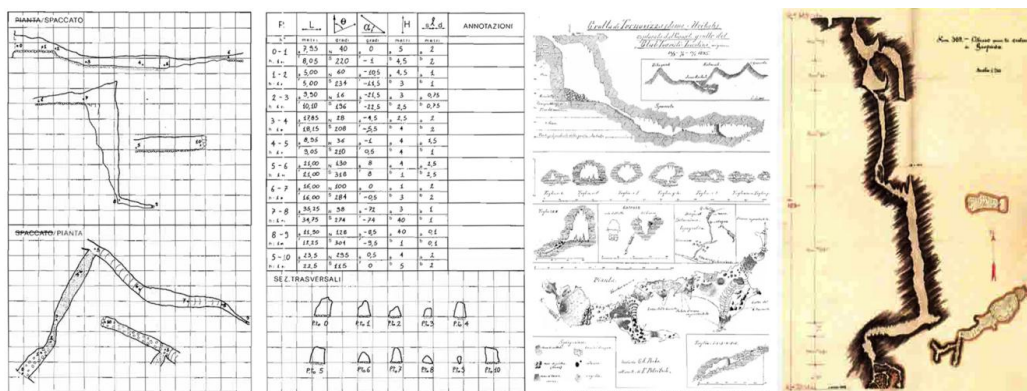


Figura 2. Eidotipi e restituzione grafica tradizionale degli ambienti ipogei (da *Il Manuale di Rilievo Ipogeo*, 1990).

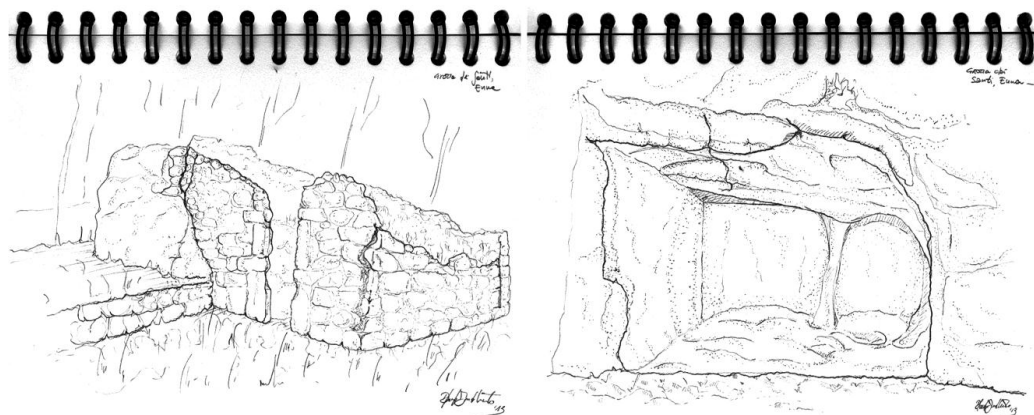


Figura 3. Rilievo dal vero (@D. Indelicato, Laboratorio di Restauro dei Beni Architettonici e Culturali, UNIKORE).

disegno di eidotipi, schizzi veloci in cui vengano rappresentati i contorni planimetrici e altimetrici riportati con il massimo rispetto delle proporzioni, nonché le sezioni trasversali della cavità in corrispondenza delle stazioni e siano inserite note al fine di indicare le caratteristiche materiche e morfologiche.

Diversamente dal rilievo di un edificio, in cui è possibile misurare gran parte dei punti significativi necessari per la restituzione del modello, nel rilievo ipogeo questi saranno in numero tanto minore quanto più avverse e disagiati saranno le operazioni condotte sul sito. Una scala alfanumerica costituita da un primo valore compreso tra 1 a 7 e un secondo da una lettera tra A e D, è atta - in Inghilterra - a indicare il grado di precisione dei rilevamenti. In particolare, il codice numerico indica l'accuratezza con cui sono state effettuate le misurazioni (considerando con il valore 1 la misurazione basata esclusivamente sulla valutazione soggettiva e senza l'impiego di strumentazione e con il valore 7 quando, invece, essa è eseguita con l'utilizzo rigoroso della *total station*), mentre la lettera alfabetica classifica i dettagli (la lettera A indica pochi particolari apprezzati "ad occhio" e restituiti a memoria, invece la lettera D indica che sono stati misurati molti punti a partire da una stazione di coordinate note).

Il completamento delle operazioni avviene con la restituzione dei dati acquisiti tramite il disegno in scala della cavità attraverso delle proiezioni piane. La spazialità di una grotta è "comunicata" per mezzo di una "pianta" speleologica, di una "sezione longitudinale" (uno sviluppo altimetrico che segue l'andamento planimetrico della grotta), e numerose sezioni trasversali. Benché simili nella costruzione, queste proiezioni sono molto differenti rispetto alle piante e agli alzati utilizzati in architettura. Ciò che gli speleologi definiscono una "pianta" è certamente una proiezione ottenuta con un piano orizzontale intersecante l'oggetto ma, contrariamente a quanto accade in architettura dove la sua quota è costante, il piano di sezione varia in altezza adattandosi all'alzato della cavità. In questo tipo di rappresentazione, le informazioni relative allo sviluppo altimetrico non vengono quindi rese visibili ma sono però riproducibili tutte le peculiarità del suolo. Le informazioni sullo sviluppo in alzato della grotta in cui compaiono tutte le strutture verticali (pozzi, camini, elementi voltati) sono invece riportate in una "sezione longitudinale", una sezione "ideale" in cui il piano verticale è opportunamente esteso, per adattarsi allo sviluppo planimetrico della grotta.

Le sezioni trasversali completano la rappresentazione della grotta. Esse riportano il profilo interno ottenuto con piani verticali disposti ortogonalmente allo sviluppo longitudinale; in numero spesso elevato e frutto di misurazioni spesso poco precise, sono riportate ad una scala minore rispetto alla pianta e allo sviluppo longitudinale.

Quanto alle caratteristiche morfologiche e materiche, esse sono rappresentate per mezzo di segni iconografici opportunamente standardizzati e riportati in legende allegate alle tavole. È pratica

ordinaria ricorrere ai colori al fine di rendere più leggibili gli elaborati, utilizzando, ad esempio, il colore blu per indicare gli elementi idrografici (quali pozzi e sifoni) e il colore bistro per la rappresentazione di detriti, massi e sabbie.

Le cavità artificiali sono, comunque, segni tangibili di azioni di generazioni passate: un patrimonio che possiede peculiarità uniche in quanto ogni muro, ogni volta, ogni incavo ricavato “per levare” è un pezzo originale e non ripetibile. La loro costruzione si adatta alla roccia, le pareti sono spesso curve e fuori piombo, i soffitti e le volte seguono le superfici inclinate.

Lo studio morfologico di questi spazi ipogei richiede, quindi, un approccio mirato al riconoscimento delle singolarità costruttive e deve essere condotto secondo procedure di misura rigorose e precise, mai semplificate.

Tuttavia, il loro rilievo geometrico è un’attività lunga e laboriosa se condotta attraverso le tecniche tradizionali, poiché tali volumi non sono riconducibili a superfici regolari: in effetti, “il manufatto ipogeo pone notevoli difficoltà nei dati metrici e formali a causa della natura morfologica articolata della struttura che, se da un lato contribuisce a definire la chiave di lettura della vita di un monumento, dall’altra rappresenta il problema più complesso nella fase di rappresentazione geometrica che oggi è possibile superare grazie alle applicazioni tecnologiche del rilevamento tridimensionale” (Patti, 2013).

Il caso studio della Grotta dei Santi a Enna

La grotta è scavata in un roccione isolato in contrada San Calogero a Enna. Era nota nel secolo XVIII al padre Giovanni dei Cappuccini ed era frequentata per i benefici effetti che otteneva, secondo la credenza popolare, chi passava attraverso l’apertura praticata nel setto che bipartisce la grotta. L’interruzione del culto ha cancellato il ricordo della titolatura della Chiesa, oggi designata, con il generico riferimento ai santi affrescati sulle pareti. La dislocazione delle icone murali, rispettosa delle rigide gerarchie devozionali, suggerisce un’attribuzione a San Nicola o a Santa Margherita per il posto di prestigio che occupano all’interno del presbiterio, ma non si può escludere una titolatura a San Calogero, che dà il nome alla contrada (documenti del 1308 censiscono sia una chiesa a San Nicola sia una a Santa Margherita).

Non sono note le circostanze dell’abbandono della chiesa: costituita da un vano quadrato con la caratteristica deformazione “a ventaglio” per ottenere una maggiore illuminazione delle parti più interne, essa appare oggi inglobata in un edificio a cortile, ormai diroccato, che potrebbe essere nato come dipendenza del culto e successivamente declassato a fattoria. Vi sono, infatti, evidenti segni di riutilizzo della grotta come stalla per la presenza, sulle pareti, di anelloni passanti; un frantoio situato nel settore destro della grotta è testimoniato da una vasca di decantazione con canaletta di immissione e un alloggiamento nel soffitto per il torchio a vite. Un palmento rupestre all’aperto si osserva sulla cima del roccione, costituito da due vasche sfalsate di quota, tra loro collegate da canalette. Al riuso agricolo della grotta appartiene anche un tramezzo ligneo riconoscibile per i fori di alloggiamento dei pali nel pavimento e nel soffitto, e che ha sostituito la parete d’ingresso demolita (Cilia, 1985; Vicari, 1993; Messina, 2001).

“Riscoperta” nell’ottobre del 1970 da un cacciatore, sorpreso dalla pioggia, che vi si riparò all’interno, rimanendo colpito dai preziosi affreschi in essa contenuto, la grotta fu subito oggetto di una campagna di stampa al fine di tutelarla e valorizzarla (AA.VV., 2010).

Intervennero la Soprintendenza alle Gallerie della Sicilia e la Soprintendenza archeologica di Agrigento (allora territorialmente competenti) e per alcuni mesi divenne addirittura un luogo di culto. Il Comune per proteggere il sito collocò un cancello, tuttora esistente, ma tale luogo non fu mai aperto al pubblico.

Recentemente sono stati condotti degli studi approfonditi e dei primi necessari interventi di restauro sul ciclo di affreschi ad opera della Soprintendenza ai BBCCAA di Enna e sulla base di una convenzione con il Laboratorio di Restauro dei Beni Architettonici e Culturali dell’Università KORE di Enna, è stata avviata la sperimentazione con tecnologia *laser scanning* che qui si riassume, al fine di migliorarne la conoscenza, oggi limitata ad analisi e rilievi convenzionali.

L'applicazione della tecnica *laser scanning* al rilievo ipogeo

La scansione *laser* è una tecnologia avanzata che permette di ottenere un rilievo rapido ed estremamente accurato. La produzione sul mercato di macchine sempre più ridotte in peso e in dimensioni (quale il Faro Focus^{3D} utilizzato in questo lavoro), ne consente, oggi, anche l'impiego in grotta, facilitandone il trasporto anche in ambienti stretti e impervi. L'utilizzo di tale strumentazione, seppur costringa a eseguire un numero più elevato di acquisizioni rispetto a dispositivi con una maggiore gittata di misura, permette, di contro, di ottenere una nuvola di punti più densa, limitando, al contempo, le zone occluse.

Il rilievo 3D *laser scanning* si esegue attraverso più "scansioni" realizzate da altrettante stazioni. Una scansione è una rappresentazione 3D dell'oggetto: una fotografia solida che permette di ricavare un'immagine in cui ogni *pixel* assegna una posizione spaziale a ogni punto "visto" dallo strumento. Una sola scansione non può garantire il rilevamento della grotta nella sua globalità; come nel rilievo fotografico, è necessario scattare una serie di immagini per apprezzarlo in ogni suo dettaglio ed eliminare possibili aree nascoste. La pianificazione delle operazioni di rilievo è, dunque, una fase di grande importanza che richiede una cura particolare relativa alla collocazione delle basi, alla predisposizione di una rete di appoggio per la registrazione, alla definizione dei passi di scansione e della risoluzione di ogni singolo *range scan*, al fine di ottenere una nuvola di punti globale che possa "ricoprire" totalmente l'oggetto di studio, limitando il più possibile i coni d'ombra (Bertocci et al., 2012). Un progetto di rilevamento necessita, quindi, di una scelta adeguata delle stazioni; questo consente di "registrare" (orientare) tutte le scansioni in un unico sistema di riferimento assoluto in cui sono conosciute le posizioni relative delle varie stazioni e il loro orientamento.

Nel caso della *Grotta dei Santi*, tale progettualità ha consigliato di compiere una cinquantina circa di scansioni (tra esterne e interne) e collocare un centinaio di marcatori (tra *target* di riferimento sferici in materiale plastico simile al carbonio dal diametro di 145 mm e *target* piatti a scacchiera): un numero in forte esubero rispetto a quanto strettamente necessario, sia in considerazione delle problematiche riguardanti l'allineamento (riferimenti non letti dallo strumento a causa dell'eccessiva inclinazione o perché troppo distanti) che della necessità di contenere l'errore nei limiti di una tolleranza di circa un centimetro (la scansione di una superficie deve sovrapporsi al termine della registrazione, non dare origine a due superfici diverse sfalsate tra loro). Le acquisizioni effettuate da distanza molto ridotta, mai superiore ai 5 metri, hanno permesso elevate densità dei punti rilevati (distanza media tra i punti acquisiti tra 5 e 30 millimetri) e tempi di lavoro contenuti (circa 6,30 minuti per ogni acquisizione, comprensivi di acquisizione del dato colore). La velocità di registrazione dei dati del Focus^{3D} è, infatti, tale da rendere più conveniente - in termine di riduzione dei tempi di lavoro - l'impostazione di una risoluzione medio - alta (in questo caso di 8200x3400 per circa 25 milioni di punti) effettuando delle "scansioni ambientali" a 360° per acquisire la totalità delle informazioni e poi ripulire le nuvole dei punti superflui.



Figura 4. Confronto tra rilievo tradizionale, proiezione ortografica e restituzione grafica 3D *laser scanning*.



Figura 5. Proiezioni ortografiche delle sezioni verticali della Grotta dei Santi.

Il modello così prodotto, la cosiddetta "nuvola di punti", costituisce un vasto archivio digitale che è possibile indagare in funzione dei possibili percorsi di ricerca, effettuando analisi virtuali dell'oggetto rilevato in termini di volumi e dimensioni, determinazioni di baricentri e pesi per verificare lo stato di conservazione del bene e/o impostando un eventuale intervento di restauro e consolidamento. La nuvola di punti consente un'indiscutibile facilità nell'elaborazione di proiezioni ortografiche di superfici irregolari: dal modello a punti 3D della nuvola è possibile ricavare le necessarie informazioni per la restituzione di piante, prospetti e sezioni (Russo et al., 2011), profili orizzontali e/o verticali, viste assonometriche e prospettiche e proiezioni tomografiche, funzione di particolare utilità nella lettura degli edifici, ad esempio la variazione degli spessori delle tessiture murarie alle varie quote con indicazione su forma e collocazione delle aperture.

La geometrizzazione che, di consueto, si applica nella rappresentazione grafica di strutture che, di fatto, sono prive o quasi di pareti rettilinee o di rigorose simmetrie e che caratterizzano gli edifici storici, è spesso frutto di strumentazioni inadeguate alla complessità del bene e dettata dalla necessità di "velocizzare" l'attività mensuraria. L'irregolarità consentita dal *laser scanner*, che si traduce in una maggiore flessibilità sia nella rappresentazione in piante e sezioni, che in quella volumetrica, non è quindi un elemento marginale ma una caratteristica che deve essere colta e valorizzata. L'acquisizione e la digitalizzazione del dato 3D tramite scansione laser, costituiscono la prima fase di un processo di trattamento delle informazioni cui segue la modellazione 3D per la creazione di artefatti virtuali testurizzati e navigabili: modelli in grado di fornire una descrizione realistica dell'oggetto molto dettagliata e in più contenente informazioni metriche accurate, materiche e del degrado. Il prodotto dalla scansione è costituito da nuvole di punti grezze che, se opportunamente trattate, descrivono comunque l'oggetto attraverso un modello discontinuo in cui la percezione dell'oggetto "reale" è tanto più elevata quanto più è densa la nuvola; anche la stessa informazione radiometrica, oltre a risentire dei tempi del rilievo e dell'impossibilità del regolare luce ed esposizione, è fortemente penalizzata dalla necessità di dover essere riproiettata solamente sui punti acquisiti lasciando degli spazi di "incertezza" (*pixel* colorati accanto ad altri neri).

La fase successiva, la cosiddetta modellazione 3D, inizia con la trasformazione della nuvola di punti in una superficie discreta - o continua - attraverso la generazione di *mesh*, superfici frammentate costituite da poligoni triangolari i cui ogni vertici sono i punti costituenti la nuvola. Il modello ottenuto è un solido poligonale che sarà oggetto di procedure di pulizia automatica per cancellare i dati acquisiti estranei e incoerenti e, quindi, di un successivo affinamento nella registrazione (attraverso un algoritmo ICP di controllo di forma che allinea ogni *range scan* in ragione della forma delle sue superfici e non sulla base dei soli *target*) e, in ultimo, la decimazione e l'unione delle *mesh* in un unico oggetto. Il modello poligonale, ora unito, è quindi sottoposto a un'ultima fase di *editing* per la correzione dei possibili errori che si sono verificati durante il processo di unione, la chiusura delle lacune e delle discontinuità, quindi ottimizzato con la riduzione del numero totale dei triangoli a un valore prestabilito e la mappatura delle *texture* dei materiali e il *render* finale.



Figura 6. Confronto tra nuvola di punti e modello poligonale con riproiezione delle immagini.

Conclusioni

Tale sperimentazione mostra come la necessità di operare notevoli semplificazioni al fine dell'ottenimento di misurazioni accurate rende vantaggioso l'utilizzo del *laser scanner* 3D, al fine di ottenere una visione d'insieme delle strutture ipogee e una maggiore definizione delle loro peculiarità, necessarie per lo studio di architetture "in negativo".

La creazione di un modello poligonale e la proiezione di immagini ad alta risoluzione sulla sua superficie, permette, inoltre, di avere una percezione realistica dello spazio ipogeo. Contrariamente ad una fotografia dove l'immagine è proiettata su una superficie piana, la ri-proiezione sulla superficie poligonale che riproduce le asperità e le ondulazioni della roccia, offre al fruitore una visione dinamica permettendogli di analizzare il sito variando il punto di osservazione. Egli può così avvicinarsi e ruotare lo sguardo per esaminarlo e comprenderlo, secondo orientamenti differenti, scelti di volta in volta. Si fornisce così all'osservatore la possibilità di cogliere ogni dettaglio dell'opera e di interagire con essa, attraverso un sistema di informazioni sempre nuove, visualizzabili con il movimento del *mouse*. La ricostruzione di un ambiente immersivo, con possibilità di trasformazione in *browser* di navigazione, permette al "visitatore" di sfruttare tutte le potenzialità connesse all'acquisizione integrata dei dati caratteristici dell'ambiente: dalla visualizzazione ad alta risoluzione, alla sua esplorazione metrica, alla definizione di personali percorsi esplorativi.

Riferimenti bibliografici

- AA.VV. (1990), *Manuale di rilievo ipogeo*, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia
- AA.VV. (2010), "I Santi monaci Basiliani e la rievangelizzazione di Enna", *Il Campanile*, 5
- Bertocci S., Bini M. (2012), *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, CittàStudi, Novara
- Cilia E. (1985), "Laura Basiliana in contrada Baronessa", *Henna tra Arte e Storia*, Enna, 157-163
- Fallani F., Piccini L. (1989), "Indicazioni per il disegno dei rilievi e la compilazione delle schede catastali", *Talp*, 4
- Messina A. (2001), *Le chiese rupestri del Val Demone e del Val di Mazara*, Istituto siciliano di studi bizantini e neoellenici "Bruno Lavagnini", Palermo
- Patti, D. (2013), "La facies rupestre nella Sicilia centrale: aspetti metodologici e prospettive di ricerca", *Mediaeval Sophia Studi e Ricerche sui Saperi Medievali*, 13, 218-240
- Russo M., Remondino F., Guidi G. (2011), "Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico", *Archeologia e Calcolatori*, 22, 169-198
- Salvatici L. (1981), "La rappresentazione grafica delle cavità", *Speleo*, 6, 3-16
- Silvestro C. (1999), "Il rilievo delle grotte", *Quaderni Didattici*, 3, Soc. Spel. Italiana
- Vicari V. (1993), "La Grotta dei Santi di Enna", Enna, 7-45