

## RUDERI RILETTI: APPROCCIO E PROBLEMI DI MODELLAZIONE TRIDIMENSIONALE NEL SITO ARCHEOLOGICO DI MONTE SAN MARTINO (PROGETTO SMALL-TRENTINO SUDOCcidentALE)<sup>1</sup>

### 1. INTRODUZIONE

La documentazione archeologica, diversamente dal metodo di scavo, non ha avuto un'evoluzione di pari livello e il lavoro sul campo non è molto dissimile da quello di qualche anno fa, in quanto le novità tecnologiche del fare e per fare documentazione stentano a ricomporre in forme condivise di dialogo e di comunicazione le molteplici iniziative sperimentali attualmente in campo (DE FELICE, SIBILANO, VOLPE 2008, 271; FRONZA, NARDINI, VALENTI 2009).

In tale ambito, argomento di massima discussione è il tema della tridimensionalità, di per sé risolutivo di quella criticità insita nel rilievo di una qualsiasi struttura archeologica caratterizzata da sviluppo planimetrico, ma anche da spessore (o profondità). Rispetto ai metodi tradizionali, i vantaggi della documentazione tridimensionale appaiono evidenti almeno in linea di principio: un rilievo e un modello così realizzati permettono infatti di raccogliere un numero infinitamente più elevato di dati, consultabili con la semplicità e la flessibilità che tale documentazione ha dimostrato di poter offrire. Altresì essa evita, nella fase di registrazione, la perdita di informazioni, ovviando in tal modo a inevitabili sviste e incongruenze implicite nelle operazioni di rilievo bidimensionale. Il nuovo palinsesto apre inoltre possibilità di recupero e di uso di documentazioni – grafiche e fotografiche – già realizzate, quando non addirittura di vecchia data o d'archivio, potendole inserire e gestire nel medesimo spazio purché dispongano di alcuni requisiti minimi.

Per tali prospettive è stato dato corso ad una sperimentazione di documentazione 3D nel cantiere archeologico di Monte San Martino, al centro di un progetto di ricerca avviato sul finire degli anni Novanta (BROGIOLO 2004,

<sup>1</sup> Il progetto di ricerca “San Martino/Lundo-Lomaso-SMaLL” è sostenuto dalla Provincia autonoma di Trento e dal Comune di Comano Terme con partner l'Università degli Studi di Trento (Insegnamento di Archeologia medievale) e la Kommission zur vergleichenden Archäologie römischer Alpen- und Donauländer della Bayerische Akademie der Wissenschaften. Il presente contributo riprende esperienze e riferimenti sviluppati all'interno di una tesi di laurea magistrale condotta all'interno dall'area *3D Optical Metrology* dalla Fondazione Bruno Kessler-FBK di Trento (RAPANÀ 2009a). Un ringraziamento particolare va a Lorenzo Gonzo, responsabile dell'area di ricerca della Fondazione FBK, e a Stefano Girardi, Fabio Remondino e Alessandro Rizzi, senza i quali ciò che è stato fatto non sarebbe stato possibile. Per quanto attiene il testo consegnato per la stampa, frutto di una riflessione comune tra gli Autori, ragioni diverse e conoscenze specifiche hanno determinato una stesura così ripartita: Enrico Cavada, § 1-3; Matteo Rapanà, § 4-7.

505-510) e che, dal 2004, è venuto a concentrarsi nello scavo e nell'interpretazione di un sito fortificato di età tardoantica e altomedievale al quale si è giunti integrando informazioni di natura diversa (COLECCHIA 2001, 441-452; BROGIOLO, CAVADA, COLECCHIA 2004, 511-546; CAVADA 2007, 241-248). L'attività, coordinata all'interno dall'area *3D Optical Metrology* della Fondazione Bruno Kessler (SOI-FBK), è stata improntata a verificare l'applicabilità di specifici strumenti di rilievo tridimensionale su murature ridotte a rudere, riferibili a un oratorio eretto nel Medioevo, scomparso attorno alla metà del secolo scorso e recuperato di recente nella sua seppur minima condizione d'uso e memoria di sé (RAPANÀ 2009a; RAPANÀ 2009b).

Tecnicamente ci si è avvalsi di strumenti ampiamente condivisi (PERIPIMENO 2009b, 63-64) e, senza alcuna pretesa, si propongono qui le strade seguite e le riflessioni nate in cantiere e nelle fasi di processamento dei dati, riconoscendo i vantaggi senza però scordare anche i limiti che dipendono in massima parte da una tecnologia ancora giovane e dai costi di acquisto e di gestione di strumenti nati e pensati non per un utilizzo in campo archeologico (PERIPIMENO 2009a).

## 2. IL MONTE SAN MARTINO

Il toponimo deriva da un edificio di culto ricordato dalla metà del secolo XVI tra le cappelle campestri della pieve di Lomaso, ma di cui prima delle indagini in corso si ignorava qualsiasi data esatta di costruzione. La sua presenza risponde a valori propri dei "luoghi di strada", *per asperitatem montis* in questo caso: un luogo e un edificio adatti ad essere partecipi di una varietà di infrastrutture di assistenza e di cui quelle specializzate più note hanno costituito soltanto una delle componenti e non necessariamente la più rilevante (CANTINO WATAGHIN 2007, 269). Strutture e luoghi con riferimento ai quali è stato proposto di riportare anche il diffondersi del titolo stesso di San Martino, del quale in più occasioni la tradizione agiografica indica interventi miracolosi operati contro le minacce incombenti sulle più battute vie che attraversano le Alpi (*Vita Martini*, 5, 4-6).

Il monte si coglie a circa 1000 m di quota a S-E del paese di Lundo, isolato da ripidi pareti di roccia e con alle spalle il valico di San Giovanni che conduce a S verso la regione del lago di Garda (Fig. 1): un territorio storicamente noto come *iudicaria summa laganense* a noi pervenuto per il tramite di carte veronesi degli inizi del X secolo (CDV, 199), ma di origine ben più antica, longobarda almeno (MOR 1969, 11-18; CASTAGNETTI 1983, 37-39).

Come anticipato, dal 2004 questo luogo, inserito in un ambiente pieno di montagna separato e privo di risorse se non quelle che possono essere garantite da boschi e pascoli, è sede di un progetto di ricerca archeologica e di scavo, coordinato e diretto da uno degli scriventi, che nella sua formula è



Fig. 1 – Valli Giudicarie: panoramica della val Lomasona con al centro il Monte di San Martino (foto Enrico Cavada).



Fig. 2 – Monte di San Martino: veduta aerea con il tratto sommitale e i ruderi degli edifici a scavo ultimato (foto Giovanni Holzer 2009).

anche un laboratorio dentro il quale sono venuti a maturare e a svilupparsi specifici approfondimenti e iniziative metodologico-sperimentali di cui il presente saggio costituisce un primo esempio.

### 3. L'ORATORIO DI SAN MARTINO

Già si è ricordato come l'edificio sia scomparso per abbandono e crollo nella seconda metà del XX secolo. Questo non ha impedito comunque il mantenimento del ricordo nella memoria locale, ragion per cui nel 2004 l'Amministrazione comunale proprietaria dell'area si è fatta promotrice di un'iniziativa di recupero di ciò che ancora restava della costruzione, determinando di fatto le condizioni per l'avvio di un più ampio progetto di intervento che, nelle fasi iniziali, ha avuto due obiettivi: stabilire la sequenza e la cronologia dell'edificio religioso procedendo nella liberazione e nel recupero dei ruderi e identificare le ragioni della sua ubicazione ovvero verificare l'esistenza o meno di un contesto legato all'edificio.

A cinque anni di distanza dall'avvio di questa iniziativa, il quadro emerso è di assoluto rilievo con elementi del tutto nuovi e originali che riguardano non solo il capitolo inerente alla fondazione dell'edificio di culto, ma anche il quadro, ampio e complesso, dell'origine, dell'organizzazione e della variabilità d'uso di un sistema di presidi fortificati impostato e mantenuto nelle Alpi centrali, tra V e X secolo. Tema al quale la ricerca archeologica ha già fornito (e continua a fornire) un proprio, fondamentale contributo in chiave materiale, cronologica e interpretativa.

### 4. LA SEQUENZA EDILIZIA

#### 4.1 *Una chiesa funeraria altomedievale*

All'origine dell'oratorio medievale, posto su declivio roccioso dell'alto topografico del monte (Fig. 2), è un'aula di età precedente impostata a ridosso di un tratto delle difese murarie che cingono la sommità (Figg. 4 e 7). Provvista di abside semicircolare distinta a E e di atrio chiuso a O, questa ha restituito una "tomba del fondatore" collocata in corrispondenza dell'imbocco del catino absidale. Altre sepolture, sei in totale, sono state recuperate in punti diversi della navata e all'esterno di questa. Si tratta di un gruppo antropologicamente molto selezionato: maschi e giovani adolescenti inumati dentro casse in legno deposte in fosse terragne, privi di corredo o di altro particolare elemento distintivo di ruolo o di *status*. Sottoposti ad analisi radiocarbonica, questi resti hanno fornito una datazione assoluta compresa tra V-VI e i primi decenni del VII secolo, periodo confermato per l'edificio da altri indicatori, fra cui pezzi dell'originario apparato liturgico dispersi a causa dei rifacimenti più tardi. Notevole è anche la testimonianza di *luminaria* con recupero di vetri

pertinenti per lo più a lampade a cono e a calici, indizio prezioso di attenzione e preghiera sulle tombe secondo pratiche proprie del periodo (esemplare in questo è il dossier della famiglia dei Totonì edito da GASPARRI, LA ROCCA 2005; cfr. anche LUSUARDI SIENA 2007).

#### 4.2 *Rifacimento medievale*

La data del rifacimento non è certa, anche se ragioni di ordine materiale consigliano di restringerla entro il XII-XIII secolo, dopo un radicale intervento di demolizione di tutte le parti edilizie preesistenti sul posto. Ciò che viene riproposto mantiene le dimensioni e la forma dell'aula precedente (misure interne: m 8×7,5; esterne: m 9,30×8,50), usando come piano di fondazione o come elemento di controspinta vecchie murature rasate o adattate ad arte, come accade sull'estradosso dell'abside (Fig. 4). Scompare invece l'atrio, forse ridotto a portico aperto lungo i lati e protetto da una copertura sorretta agli angoli esterni da pilastri in legno. Al di sotto, sul crollo spianato, si forma un battuto di terra privo di soluzioni di continuità con il sagrato. Nulla rimane a segnalare l'originale imposta del tetto, molto probabilmente a capanna con doppio spiovente e colmo a una quota di altezza non inferiore ai 4,30 m. Una finestra a monofora strombata dava luce all'interno da S.

I muri perimetrali, di spessore omogeneo (0,50-0,60 m), sono realizzati in opera incerta con pietrame di piccola dimensione ricavato dalle demolizioni e messo in opera con sufficiente maestria (Fig. 3). Come legante è stata utilizzata una malta di calce, molto povera e friabile se non adeguatamente protetta. Nei prospetti compaiono anche degli *spolia*: pezzi per lo più derivati da elementi architettonici che marcavano porte e aperture di costruzioni precedenti presenti sul luogo. Di reimpiego sono anche i monoliti che marcano l'accesso originario, sul lato N e più tardi spostato altrove.

La pavimentazione è in basoli di grandi dimensioni, estratti da una cava posta a monte del sito nei pressi del Passo di San Giovanni e la cui posa ha richiesto la rimozione di tutti i piani d'uso più antichi. Riferimenti cronologici per questa fase provengono principalmente da pezzi monetali: una serie che ha inizio con denari crociati veronesi e veneziani della seconda metà del XII secolo e termine con monete delle zecche milanesi e tirolesi del tardo XIV secolo.

#### 4.3 *Ulteriori attività tra XVI e XVIII secolo*

Dopo la ricostruzione, la stratificazione muraria così come la successione dei pavimenti indicano almeno altri due principali interventi (Fig. 7). Il cedimento statico del tratto orientale determinò una riduzione dello spazio interno, semplificato in aula a pianta quadrata con nuova parete di fondo sul tamponamento del vano sottostante l'arco santo. Connessa è una ricon-



Fig. 3 – Monte di San Martino: ruderi dell'oratorio medievale (foto Giovanni Bellosi 2005).

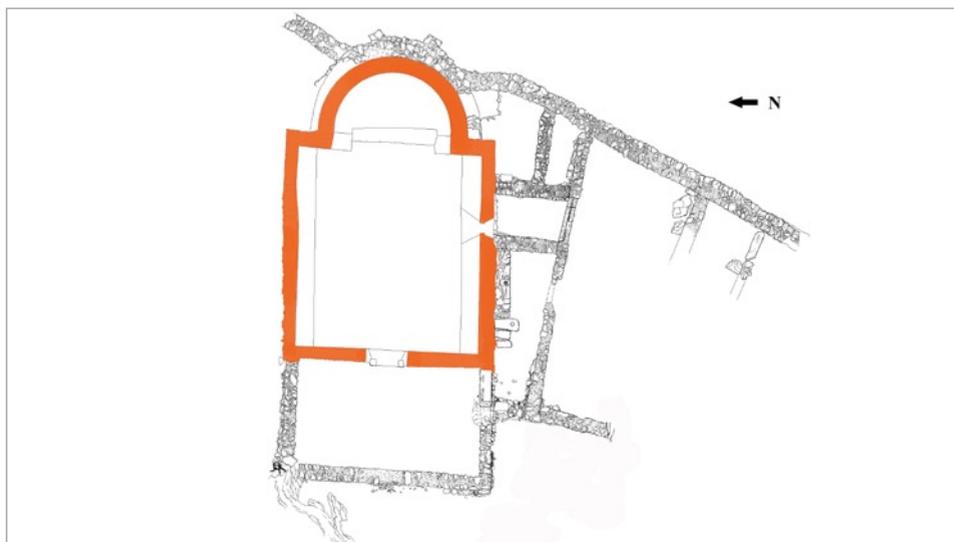


Fig. 4 – Sett. 1-2: planimetria generale (in arancio la pianta dell'oratorio medievale di San Martino).

sacrazione che consegue il posizionamento di un nuovo altare a ridosso della nuova parete realizzata.

Meno certo è se in questa stessa occasione o se in momenti di poco successivi sia da datare l'introduzione di una volta a botte di copertura interna, longitudinalmente impostata al piede dei muri laterali, che raddoppiano di spessore. L'introduzione della volta comporta l'occlusione dell'accesso da N, che obbliga a ricavarne uno nuovo, rompendo il muro di facciata, dove viene collocata una porta marcata da architrave modanato e da pilastri squadrati in calcare oolitico. Secondo prassi ricorrente negli interventi di *renovatio ecclesiae* conseguenti alla riforma conciliare tridentina, ai lati del nuovo portale vengono realizzate anche una o due finestre rettangolari. Marcate da cornici squadrate in pietra calcarea oolitica e protette con inferriata metallica e finestra a doppia anta mobile di chiusura interna, esse sono scomparse. Rimane invece al suo posto una monofora laterale strombata, mentre in prossimità dell'angolo interno sud-orientale risulta predisposta una nicchia quadrata, utile per riporre della suppellettile in assenza di altro locale idoneo.

Questi lavori sono conclusi dalla messa in opera di un nuovo pavimento: un battuto in malta di calce a composizione grossolana, lievemente lisciata, posto direttamente sulle lastre della precedente fase. È questo l'edificio con tetto a capanna che una veduta dei primi decenni dell'Ottocento mostra in lontananza a corona dei monti che sovrastano la pieve di Lomaso, unica testimonianza iconografica disponibile (Johanna von Isser Grossrubatscher, *Castell Spine 1832*, carboncino su carta edito in PEROGALLI, A PRATO 1987, 81).

Altri interventi, non rilevanti, si datano ad età più tarda, compresa tra Settecento e Ottocento. Fra questi è anche una nuova pavimentazione in mattonelle quadrate in cotto, allettate sul precedente battuto di malta. È su questo livello di calpestio che nel corso del Novecento avviene il collasso dell'edificio. Un fenomeno di disfacimento graduale innescato dall'asporto della copertura che, non più ripristinata né mantenuta, rende il corpo edilizio fragile ed esposto agli agenti atmosferici. Definitivamente abbandonata, la costruzione è lasciata crollare.

## 5. MODELLAZIONE DIGITALE: METODI A CONFRONTO

Già nella premessa è stato ricordato come un modello tridimensionale sia in grado di fornire una documentazione accurata e disponibile per diverse utilizzazioni attraverso l'elaborazione e la contestualizzazione di un'enorme quantità di informazioni, non ottenibili né visualizzabili in un ambiente bidimensionale. L'ampio orizzonte delle possibili applicazioni è stato verificato con sistematicità e l'impiego delle tecniche di modellazione tridimensionale è diventato molto significativo nel rilievo architettonico, in virtù dell'elevata precisione degli strumenti disponibili (FORTE 2006;

LAMBERS, REMONDINO 2007; REMONDINO, CAMPANA 2007; PERIPIMENO 2009b). La possibilità di documentare, con notevole accuratezza, geometrie molto complesse permette, infatti, studi più attenti e approfonditi delle tecniche costruttive, consentendo la visualizzazione e la successiva analisi di particolari difficilmente documentabili con le tecniche tradizionali. In questo ambito devono essere segnalate anche interessanti applicazioni nella lettura stratigrafica delle unità murarie, nell'individuazione e nel controllo delle deformazioni strutturali, nel recupero e nella conservazione di edifici a valenza storica, con possibilità di praticare, prima dell'azione diretta sul manufatto, interventi virtuali in grado di confrontare e indirizzare metodiche specifiche di recupero e di restauro oltre che opere di ricostruzione di parti crollate o modificate.

Una volta liberati dalla vegetazione e dagli accumuli di abbandono, i ruderi dell'oratorio di San Martino ben si sono prestati ad un'operazione di rilievo tridimensionale mirato alla sperimentazione e alla creazione, mediante moderne tecnologie di rilievo, di un modello digitale, preciso e fotorealistico, su cui operare e pensare anche "a ciò che è stato e non più è rimasto", compito anch'esso dell'osservazione archeologica (MANACORDA 2004, 7).

### 5.1 *Tecniche ed applicazioni*

Come è noto, il termine modellazione digitale indica il procedimento finalizzato alla realizzazione mediante software specializzati di un modello virtuale tridimensionale di un oggetto inanimato, ma anche di un essere vivente, utilizzando un preciso modello matematico. Sfruttando prevalentemente onde luminose, la maggior parte delle tecniche di rilievo utilizza sistemi non invasivi, che hanno raggiunto un livello di accuratezza e di velocità di acquisizione che ne giustifica la crescente diffusione in differenti settori: dal design all'industria in genere, dall'architettura all'ingegneria civile e al settore geologico (PERIPIMENO 2009b, 63), senza dimenticare le applicazioni possibili nel vasto ambiente del patrimonio culturale con riferimento alla documentazione, alla catalogazione e alla conservazione dei beni.

I metodi ottici utilizzati per la ricostruzione digitale possono essere suddivisi in due classi, ben distinte e caratterizzate da differenti tipologie di sensori e di procedimento impiegato. Esse prendono rispettivamente il nome di modellazione a sistemi ottici passivi (*Image-based Modeling, IBM*) e di modellazione a sistemi ottici attivi (*Range-based Modeling, RBM*).

### 5.2 *Sistemi ottici passivi (Image-based Modeling, IBM)*

Le differenti tecniche su cui si basano i sistemi ottici passivi, tra cui rientra la fotogrammetria, sono caratterizzate dall'acquisizione di almeno due immagini ottenute da differente posizione del manufatto che si intende

acquisire. Nella configurazione più semplice i vertici sono costituiti dai centri di presa di due fotocamere, che forniscono una coppia di fotogrammi, e dal punto-oggetto ripreso sulla superficie dell'oggetto. Coordinate tridimensionali, geometria e tessitura dell'oggetto vengono ricostruite manualmente, ricavando le informazioni necessarie da punti omologhi presenti in almeno due fotografie attraverso i principi della triangolazione e della collinearità. A differenza dei sistemi ottici attivi, questa categoria di modellazione si caratterizza per l'utilizzo di dispositivi in grado di catturare onde luminose, ma non di produrle. Gli strumenti impiegati, infatti, sono costituiti da sensori posti all'interno di normali fotocamere o installati anche su particolari mezzi aerei in grado di realizzare immagini di qualità più o meno elevata.

Il maggior vantaggio delle tecniche di rilievo a sensori passivi è dato dalla relativa economicità dei mezzi impiegati, soprattutto per quanto riguarda le applicazioni terrestri. Per essi, infatti, bastano delle normali fotocamere di costo assai contenuto, se paragonato a quello richiesto per l'acquisto di uno strumento per il sistema ottico attivo. L'elevata maneggevolezza, il peso e le dimensioni ridotte delle fotocamere costituiscono poi un altro indubbio vantaggio a favore dei metodi IBM, rendendo di fatto assai agevole la fase di ripresa. Inoltre, i procedimenti IBM sono in grado di fornire direttamente la tessitura dell'oggetto rilevato (REMONDINO 2008).

Per documentare un oggetto nella sua interezza o per coprire le eventuali lacune e occlusioni causate dalla complessità della sua geometria o dalla presenza di eventuali ostacoli, le tecniche IBM, come quelle RBM, richiedono tuttavia numerose registrazioni da posizioni diverse. A compensare ciò interviene comunque la rapidità di acquisizione delle immagini, di molto superiore rispetto al tempo richiesto da una scansione con laser, e l'assenza, nel tempo di ripresa, di qualsiasi interposizione di ostacoli tra oggetto e strumento. Altra prerogativa delle tecniche di rilievo a sensori passivi è la possibilità di non dover modificare in maniera sostanziale le modalità operative di acquisizione delle immagini per adeguarle alle dimensioni dell'oggetto e alla distanza: per questo motivo i procedimenti IBM sono anche definiti *range and volume independent*, cioè indipendenti dal volume dell'oggetto e dalla distanza di acquisizione.

I sistemi ottici passivi, tuttavia, richiedono un elevato grado di esperienza per svolgere in maniera completa il procedimento di modellazione, a cominciare dall'acquisizione dei dati. Per registrare interamente la geometria di un manufatto, un buon operatore deve pianificare accuratamente le posizioni di presa, evitando ridondanze inutili di dati o la mancanza della necessaria copertura per l'individuazione dei punti omologhi nei fotogrammi. Tutte le varianti dei procedimenti IBM hanno poi in comune la necessità di numerose e delicate operazioni manuali di elaborazione (orientamento esterno delle immagini, ricerca di punti omologhi, matching), passaggi complicati e laboriosi, ma fondamentali e necessari per ottenere una nuvola di punti tridimensionale.

Infine, le caratteristiche geometriche stesse di un qualsiasi manufatto possono influenzare i diversi procedimenti IBM, in misura assai più significativa di quanto non avvenga in tutte le forme di modellazione con metodi a sistemi ottici attivi. Nelle tecniche a sensori passivi, infatti, è stata riscontrata una maggiore difficoltà nella modellazione dei dettagli più minuziosi, anche se numerose ricerche hanno evidenziato come una buona esperienza sia in grado di restituire risultati del tutto identici a quelli forniti dagli assai più costosi laser scanner (REMONDINO, CAMPANA 2007).

### 5.3 Sistemi ottici attivi (*Range-based Modeling, RBM*)

A questa categoria appartengono tutte le tecniche di rilievo che, utilizzando differenti principi di misurazione, sono in grado di generare onde luminose. Tali sono, ad esempio, il laser scanner terrestre o il laser scanner montato su veicoli aerei (LiDAR, *Light Detection and Ranging*), strumenti ancora molto costosi, oltre che ingombranti e per questo non sempre di facile impiego. Il principio di funzionamento di questi strumenti si basa sulla produzione di onde luminose che, dopo aver colpito la superficie dell'oggetto, rimbalzano e vengono registrate da un sensore presente sullo strumento e, quindi, trasformate direttamente in informazioni spaziali tridimensionali riferite ai punti rilevati (nuvole di punti).

Le tecniche di modellazione si basano su differenti principi di misurazione – a triangolazione e *time delay* – che determinano il grado di accuratezza e la distanza massima tra il laser scanner e l'oggetto rilevato. Gli strumenti che utilizzano il principio della triangolazione forniscono un'accuratezza di risultato molto alta, tra i 10 e i 100  $\mu\text{m}$ , ma con un raggio massimo di ripresa inferiore a 5 m. Il sistema *time delay* è invece in grado di rilevare oggetti più distanti, anche un chilometro, ma con un'accuratezza di risultato minore, compresa tra 2 e 20 mm.

Nella tecnica laser a triangolazione la configurazione di presa si presenta pressoché identica a quella fotogrammetrica, a condizione che una delle due camere venga sostituita con una sorgente luminosa: il sensore passivo presente nella camera è infatti in grado di registrare la luce riflessa dalla superficie di un oggetto ripreso. Il funzionamento degli scanner *time delay* si basa invece sul tempo che il segnale emesso impiega a ritornare allo strumento emittente. Coordinate polari, distanza e conoscenza dei due angoli di emissione del raggio consentono di determinare la posizione del punto in questione. Pertanto gli strumenti appartenenti a quest'ultima categoria utilizzano soprattutto una procedura basata sulla misura del tempo di volo di un impulso laser generato con una frequenza precedentemente impostata (TOF, *Time Of Flight*). Di questo viene misurato il tempo trascorso tra emissione e ricezione riflessa. Il dato è quindi inviato ad un microelaboratore interno che trasforma l'informazione

ricevuta in una misura spaziale la quale esprime precisamente la distanza tra il centro dello strumento e ogni singolo punto rilevato.

L'indiscusso vantaggio dei sistemi a sensori ottici attivi è rappresentato dall'estrema semplicità del procedimento impiegato, che permette anche ad un operatore poco esperto di ottenere un modello digitale preciso e accurato attraverso procedimenti prevalentemente automatici e in tempi rapidi. Mediante scansioni laser, infatti, si ottengono direttamente una o più nuvole di punti tridimensionali ad altissima densità (da migliaia di punti fino ad alcuni milioni) che restituiscono in maniera molto dettagliata la superficie di ciò che è stato rilevato. Sebbene il tempo necessario per una scansione laser, rispetto a quello richiesto dal processo fotogrammetrico, può essere assai più lungo e dipendere da molteplici fattori, quali ad esempio il tipo di superficie da rilevare o di strumento usato, esso si recupera nella fase di processamento dei dati (allineamento delle scansioni, creazione delle superfici e applicazione della tessitura), che rende il procedimento di elaborazione impiegato nella modellazione complessivamente più breve, oltre che più semplice.

Altro vantaggio consiste nella possibilità di visualizzare in tempo reale il risultato delle scansioni, anche se nella forma grezza di una nuvola di punti. Ciò rende i sistemi RBM decisamente più adatti rispetto al metodo fotogrammetrico in tutte quelle attività che necessitano di tempi estremamente brevi nell'elaborazione dei dati, come spesso si registra in contesti di scavo dettati da urgenza.

Permane, però, il costo ancora molto elevato dei laser scanner e dei software di modellazione impiegati. Inoltre restano anche le difficoltà logistiche legate all'impiego dei laser scanner: trasporto, alimentazione, ingombro, tempo necessario per acquisire le immagini. Aspetti, tutti, che nel presente mantengono ancora molto competitivi i procedimenti a sensori passivi. A questo va aggiunto anche un altro fattore di criticità. Nonostante l'accuratezza del modello elaborato con tecniche a sensori attivi, la maggior parte degli strumenti disponibili consente di ricavare unicamente la geometria dell'oggetto, ma non la varietà dei colori restituita solo con una scala di valori monocromatici. Appare evidente, pertanto, che la generazione di modelli fotorealistici effettuata con questa tecnica deve essere necessariamente accompagnata dall'acquisizione della tessitura cromatica mediante camere RGB ad alta risoluzione. Le scansioni laser, inoltre, producono un'enorme quantità di dati, spesso ridondanti, che necessitano di un processo di elaborazione e di riduzione per poter disporre di un modello consultabile non troppo pesante.

Un ulteriore svantaggio, riscontrato sia nei laser a triangolazione sia in quelli a *time delay*, è dato dalla luce solare che, quando presente, genera onde a frequenza simile a quella del segnale laser, con un conseguente potenziale motivo di alterazione del risultato delle scansioni: da ciò la difficoltà ad operare durante il giorno in ambienti aperti. Bisogna inoltre tenere in conto la sensibilità che i sistemi RBM hanno per altri fattori determinati

come, ad esempio, la distanza tra laser e oggetto da rilevare e le dimensioni di quest'ultimo (*range and volume dependent*). Infine, un elemento che limita anche notevolmente le prestazioni dei laser scanner è il materiale stesso con cui è realizzato il manufatto sottoposto a rilievo. Il metodo delle misurazioni geometriche con sistemi ottici attivi richiede infatti che la superficie da rappresentare sia opaca e in grado di riflettere la luce in maniera diffusa. Numerose, quindi, sono le incongruenze causate da tutte quelle superfici che presentano anomalie rispetto ai principi tradizionali della riflessione e della trasparenza, causa per cui il segnale laser può venir deflesso e quindi non essere corretto. Attualmente non esiste quindi un laser scanner che possa essere impiegato in maniera soddisfacente sempre e ovunque. Lo strumento va pertanto scelto in base a ciò che si desidera rilevare e riprodurre, alla distanza a cui lo strumento può essere collocato e al grado di accuratezza che si intende raggiungere.

#### 5.4 Integrazione tra tecniche IBM e RBM

Da queste considerazioni emerge chiaramente che non esiste una singola tecnica capace di soddisfare contemporaneamente i parametri di economicità, di rapidità di acquisizione, di elevata accuratezza geometrica, di flessibilità, di piena automazione, di facilità del trasporto e di fotorealismo. L'integrazione delle differenti tecniche RBM e IBM, insieme a ricognizioni sul campo finalizzate all'acquisizione delle coordinate spaziali dell'oggetto mediante GPS e a riprese fotografiche, rimane quindi necessaria tanto più di fronte alla documentazione di oggetti particolarmente complessi e di notevoli dimensioni, per i quali una singola tecnica da sola non è in grado di produrre velocemente un modello tridimensionale accurato, completo e facile da consultare.

Esperienze di lavoro hanno ampiamente dimostrato come l'integrazione di differenti metodologie e di differenti tecnologie produca i risultati migliori in termini di dettaglio, tempo di acquisizione, metodo di elaborazione, quantità di dati e qualità della visualizzazione (RIZZI *et al.* 2007). Risulta pertanto evidente come la scelta della tecnica e degli strumenti da impiegare dipenda da un complesso di fattori, non solo di budget, ma anche di accessibilità ai luoghi, di spazio, di natura e dimensioni dell'oggetto da rilevare, di livello e grado di dettaglio desiderato, senza dimenticare il grado di esperienza del gruppo di lavoro.

#### 6. L'ORATORIO DI MONTE SAN MARTINO: RILIEVO ED ELABORAZIONE DEI DATI

La scelta di utilizzare la modellazione laser scanning è stata determinata dalla possibilità di accedere direttamente al sito con strumenti e attrezzature, dall'assenza di ostacoli e dalle caratteristiche dell'edificio, oltre che dalla semplicità del procedimento.

Per il rilievo è stato impiegato uno scanner Leica Scanstation "a tempo di volo" in grado di offrire fino a 4000 punti al secondo, ognuno dei quali

caratterizzato da tre coordinate spaziali ( $x, y, z$ ). Nel pianificare il numero di scansioni, si è cercata una soluzione intermedia tra due livelli estremi, valutando anzitutto come l'elevato numero di scansioni necessario a coprire interamente l'edificio comportasse una notevole mole di dati da gestire, la cui ridondanza avrebbe potuto produrre conseguenze sulla capacità di memoria, sui tempi di elaborazione e sulla precisione del risultato finale. D'altro canto, un numero troppo esiguo di registrazioni avrebbe determinato la mancata copertura di alcune aree e l'impossibilità di ottenere una buona sovrapposizione tra scansioni adiacenti, necessaria per poter eseguire l'integrazione e avere una continuità nella restituzione digitale del manufatto rilevato.

La registrazione completa dell'edificio (interno ed esterno) ha richiesto undici scansioni per un totale di circa 8 milioni di punti registrati. Il tempo necessario per l'intera operazione è stato di circa 4 ore. Nella medesima occasione, con una fotocamera Kodak DCS ProSRL/n da 13.5 megapixel, si è provveduto ad acquisire una documentazione fotografica ad alta risoluzione del manufatto con fotogrammi applicabili al modello digitale. L'utilizzo di un obiettivo grandangolare ha favorito la ripresa ortogonale delle pareti ovviando a problemi di osservazione causati da una morfologia del suolo caratterizzata da dislivelli, brusche pendenze, presenza di superfici non calpestabili o accidentate che talvolta hanno limitato le possibilità di scelta della postazione di presa, sia con il laser scanner sia con la macchina fotografica. Con la medesima fotocamera sono state effettuate anche delle riprese più mirate relative a porzioni di muro e particolari elementi da utilizzare in seguito, nella fase di texture mapping o di correzione/integrazione dei dettagli. A completamento sono stati infine rilevati con GPS alcuni punti-guida dell'edificio così da permetterne la georeferenziazione.

Tutti i dati ottenuti con laser scanner sono stati processati con allineamento delle scansioni, creazione delle mesh, editing, semplificazione geometrica, applicazione della tessitura. La maggior parte del processo di restituzione è stata eseguita con software commerciale PolyWorks, prodotto dalla canadese InnovMetric e dotato di numerose funzioni capaci di eseguire la vasta gamma di passaggi necessari alla realizzazione di un modello digitale, oltre che la gestione di dati spaziali e la loro eventuale elaborazione. L'intera attività ha richiesto un totale di circa 300 ore/uomo.

Punto di partenza è stata la registrazione delle range map, ovvero l'allineamento in un medesimo sistema di riferimento delle singole nuvole di punti prodotte dalle scansioni. Quale risultato si è ottenuta una nuvola di punti comprendente l'insieme delle singole scansioni raccolte. Si è passati, quindi, alla cosiddetta fase di fusione delle range map ovvero alla trasformazione del modello digitale definito per punti, caratterizzato da un alto grado di ridondanza, in un modello costituito da superfici triangolate (mesh) capace di condurre ad una visione più immediata e intuitiva del manufatto ripreso

(PELOSO 2005, 211). Come primo passo si è provveduto all'eliminazione dei punti ridondanti e, quindi, è stato realizzato il modello digitale tridimensionale, composto da oltre cinque milioni di triangoli.

Attraverso un procedimento di semplificazione controllata è stato ridotto il numero di vertici e di triangoli necessario per diminuire la mole di dati prodotti, prestando attenzione a non perdere tuttavia le caratteristiche del modello in termini di livello di dettaglio e di accuratezza. Ha fatto seguito quindi la fase di editing, nella quale la parte più impegnativa è stata la ricostruzione delle parti non rilevate dal laser per la presenza di ostacoli tra strumento e superficie da rilevare o perché sottosquadra rispetto allo strumento stesso. Manualmente sono state completate le parti laterali e sommitale dell'altare, il piano pavimentale interno non più presente al momento del rilievo al termine dello scavo. In modo particolare si è intervenuti sulle testate murarie di rasatura, registrate solo parzialmente dal laser per la loro posizione.

Per non creare un netto contrasto con le parti dell'edificio esistenti, estremamente dettagliate in quanto composte da triangoli molto piccoli, nel ricreare queste superfici si è cercato di non superare una determinata dimensione dei triangoli generati, agendo entro parametri stabiliti. Il procedimento ha permesso così di ottenere un modello digitale completo, accurato e misurabile per quanto riguarda dimensioni spaziali e proporzioni, ma non per quanto concerne la resa policromatica che, come già ricordato, il laser scanner non è in grado di riprodurre.

Per avere un prodotto fortemente realistico (Fig. 5) è stato quindi necessario applicare la tessitura ricavata dalle fotografie ad alta risoluzione scattate in cantiere al modello digitale ottenuto: immagini con formato HDR, caratterizzate da maggiore dinamica in termini di contrasto e luminosità<sup>2</sup>, inserite direttamente sulle corrispondenti parti del modello mediante un processo di texture mapping eseguito attraverso TextCapture, un software basato sul riconoscimento e sulla conseguente associazione di punti omologhi presenti sia sulla fotografia sia sul modello digitale tridimensionale. Per raggiungere un buon risultato è stato necessario individuare e selezionare i punti omologhi in modo da coprire uniformemente l'intera superficie del modello,

<sup>2</sup> Spesso la gamma di luminosità presente in un'immagine è più ampia di quella che può essere catturata in una singola esposizione. Alcuni elementi presenti sulla scena possono essere infatti correttamente visualizzati e registrati dalla camera solo attraverso una determinata esposizione che, però, non rende possibile analizzare in maniera accurata altri elementi che nella scena risultano, probabilmente, sovraesposti o sottoesposti. A questo inconveniente si può rimediare mediante l'acquisizione di immagini HDR (*High Dynamic Range*) che necessitano di un maggior numero di bit per colore rispetto alle tradizionali immagini (in genere 16 o 32), rappresentando uno spettro maggiore di valori della luce. Per questo esse differiscono dalle informazioni fornite da normali immagini digitali, che memorizzano solo i colori necessari ad essere riprodotti su uno schermo. La tecnica di acquisizione HDR consiste nello scatto di più fotografie della medesima scena utilizzando differenti valori di esposizione, che vengono in seguito "fusi" in un'unica immagine.

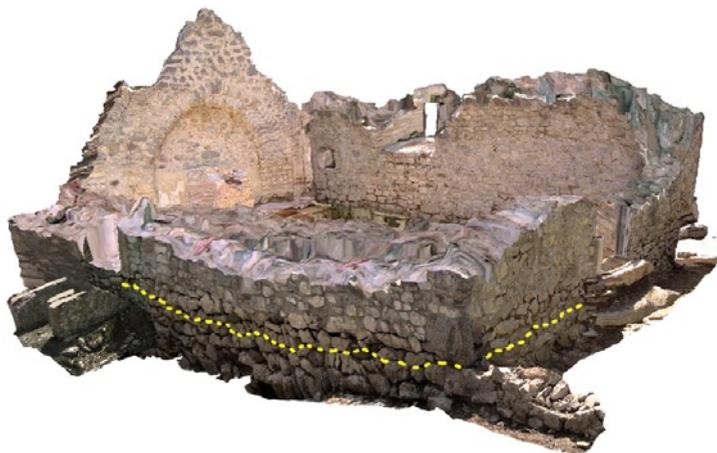


Fig. 5 – Modello dell'oratorio (visione da N-O). In giallo l'interfaccia tra le parti edilizie altomedievali e medievali.

prestando una particolare attenzione alle aree più significative quali spigoli, gradini, margini, etc.

Questa operazione è risultata particolarmente complicata per quanto riguarda la parte absidale dell'edificio, a causa dell'andamento curvo delle pareti. Rispetto all'applicazione su superfici piane, di fronte a superfici curve lo stiramento dell'immagine sul modello digitale tridimensionale risulta infatti più marcato.

Per quanto concerne la definizione dei colori, un aspetto affrontato è stato quello della tonalità che appare diversa in ragione di fotografie scattate da diversa posizione con conseguente variazione di luce. La proiezione di queste immagini sul modello digitale comporta differenze radiometriche e, quindi, un fastidioso effetto di discontinuità. In questo caso è stato pertanto importante sviluppare opportuni procedimenti di bilanciamento del colore e della luminosità, in modo da ottenere immagini il più possibile omogenee tra loro.

Grazie alle coordinate spaziali della struttura rilevata in precedenza, l'ultimo passaggio è dato dal posizionamento del modello 3D del rudere texturizzato sul modello del terreno, ottenuto mediante volo LiDAR e su cui è stata applicata una fotografia aerea.

## 7. APPLICAZIONI E POSSIBILITÀ DI UTILIZZO FUTURE

Il primo indiscutibile vantaggio fornito dal modello tridimensionale è l'immediata visualizzazione dell'oggetto rilevato nella sua interezza, senza

dover ricorrere ad un numero elevato di prospetti: almeno otto nel caso esaminato per documentare integralmente le pareti, interne ed esterne. Quanto ottenuto risulta caratterizzato da una conoscenza geometrica globale di tutti gli elementi presenti e da una fedele riproduzione della tessitura. Ciò appare importante in termini di documentazione e utilizzabile appieno anche per un eventuale ripristino nel caso in cui disgraziatamente il bene riprodotto andasse perduto.

Altra opportunità offerta dal modello è l'estrazione di informazioni di tipo metrico estremamente precise, con un margine di errore inferiore al millimetro, reso possibile dalla densa nuvola di punti ottenuta in sede di rilievo laser scanner. Sul modello digitale è possibile misurare con immediatezza spessori, distanze, larghezza e lunghezza delle pietre o di altri particolari edilizi e architettonici, calcolare superfici, perimetri, volumi, sezioni, vettorializzare singoli elementi ed estrarre automaticamente spigoli, profili o altre parti.

Questo apre prospettive di indubbio interesse per interventi sull'architettura storica, che nel caso in esame significa il controllo degli interventi di conservazione e di manutenzione, ma anche – in prospettiva – di elaborazione di un rendering fedele a quanto rimasto. Il tutto sarà agevolato dalla possibilità di ricavare con estrema praticità dati relativi alle proporzioni geometriche direttamente dal computer, mantenendo così distinte dalla traccia reale le ricostruzioni interpretative, cariche di infinite incertezze.

Altra possibilità è l'esportazione del modello (o di porzioni selezionate e vettorializzate manualmente di esso) in formati di interscambio standard per essere elaborato in software CAD (Fig. 6). In questo modo, attraverso la creazione di sezioni posizionate a piacimento, è possibile ad esempio verificare l'aumento o la diminuzione dello spessore degli alzati e, quindi, verificare discontinuità nella prassi di costruzione. Sul modello è quindi possibile isolare e trattare separatamente le differenti situazioni e le fasi edilizie, elaborandone una sequenza con tracce realistiche (Fig. 7).

Al modello digitale possono essere applicate fotografie storiche, che riprendono il manufatto in un'epoca precedente operando di fatto un'analisi metrica virtuale di parti murarie mancanti o modificate (FRASSINE *et al.* 2008, 310-316). Nel caso presente è stata applicata alla corrispondente porzione del modello un'immagine che ritrae la parete orientale interna prima dell'intervento di consolidamento reso urgente dalla precarietà strutturale della vela superstite, una volta liberata dal terreno che la circondava e copriva per massima parte (Fig. 8). Il procedimento è stato possibile selezionando in Polyworks quattordici punti presenti sul modello digitale della parete e visibili anche nella fotografia<sup>3</sup>, mediante i quali è stato possibile ricavare i parametri

<sup>3</sup> Immagine tratta da un positivo ottenuto con macchina fotografica reflex Nikon, modello Nikkormat, con lunghezza focale compresa tra 28 mm e di 50 mm.

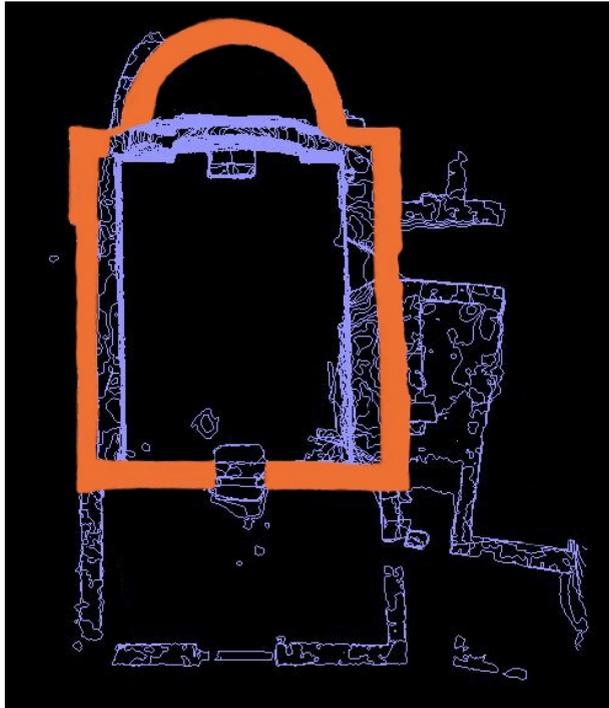


Fig. 6 – Pianta dell'oratorio ricavata direttamente dal modello 3D. In arancio le parti edilizie di età medievale (post XII sec.).

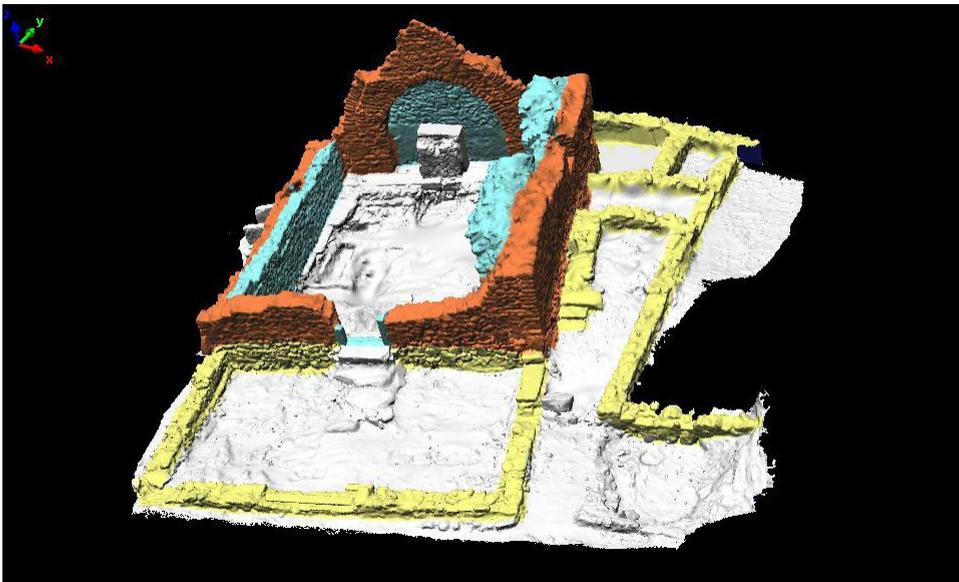


Fig. 7 – Fasi costruttive medievali (in arancio) e postmedievali (in azzurro) evidenziate direttamente sul modello 3D. In giallo le preesistenze di età altomedievale.



a



b

Fig. 8 – a) modello 3D della parete orientale dell’aula a fine intervento; b) immagine fotografica 2D delle parti originali emergenti della parete applicata sul modello 3D.

interni della macchina fotografica. In seguito, ripetendo l'operazione di texture mapping già svolta in precedenza in TextCapture, è stato possibile associare l'immagine fotografica 2D al corrispondente rilievo digitale ottenendo, quindi, un modello provvisto di tessitura. Altrettanto si ritiene di poter fare con immagini relative alle restanti pareti al fine di ottenere dei risultati significativi, misurabili e confrontabili di situazioni e condizioni edilizie precedenti lo stato attuale del rudere consolidato.

Ulteriore applicazione è l'inserimento del modello dell'edificio, e con esso di altre strutture e manufatti edilizi di età precedente riportati in luce nel sito, su un modello coorografico tridimensionale del terreno portando ad una veduta globale non solo spaziale, ma di trasformazione nel *continuum* della storia e nei rapporti avuti dai diversi elementi antropici con il paesaggio circostante durante le fasi di vita dell'insediamento come anche in quelle di distruzione, di abbandono, di scomparsa<sup>4</sup>.

ENRICO CAVADA

Soprintendenza per i Beni Archeologici – Trento

MATTEO RAPANÀ

Fondazione Bruno Kessler (FBK) – Trento

#### BIBLIOGRAFIA

- BROGIOLO G.P. 2004, *Progetti di ricerca territoriale Garda orientale-Giudicarie*, in DE VOS 2004, 505-510.
- BROGIOLO G.P., CAVADA E., COLECCHIA A. 2004, *L'aerofotointerpretazione come strumento di lettura del paesaggio antico: possibilità applicative in area alpina. L'esperienza nelle Giudicarie*, in DE VOS 2004, 511-546.
- CAMPANA S., FRANCOVICH R. (eds.) 2006, *Laser scanner e GPS. Paesaggi archeologici e tecnologie digitali 1. Atti del Workshop (Grosseto 2005)*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- CANTINO WATAGHIN G. 2007, *Luoghi di strada nell'arco alpino altomedievale*, in *Carlo Magno e le Alpi* 2007, 269-298.
- Carlo Magno e le Alpi* 2007, *Carlo Magno e le Alpi. Atti del XVIII Congresso internazionale di Studi sull'Alto Medioevo (Susa 2006)*, Spoleto, Fondazione CISAM.
- CASTAGNETTI A. 1983, *Le comunità della regione gardense fra potere centrale, governi cittadini e autonomie nel medioevo (secolo VIII-XIV)*, in G. BORELLI (ed.), *Un lago, una civiltà: il Garda*, Verona, Banca Popolare di Verona, 37-39.
- CAVADA E. 2007, *Loci Sancti Martini: la chiesa e la fortezza. Riflessioni su presenze e luoghi nelle valli alpine centrali*, in *Carlo Magno e le Alpi* 2007, 229-251.
- COLECCHIA A. 2001, *Metodi di approccio al territorio per lo studio del paesaggio antico. L'esperienza nelle Giudicarie Esteriori (TN) dall'aerofotointerpretazione all'indagine sul terreno*, «Archeologia Medievale», 28, 441-452.

<sup>4</sup> Per interessanti applicazioni su un modello tridimensionale del terreno, quali la Viewshed Analysis e la Cost Surface Analysis, si rimanda a PECERE 2006, 182-185.

- DE FELICE G., SIBILANO M.G., VOLPE G. 2008, *Ripensare la documentazione archeologica: nuovi percorsi per la ricerca e la comunicazione*, «Archeologia e Calcolatori», 19, 271-291.
- DE VOS M. (ed.) 2004, *Archeologia del territorio. Metodi Materiali Prospettive*, Trento, Università degli Studi di Trento.
- FORTE M. 2006, *Tra conoscenza e comunicazione in archeologia: considerazioni in merito alla terza dimensione*, in CAMPANA, FRANCOVICH 2006, 23-40.
- FRASSINE M., ROSADA G., FABRIS M., ACHILLI V., BRAGAGNOLO D., BEZZI A. 2008, "Mura della Bastia" - Onigo di Ponterobba (Treviso). *Ricerche archeologiche, rilievo 3D Laser scanning e anastilosi virtuale in un castello medievale del pedemonte trevigiano*, «Archeologia e Calcolatori», 19, 293-321.
- FRONZA V., NARDINI A., VALENTI M. 2009 (eds.), *Informatica e Archeologia medievale. L'esperienza senese*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- GASPARRI S., LA ROCCA C. (eds.) 2005, *Carte di famiglia. Strategie, rappresentazione e memoria del gruppo familiare di Totone da Campione (721-877)*, Roma, Viella.
- LAMBERS K., REMONDINO F. 2008, *Optical 3D measurement techniques in archaeology: recent developments and applications*, in *Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (Berlin 2007)*, Bonn, Rudolf Habelt GmbH, 27-35.
- LUSUARDI SIENA S. 2007, *Dati archeologici sulle élites franche: qualche spunto sugli usi funerari*, in *Carlo Magno e le Alpi 2007*, 207-227.
- MANACORDA D. 2004, *Prima lezione di archeologia*, Roma-Bari, Laterza.
- MOR C.G. 1969, *Giurisdizioni minori sul lago di Garda in sponda veronese*, in A. FRUGONI, E. MARIANO (eds.), *Il lago di Garda. Storia di una comunità lacuale*, II, Salò, Ateneo di Salò, 11-18.
- PECERE B. 2006, *Viewshed e cost surface analyses per uno studio dei sistemi insediativi antichi: il caso della Daunia tra X e VI sec. a.C.*, «Archeologia e Calcolatori», 17, 173-217.
- PELOSO D. 2005, *Tecniche laser scanning per il rilievo dei beni culturali*, «Archeologia e Calcolatori», 16, 219-224.
- PERIPIMENO M. 2009a, *Rilievo di monumenti e stratigrafie: l'uso del laser scanner*, in FRONZA, NARDINI, VALENTI 2009, 111-129.
- PERIPIMENO M. 2009b, *Documentazione 3D dello scavo archeologico: prime conclusioni*, in G. VOLPE, P. FAVIA (eds.), *V Congresso Nazionale di Archeologia Medievale*, Firenze, All'Insegna del Giglio, 63-67.
- PEROGALLI C., A PRATO G.B. 1987, *Castelli trentini nelle vedute di Johanna von Isser Grosrubatscher*, Trento, Istituto Italiano dei Castelli.
- RAPANÀ M. 2009a, *Modellazione tridimensionale applicata all'analisi archeologica: il caso di studio della chiesa medievale di san Martino di Lomaso (Trento)*, Tesi di Laurea, Università di Padova, aa. 2008-2009.
- RAPANÀ M. 2009b, *3D modelling in archaeology: the case-study of St Martino's Church, Lomaso (Trento, Italy)*, «The European Archaeologist», 32, 2009/2010, 17-19.
- REMONDINO F. 2008, *Terrestrial photogrammetry*, in *Proceedings of International Summer School "3D Modeling in Archaeology and Cultural Heritage" (Ascona 2008)* (<http://www.3darchaeology.org/>).
- REMONDINO F., CAMPANA S. 2007, *Fast and detailed digital documentation of archaeological excavations and heritage artifacts*, in *Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (Berlin 2007)*, Bonn, Rudolf Habelt GmbH, 36-42.
- RIZZI A., VOLTOLINI F., REMONDINO F., GIRARDI S., GONZO L. 2007, *Optical measurement techniques for the digital preservation, documentation and analysis of cultural heritage*, in A. GRÜN, H. KAHMEN (eds.), *VIII Optical 3D Measurement Techniques Conference*, Zurich, 2, ETH, 59-69.

ABSTRACT

Modern 3D modeling techniques (e.g. laser scanning and photogrammetry) make it possible to create accurate, realistic and measurable digital 3D models of cities, buildings, terrains, artifacts and archaeological sites. The model of the Church of San Martino was created not only for the visualization but, in particular, for the study of the 3D application in archaeology and the comparison of the information provided by these techniques with data obtained by traditional techniques. The digital model of the church was created using a time of flight laser scanner. Besides this, HDR pictures were taken with a Kodak DCS ProSR/n digital camera for the texturing of the 3D model and photo-realistic visualization. The 3D building was georeferenced using GPS data for the correct insertion into the surrounding Digital Elevation Model (DEM). Some operations in the lab (range data alignment, editing, mesh generation, geometric simplification and texture mapping) transformed the 3D data points into a complete 3D model (300 working hours). Precise measurements of distances, surfaces, thicknesses and volumes of the structures or architectural elements were performed. Particular elements were also recognized and emphasized thanks to the creation of the 3D model. These elements were inserted into a database according to their characteristics and this led to the generation of several 3D thematic maps (i.e. building phase maps or litho-topes). The integration of the digital model of the church into the DEM could be used for the clarification and understanding of settlement trends and territorial organization in the past.

