

# Master Universitario di II Livello in Geotecnologie per l'Archeologia GTARC

Anno Accademico 2011/2012

**Archeologia dell'architettura e fotogrammetria:  
dall'immagine digitale alla modellazione tridimensionale.**

**Valutazione delle potenzialità applicative per la conoscenza e la comunicazione**

Elaborato finale  
Giovannini Fabio

Tutor Aziendale  
dott.ssa Ceccaroni Francesca

Tutor Universitario  
dott. Salvini Riccardo

San Giovanni Valdarno (AR)  
20 Dicembre 2012

*sintesi*

L'archeologia dell'architettura, come tutte le archeologie, utilizza quale fonte storica principale i manufatti. L'evidenza architettonica è dunque al centro degli interessi di questa disciplina. L'archeologia dell'architettura prevede l'analisi e lo studio delle costruzioni attraverso l'applicazione delle metodologie di indagine tipiche dell'archeologia stratigrafica. Alla base di tale metodologia, la realizzazione di un rilievo geometricamente corretto riveste un ruolo fondamentale.

La disciplina della fotogrammetria offre, tra le varie possibilità applicative, l'opportunità di ottenere un rilievo preciso e fedele a partire da una serie di immagini realizzate attraverso l'utilizzo di un apparecchio fotografico. Negli ultimi anni, l'avvento della fotogrammetria digitale e la progressiva implementazione delle tecnologie informatiche hanno reso possibile l'elaborazione di modelli tridimensionali utilizzando le immagini come supporto; consentendo di ottenere una rappresentazione il più aderente possibile alla realtà dal punto di vista metrico e fornendo una banca dati di informazioni riguardanti l'oggetto rilevato.

Il presente elaborato tratta la sperimentazione di uno specifico sistema fotogrammetrico, *Z-Scan EVO* prodotto dalla società Menci Software, applicando tale tecnologia ad una serie di casi studio di ambito architettonico e cercando di valutare la funzionalità, le procedure ed i risultati secondo l'ottica dell'archeologo.

*Z-Scan EVO* è un soluzione per la ricostruzione di modelli tridimensionali a partire da blocchi di immagini digitali. Si tratta di uno strumento che si presenta versatile e di agevole uso sia per le operazioni sul campo che per le fasi di processamento dei dati.

L'esperienza formativa ha previsto lo svolgimento di una serie di prove pratiche, le quali hanno avuto lo scopo di determinare l'efficacia del prodotto applicato all'ambito dell'edilizia storica. Nello specifico, in seguito ad un serie di prove operative effettuate su soggetti di carattere architettonico, il sistema di rilievo fotogrammetrico è stato sperimentato su alcune architetture del castello di Montecchio Vesponi (Castiglion Fiorentino - AR).

I risultati ottenuti, l'acquisizione morfologica tridimensionale, il dato geometrico, l'informazione fotografica, sono stati valutati nelle loro potenzialità di strumenti veicolo di conoscenza e di comunicazione.

*abstract*

*The archaeology of architecture, as all archaeologies, uses handmade objects as principal historical source. Then, the architectural record is the centre of interest of this subject. The archaeology of architecture provides analysis and study of buildings through application of standard methodologies of stratigraphical archaeology. The carrying out of a geometrically right relief holds an essential role for aforesaid methodology.*

*Among the various application scopes, the branch of photogrammetry gives the opportunity to obtain an accurate and faithful relief beginning as from images take through the utilization of camera. During the last years, the coming of digital photogrammetry and the progressive implementation of data processing technologies made possible the elaborations of three-dimensional models using the images as support; it allows to obtain a faithful representation of real from the metric point of view and it supplies an information database of the relief object.*

*This examination paper deal with the experimentation of a specific photogrammetric system, Z-Scan EVO, developed by Menci Software society, applying this technology to some architectonic case and trying to weigh the functionality, the procedures and the outcomes in accordance with the viewpoint of the archaeologist.*

*Z-Scan EVO is a solution for the reconstruction of three-dimensional model using block of digital images. It is a versatile and handy instrument both for the field operations and for the data post-processing time.*

*The instructive experience provided the development of a set of practical tests that had the purpose to value the effectiveness of the product applied to historical buildings. In this case, after some tests implemented about architectural subjects, the photogrammetric relief system was experimented over the structures of Montecchio Vesponi castle (Castiglion Fiorentino - AR).*

*The outcome con the enquiries, the morphological three-dimensional acquisition, the geometric data, the photographic information, were weighed in comparison with the potentiality of the instrument as vehicle of knowledge and communication.*

---

Ringrazio sinceramente la dott.ssa Francesca Ceccaroni ed il dott. Luca Menci per l'opportunità concessa, per avermi accolto nella loro azienda e concesso la possibilità di maturazione personale. Ringrazio la dott.ssa Debora Caldarelli per la disponibilità offerta, la collaborazione, gli insegnamenti e la guida durante questo percorso di formazione. Ringrazio gli ing.ri Daniele Bianchini, Claudio Tortorelli e Leonardo Tolomei, sempre pronti a venire incontro per suggerimenti ed aiuti. Ringrazio la dott.ssa Marta Bottacchi paziente riferimento di questo anno accademico. Ringrazio Serena per il sostegno continuo, l'aiuto ed il suo sorriso.

Archeologia dell'architettura e fotogrammetria: dall'immagine digitale alla modellazione tridimensionale.  
Valutazione delle potenzialità applicative per la conoscenza e la comunicazione

*Indice*

<i>Sintesi</i> .....	p. 1
<i>Abstract</i> .....	p. 2
<i>Indice</i> .....	p. 4
Introduzione.....	p. 6
<b>I. Il progetto di ricerca</b> .....	p. 9
I.1. Il rilievo delle architetture e la fotogrammetria.....	p. 9
I.2. Il rilievo delle architetture e Z-Scan EVO.....	p. 12
<b>II. Menci Software: la società e gli strumenti utilizzati</b> .....	p. 14
II.1. Menci Software: i sistemi fotogrammetrici.....	p. 14
II.2 Z-Scan EVO.....	p. 17
II.2.1 <i>La metodologia</i> .....	p. 17
II.2.2 <i>La strumentazione</i> .....	p. 18
II.2.3 <i>Le procedure</i> .....	p. 18
II.2.4 <i>La pratica: esercitazioni e test opera</i> .....	p. 22
<b>III. Applicazioni ad un contesto archeologico: il castello di Montecchio Vesponi</b> .....	p. 30

III.1. L'architettura del castello.....	p. 31
III.2. La scelta del sito e gli obiettivi dell'intervento.....	p. 35
III.3. L'acquisizione del dato geometrico.....	p. 36
III.4. Sperimentazione di scansione fotografica: le evidenze architettoniche.....	p. 37
<b>IV. I risultati: i modelli tridimensionali tra analisi, conoscenza e comunicazione.....</b>	<b>p. 54</b>
IV.1. Dal processamento della nuvola di punti alla storia delle evidenze materiali.....	p. 57
<i>Bibliografia</i> .....	p. 58

## introduzione

Il presente elaborato costituisce il risultato finale di un percorso di studio realizzato attraverso l'esperienza formativa svolta presso la società Menci Software<sup>1</sup>, azienda specializzata nella creazione e sviluppo di programmi informatici e strumenti dedicati alla fotogrammetria ed alla computer vision.

La formazione culturale dello scrivente è quella dell'archeologo stratigrafico, un'istruzione umanistica aperta alle conoscenze tecnologiche ed alle applicazioni informatiche, un'esperienza manuale di paziente e minuziosa attività di raccolta di informazioni materiali ed un lavoro analitico di studio e di sintesi. Il metodo dell'indagine archeologica *tende* a rispondere alle regole delle scienze esatte<sup>2</sup>; di conseguenza, le fasi di raccolta e registrazione dei dati ed ancor più i passaggi di analisi, elaborazione ed interpretazione delle informazioni possono essere agevolati ed ottimizzati attraverso l'utilizzo<sup>3</sup> di strumentazione informatica e digitale<sup>3</sup>.

Prendendo in considerazione uno specifico settore di studi, l'ambito dell'archeologia dedicato alle architetture, lo studio delle stratificazioni verticali<sup>4</sup>, ormai da numerosi anni si avvale dell'impiego di specifici sistemi informatici ed, in particolar modo, di metodologie e di tecnologie provenienti dal settore della fotogrammetria digitale.

L'applicazione dei principi fotogrammetrici alle architetture consente di ottenere una rappresentazione il più aderente possibile alla realtà del manufatto architettonico dal punto di vista metrico, fornisce una banca dati di informazioni riguardanti l'oggetto d'indagine e ne rende possibile, grazie alla stereoscopia, la ricostruzione tridimensionale. La fotogrammetria digitale, accelera e, almeno in parte, semplifica i processi di analisi e di restituzione del dato geometrico.

---

<sup>1</sup> Per approfondimenti è possibile consultare il sito [www.menci.com](http://www.menci.com).

<sup>2</sup> BARKER, 2003; HARRIS, 2002; CARANDINI, 2000; MANACORDA, FRANCOVICH, 2000; GUIDI, 1999; RENFREW, BAHN, 1995.

<sup>3</sup> GABUCCI, 2005; GIGLIOZZI, 2003; NUMERICO, VESPIGNANI A, 2003; ISABELLA, SALZOTTI, VALENTI, 2001;.

<sup>4</sup> BOATO, 2008; MANNONI, 2005; BIANCHI, 2003; MANNONI, BOATO, 2002; PARENTI, 2002; CAGNANA, 2000; FERRANDO CABONA, 1998; BIANCHI, 1997; BROGIOLO, 1997; CAGNANA, 1997; MANNONI, 1997; BIANCHI, 1996; CAGNANA, 1996; BIANCHI, 1995; CAGNANA, 1994; MANNONI, 1990; MANNONI, CRUSI, 1989; BROGIOLO, 1988; PARENTI, 1988; FRANCOVICH, PARENTI, 1988; MANNONI, 1984; PARENTI, 1985; PARENTI, 1983; PARENTI, 1981; MANNONI, 1976. Per quanto riguarda lo stato dell'archeologia dell'architettura in Italia si rinvia al seguente campione bibliografico: D'ULZIA, 2005; BROGIOLO, 2002; MANNONI, 1997a; MANNONI, 1996; MANNONI, 1995; MANNONI, 1994.

L'azienda Menci Software ha prodotto ed implementato un innovativo sistema di rilievo fotogrammetrico grazie al quale è possibile ricavare nuvole di punti a partire da serie ordinate di singoli fotogrammi digitali<sup>5</sup>. La collaborazione con la società ha permesso di prendere familiarità con le tecniche fotogrammetriche adottate e con il sistema *ZScan EVO* e successivamente di applicare lo stesso ad un contesto architettonico pluristratificato quale il sito incastellato di Montecchio Vesponi (Castiglion Fiorentino, AR).

La scelta del complesso monumentale di Montecchio come soggetto della sperimentazione è avvenuta in quanto il castello è stato oggetto di studio archeologico per oltre un quinquennio<sup>6</sup> e le architetture presenti sono state analizzate tramite diverse tecniche di rilievo sia diretto che indiretto, manuale e digitale. Tale caratteristica ha consentito così di valutare e confrontare le potenzialità del sistema fotogrammetrico *ZScan EVO* su di un contesto del quale erano conosciuti i tempi, l'accuratezza, l'affidabilità, i limiti e le difficoltà di rilievo incontrate con l'adozione di sistemi fotogrammetrici più *consueti*<sup>7</sup>.

L'attività di stage ha previsto un progressivo approccio alla materia trattata ed alla strumentazione utilizzata secondo una serie di fasi in successione, descritte schematicamente nella seguente tabella (*tab. 01*):

	<i>oggetto</i>	<i>attività</i>
1.	<i>fotogrammetria e Menci Software s.r.l.</i>	1.1 studio e ricerca bibliografica
		1.2 analisi bibliografica dell'operato dell'azienda
		1.3 esame dei prodotti di fotogrammetria di Menci Software
		1.4 studio del sistema di rilievo fotogrammetrico ZScan EVO
2.	<i>sperimentazione diretta</i>	2.1 esercitazione pratica di rilievo fotogrammetrico ZScan EVO
		2.2 elaborazione dati sperimentali
3.	<i>caso studio: Castello di Montecchio Vesponi</i>	3.1 rilievo fotogrammetrico delle architetture
		3.2 rilievo strumentale delle architetture
		3.3 elaborazione dati
4.	<i>esame ed analisi dei risultati</i>	4.1 verifica e confronto delle informazioni raccolte
		4.2 stesura dell'elaborato finale

*tab.1* - schematizzazione delle attività formative svolte

<sup>5</sup> CALDARELLI, 2011; MANZETTI, 2011.

<sup>6</sup> MOLINARI, GIOVANNINI, ORECCHIONI, C.S.(a); MOLINARI, GIOVANNINI, ORECCHIONI, C.S.(b); GIOVANNINI, 2010-2011; ORECCHIONI, 2010-2011; MOLINARI, GIOVANNINI, MINI, ORECCHIONI, 2009; MOLINARI, GIOVANNINI, MINI, ORECCHIONI, 2008; LA TROFA, 2007-2008; FEDELI, MOLINARI, GIOVANNINI, MINI, ORECCHIONI, 2007; GIOVANNINI, 2005-2006; ORECCHIONI, 2005-2006.

<sup>7</sup> Si fa riferimento a restituzioni fotogrammetriche bidimensionali tramite un'operazione di raddrizzamento dello scorcio prospettico a partire dal posizionamento relativo di una serie di punti di appoggio ovvero da misure lineari in orizzontale e verticale dei piani da restituire.



Attraverso il percorso formativo è stato possibile conseguire i seguenti obiettivi:

- approfondire la disciplina della fotogrammetria per quanto concerne le sue applicazioni nel campo dell'architettura e, più in generale dell'archeologia e dei beni culturali;
- prendere conoscenza dell'azienda Menci Software come realtà lavorativa, prodotti, settori di ricerca e di applicazione;
- studiare teoria e funzionamento del sistema fotogrammetrico *Z-Scan EVO*;
- sperimentare direttamente e valutare il potenziale applicativo del prodotto *Z-Scan EVO*;
- maturare un'esperienza nel settore del post-processing dei dati fotogrammetrici, determinarne le possibili applicazioni, il valore scientifico, documentario, conoscitivo, divulgativo;
- valutare la funzionalità della soluzione *Z-Scan EVO* adottata per l'analisi di contesti archeologici e manufatti architettonici in elevato;

Il percorso di studio e di ricerca si è sviluppato alternando pressoché costantemente un momento di teoria ad una fase pratica, quest'ultima consistita sia in interventi diretti sul campo sia in attività di laboratorio svolte tramite l'impiego di software specifici. Tale processo ha permesso di acquisire le conoscenze essenziali e porre le basi delle competenze necessarie per l'impiego, l'analisi e la valutazione dei prodotti presi in esame.

Il progetto formativo ha avuto una durata trimestrale, nel corso di questo periodo le diverse attività si sono susseguite cercando di ottimizzare la tempistica, le opportunità offerte, le ricerche da svolgere, i risultati da ottenere (*tab. 02*).

Attività	SETTEMBRE				OTTOBRE				NOVEMBRE			
	settimana				Settimana				Settimana			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1.1												
1.2												
1.3												
1.4												
2.1												
2.2												
3.1												
3.2												
3.3												
4.1												
4.2												

*tab.2* - schematizzazione cronologica delle attività relative al percorso formativo (cfr. *tab.1*)

## I. Il progetto di ricerca

L'applicazione sempre più diffusa delle metodologie di indagine proprie dell'archeologia dell'architettura ha permesso un graduale affinamento degli strumenti di analisi per conoscere le trasformazioni di un singolo manufatto edilizio, piuttosto che di un intero complesso architettonico. Lo studio delle tecniche murarie e della loro evoluzione nel corso del tempo è un ambito della ricerca molto importante per l'archeologia dell'architettura. Questo tipo di studio infatti, oltre a poter fornire indicazioni cronologiche degli edifici, offre numerose informazioni sul ciclo produttivo alla base di ogni impresa architettonica. Le ricerche condotte all'interno di questo ambito disciplinare hanno permesso, attraverso lo studio delle murature, lo sviluppo di nuove tematiche rivolte verso i contenuti sociali e tecnici di ogni attività edilizia<sup>8</sup>. Attraverso l'analisi dei materiali utilizzati, del loro grado di lavorazione e della qualità dei leganti di un paramento murario si possono ricavare, a titolo di esempio, il livello di specializzazione e di organizzazione delle maestranze che hanno eseguito materialmente il manufatto architettonico, è possibile valutare la presenza di culture edili regionali ovvero riconoscere i caratteri materiali di fasi di interruzione ovvero di continuità storica tra due differenze epoche<sup>9</sup>.

### I.1 Il rilievo delle architetture e la fotogrammetria

L'analisi di un'evidenza architettonica è fortemente agevolata, e quasi non può prescindere<sup>10</sup>, dal *rilievo* del manufatto stesso<sup>11</sup>. La realizzazione di un rilievo grafico può essere considerata una delle operazioni più idonee per lo studio e la comprensione del processo formativo e delle vicende costruttive di un manufatto edilizio<sup>12</sup>.

---

<sup>8</sup>A riguardo è possibile consultare a titolo esemplificativo MANNONI, 2005; BIANCHI, 2003; CAGNANA, 2000; BIANCHI, 1997; CAGNANA, 1997; MANNONI, 1997; BIANCHI, 1996; CAGNANA, 1996; BIANCHI, 1995; CAGNANA, 1994; MANNONI, 1994; MANNONI, 1984; MANNONI, 1976.

<sup>9</sup> CAGNANA, 1997.

<sup>10</sup> CAIROLI GIULIANI, 2008; PARENTI, 1988a, pp.249-251.

<sup>11</sup> BIANCHINI, 2008; MASCIONE, 2006; PENNACCHIONI, 2004; MEDRI, 2003; MIGLIARI, 2001; SAINT AUBIN, 1999; DI GRAZIA, 1991; DOCCI, MAESTRI, 1984; GIULIANI, 1976.

<sup>12</sup> PARENTI, 1988a, p. 249.

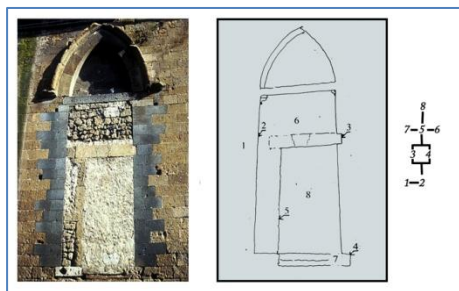


fig. 01 - esemplificazione di analisi stratigrafica di un'evidenza architettonica in elevato.

In ambito archeologico, le prime esperienze formalizzate di registrazione dell'evidenza materiale di carattere architettonico risalgono agli inizi degli anni '80 del secolo scorso<sup>13</sup> ed inizialmente si concretizzarono con la redazione di norme adeguate alle particolari esigenze della documentazione archeologica<sup>14</sup>. Più in generale, si impose il principio dell'uguaglianza informativa dell'evidenza materiale, ossia che qualunque traccia recuperata necessitava di essere

documentata poiché poteva rivelarsi utile alla comprensione del contesto indagato (fig. 01).

La prassi operativa che si andò a definire può essere sintetizzata in due distinti approcci, che tuttavia non escludono la presenza di una serie di varianti intermedie:

- la redazione autoptica del rilievo grafico, con la registrazione delle azioni costruttive nella loro complessità;
- l'utilizzo di una base grafica bidimensionale, sulla quale riportare una serie di osservazioni<sup>15</sup>.

Dalla consuetudine archeologica, progressivamente, vennero importati i criteri di registrazione della struttura materiale, cioè il deposito nei suoi differenti aspetti di stratificazione orizzontale e verticale<sup>16</sup>.

A partire da quel momento, il rilievo archeologico divenne lo strumento principale per l'analisi, la comprensione e l'interpretazione delle opere edilizie del passato.

A partire dagli anni '90 del ventesimo secolo il lavoro di registrazione ed analisi dei dati materiali è stato progressivamente agevolato dall'ingresso dell'informatica nel campo della ricerca archeologica. Nel settore dello studio delle architetture i criteri di catalogazione dei dati rimasero gli stessi: restituzione grafica e schedatura alfanumerica delle informazioni. I cambiamenti si manifestarono nell'evoluzione delle tecniche di registrazione grafica degli edifici e dal rilievo puramente lineare si passò alla restituzione fotografica ad alta risoluzione. Le modalità operative di approccio allo studio delle architetture si adattarono alla nuova strategia operativa:

- la lettura delle murature iniziò ad essere eseguita principalmente al monitor;
- esami autoptici del manufatto vennero limitati soltanto a porzioni e contesti specifici e solo come momento successivo rispetto all'individuazione della sequenza costruttiva principale;
- divenne possibile raggiungere livelli di accuratezza più elevati in fase di analisi;

<sup>13</sup> In continuità cronologica con l'affacciarsi sulla scena della ricerca archeologica, almeno per quanto riguarda il contesto italiano, del metodo di indagine stratigrafico (HARRIS, 2002; CARANDINI, 2000).

<sup>14</sup> FRANCOVICH, PARENTI, 1988.

<sup>15</sup> PARENTI, 1988a, p. 250.

<sup>16</sup> Ancora oggi le linee guida della prassi di registrazione dell'evidenza architettonica si basano sul disegno delle caratteristiche principali degli strati (superficie, contorno, rilievo, volume, posizione topografica) e compilando una scheda appositamente predisposta.

- si fu in grado di immagazzinare e reperire una quantità di dati notevolmente superiore.

Negli ultimi anni l'uso delle tecnologie informatiche nel campo dell'archeologia e dell'architettura si è arricchito delle possibilità offerte dal trattamento e dall'analisi delle immagini digitali (fig. 02). Il panorama delle metodologie di raccolta dei dati si è enormemente amplificato appoggiandosi ai principi ed alle leggi della fotogrammetria. Varie tecniche, utilizzando le immagini come supporto, consentono di ottenere una rappresentazione il più aderente possibile alla realtà dal punto di vista metrico e determinano la costituzione di una banca dati di informazioni riguardanti l'oggetto d'indagine, consentendone lo studio, l'analisi e l'elaborazione<sup>17</sup>.

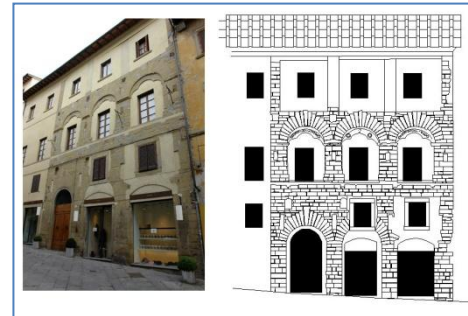


fig. 02 - esemplificazione di rilievo di un prospetto architettonico tramite l'elaborazione di immagini digitali (da MINI, 2008-2009, p. 235).

Un sistema fotogrammetrico si presenta come un avanzato ed affidabile strumento di misura che permette di rilevare con precisione varie tipologie di oggetti. Il rilievo fotogrammetrico rappresenta ormai un modello applicativo di acquisizione dei dati metrici e tematici tra i più affidabili ed immediati. È una procedura di rilevamento, prospezione e documentazione delle realtà territoriali, ambientali, urbane, architettoniche e archeologiche. Tali peculiari caratteristiche, non invasive e non distruttive, lo qualificano meglio di ogni altra metodologia di rilevamento delle più minute modifiche morfologiche degli oggetti considerati e della loro definizione spaziale.

Il processo d'innovazione tecnologica ha visto, inoltre, l'introduzione e l'utilizzo di laser scanner distanziometrici, strumentazione che consente di registrare dati geometrici e, nelle forme più evolute, raccogliere informazioni sulla riflettività dei materiali e quindi sulla variazione cromatica dei soggetti rilevati<sup>18</sup>.

Il passo successivo nel campo del rilievo delle architetture, e non solo, si è determinato con l'implementazione della fotogrammetria stereoscopica digitale, fenomeno agevolato dal contestuale decrescente costo delle risorse informatiche e dalla progressiva diffusione dell'uso dei personal computer. A partire da una coppia di fotogrammi è possibile realizzare la restituzione stereoscopica di modelli tridimensionali, senza dover far ricorso ad esperti operatori fotogrammetrici e tramite l'utilizzo di una strumentazione piuttosto semplice ed accessibile<sup>19</sup>.

Le tecniche fotogrammetriche consentono la gestione della tridimensionalità degli oggetti e la restituzione di modelli a tre dimensioni con un'efficienza metrica assai elevata. L'avvento della terza

<sup>17</sup> PARENTI, VECCHI, GILENTO, 2010; DOMINICI, GRASSI RADICIONI, 2000; BEZOARI, MONTI, SELVINI, 1992.

<sup>18</sup> PERIPIMENO, 2009; CARLINO, 2007; DE FELICE, SIBILANO, VOLPE, 2007; PERIPIMENO, SALZOTTI, 2006; PELOSO, 2005; PERIPIMENO, SALVADORI, 2005; DUBBINI, ZANUTTA, 2002.

<sup>19</sup> MENCI, CECCARONI, 2003.

dimensione ha permesso la raccolta di una maggiore quantità di informazioni, la creazione di modelli rigorosi e la possibilità di nuove forme di elaborazione dei dati<sup>20</sup>.

### 1.2 Il rilievo delle architetture e Z-Scan EVO

Attraverso le pagine del presente elaborato si vuole cercare di esporre l'esperienza di rilievo maturata tramite l'utilizzo di un innovativo sistema integrato per la fotogrammetria realizzato dall'azienda Menci Software: *Z-Scan EVO*, uno dei più recenti prodotti nel settore della modellazione tridimensionale, strumento che consente di creare nuvole di punti a densità parametrizzabile con informazioni RGB a partire da blocchi di immagini digitali<sup>21</sup>.

Come tipologia di soggetto sulla quale svolgere le attività di sperimentazione e verifica della strumentazione è stata scelta l'evidenza archeologica in elevato. Al momento della progettazione della ricerca, come elementi di riferimento, si è convenuto per la selezione di una serie di manufatti architettonici di differente dimensione e tipologia, quali interi corpi di fabbrica, singoli lacerti murari ovvero prospetti e selezionati paramenti.

La pratica operativa ha previsto una fase teorica legata allo studio della strumentazione prescelta: l'apprendimento dei principi concettuali alla base dello specifico sistema fotogrammetrico, la valutazione del suo funzionamento e delle potenzialità applicative.

Il passaggio successivo si è concretizzato in una serie di test e verifiche, attività volte all'acquisizione della padronanza dello strumento ed al conseguimento delle competenze necessarie per le fasi di processamento dei dati raccolti.



fig. 03 - Castello di Montecchio Vesponi. Fotografia aerea obliqua.

L'applicazione analitica del rilievo architettonico tramite *Z-Scan EVO* è stata effettuata su alcune evidenze edilizie del complesso monumentale di Montecchio Vesponi<sup>22</sup> (Castiglion Fiorentino, AR -

fig. 03). Si tratta di un insediamento castrale pluristratificato, oggetto di indagini archeologiche e studi sistematici a partire dalla primavera del 2005 e tuttora in corso. Il sito si caratterizza per la presenza di una serie di strutture in pietra di varia morfologia e volume, particolarmente idonee ad

<sup>20</sup> FABRIS *et al.*, 2010; <sup>20</sup> FABRIS *et al.*, 2007; MIGLIARI, 2001.

<sup>21</sup> CALDARELLI, CANTINI, CECCARONI, FATIGHENTI, 2012; CALDARELLI, 2011; MANZETTI, 2011.

<sup>22</sup> MOLINARI, GIOVANNINI, ORECCHIONI, C.S.(a); MOLINARI, GIOVANNINI, ORECCHIONI, C.S.(b); GIOVANNINI, 2010-2011; ORECCHIONI, 2010-2011; MOLINARI, GIOVANNINI, MINI, ORECCHIONI, 2009; MOLINARI, GIOVANNINI, MINI, ORECCHIONI, 2008; LA TROFA, 2007-2008; FEDELI, MOLINARI, GIOVANNINI, MINI, ORECCHIONI, 2007; GIOVANNINI, 2005-2006; ORECCHIONI, 2005-2006.

essere impiegate come soggetti per la valutazione della strumentazione *Z-Scan EVO* nel settore dell'analisi architettonica di carattere archeologico. Inoltre, le stesse strutture già in precedenza erano state oggetto di studio: nel corso delle campagne di indagine archeologica<sup>23</sup> i manufatti erano stati esaminati secondo i principi dell'archeologia dell'architettura<sup>24</sup>; per fare questo, i paramenti murari e la tessitura delle strutture erano stati rilevati sia tramite rilievo diretto manuale sia attraverso l'impiego di tecniche di raddrizzamento fotogrammetrico<sup>25</sup>. Quest'ultimo parametro è stato considerato particolarmente utile come elemento di confronto e di valutazione rispetto alle potenzialità che sarebbero state espresse dal sistema *Z-Scan EVO*.

L'intento e la finalità del progetto è stata quella di promuovere una serie di sperimentazioni della soluzione *Z-Scan EVO* legate allo studio delle architetture, di valutare le possibilità di applicazione rispetto ai soggetti selezionati, di determinare i tempi di realizzazione, di stimare la qualità dei dati ottenuti e le applicazioni/elaborazioni possibili; il tutto anche alla luce delle esperienze pregresse.

---

<sup>23</sup> MOLINARI, GIOVANNINI, ORECCHIONI, C.S.(A); MOLINARI, GIOVANNINI, ORECCHIONI, C.S.(B); GIOVANNINI, MOLINARI, GIOVANNINI, MINI, ORECCHIONI, 2009; MOLINARI, GIOVANNINI, MINI, ORECCHIONI, 2008; FEDELI, MOLINARI, GIOVANNINI, MINI, ORECCHIONI, 2007.

<sup>24</sup> GIOVANNINI, 2010-2011, pp. 120-194; GIOVANNINI, 2005-2006.

<sup>25</sup> Trattamento di immagini digitali generate da apparecchi fotografici e restituzione fotogrammetrica di una proiezione ortogonale di tipo bidimensionale (fotogrammetria monoscopica) tramite trasformazione geometrica proiettiva o differenziale (BIANCHINI, 2008; ROMEO, 2002; PICCARRETA, 1992).

## II. Menci Software: la società e gli strumenti utilizzati

Menci Software è un'azienda specializzata nella ricerca e nello sviluppo di sistemi di misura delle immagini. Fondata nel 1991, a sede ad Arezzo ed è una società ai vertici nell'ambito della produzione di softwares per la fotogrammetria e la computer vision, per la realizzazione di strumenti funzionali alla costruzione di modelli tridimensionali a partire da immagini digitali, per il disegno e la mappatura cartografica<sup>26</sup>. Il personale aziendale è costituito da esperti informatici specializzati nel remote sensing, nella fotogrammetria digitale, nelle analisi spaziali e nella produzione di cartografia e sistemi automatizzati.



### II.1 Menci Software: i sistemi fotogrammetrici

L'ambito di ricerca della Menci Software legato alla fotogrammetria digitale si caratterizza per la realizzazione di due soluzioni informatiche *Z-Scan* e *Z-Map*, potenti e versatili applicazioni che sono state oggetto di studio e di utilizzo anche nella presente ricerca.

*Z-Scan* è un innovativo sistema fotogrammetrico in grado di generare nuvole di punti ad alta definizione a partire da immagini digitali (fig. 5). Lo strumento consente la realizzazione di modelli tridimensionali con risultati analoghi a quelli di una scansione laser, ma attraverso il solo processamento di immagini; quest'ultime, grazie ad uno specifico algoritmo di rettifica multifocale, vengono ricampionate secondo piani variabili in funzione della morfologia dell'oggetto da ricostruire<sup>27</sup>. Come risultato, è possibile ottenere una griglia di punti 3D ad alta precisione con la texture dell'immagine applicata.

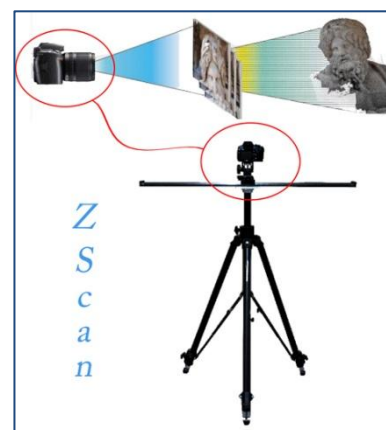


fig. 5 - Menci Software - *Z-Scan*.

<sup>26</sup> Per approfondimenti si rinvia a [www.menci.com](http://www.menci.com).

<sup>27</sup> Per approfondimenti sul funzionamento e le tecniche applicative è possibile consultare: PESCI *et al.* 2009; MENCI, CECCARONI, 2008; MENCI *et al.* 2007; Per la consultazione e la valutazione di casi applicativi si rinvia a CAMIN *et al.*, 2010; CAMIN, 2009.

A livello strumentale il sistema è costituito da una camera digitale reflex ad alta risoluzione, dotata di un'ottica fissa e specificatamente calibrata. La fotocamera è alloggiata su una barra dotata di una slitta di precisione calibrata che consente lo scorrimento della macchina grazie ad un carrello a ricircolo di sfere con testa tilt. La barra è innestata al di sopra di un treppiede professionale. La precisione metrica di questi strumenti permette di conoscere con esattezza la misure della base di presa. L'equipaggiamento si completa con il software *Z-Scan*, il quale, attraverso l'elaborazione dei fotogrammi catturati, genera i modelli tridimensionali caratterizzati da accuratezza geometrica e corrispondenza cromatica.

La pratica operativa prevede, una volta impostata e settata la strumentazione, la realizzazione di una sequenza di tre scatti (tripletta) dell'oggetto da rilevare, fotogrammi con congrui margini di sovrapposizione<sup>28</sup>; le cosiddette strisciate fotografiche devono essere ripetute da diverse posizioni in modo da ricoprire completamente il soggetto in base alla specifica geometria.

Una volta raccolti, i dati raster vengono processati attraverso la strumentazione software secondo una procedura pressoché automatizzata: al termine viene restituita una superficie tridimensionale.

*La preparazione inizia con la contro-distorsione delle immagini per l'eliminazione delle aberrazioni ottiche. Le immagini vengono analizzate mediante un operatore d'interesse per la ricerca di features. È necessario che esse siano distribuite su tutto il fotogramma e che quest'ultimo sia omogeneamente texturizzato. Un algoritmo di ricerca delle features omologhe e del loro filtraggio mediante geometria epipolare, conduce alla ricostruzione degli orientamenti dei tre fotogrammi. I valori angolari ottenuti per l'assetto di presa sono prossimi a zero e la loro entità dipende dalle tolleranze costruttive della slitta, dal posizionamento della camera sul carrello, dall'oscillazione della barra ed eventualmente del supporto che la sostiene. La correttezza dell'orientamento è il presupposto indispensabile per la buona riuscita del processo di ricostruzione. Si procede poi alla fase di rettifica trinoculare al fine di annullare simultaneamente la parallasse verticale sui tre fotogrammi. Una volta definita l'area delle immagini da utilizzare, la ricostruzione della superficie avviene per image matching mediante metodi di programmazione dinamica. Il calcolo della crosscorrelazione è simultaneo sulle tre immagini e sfrutta le componenti cromatiche RGB (CALDARELLI, 2011, p. 10)<sup>29</sup>.*

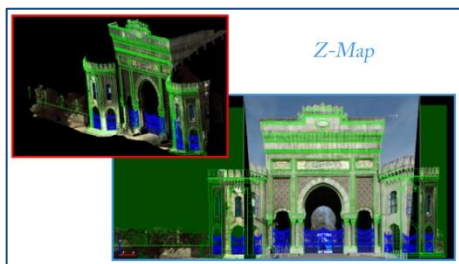


fig. 06 - *Z-Map*, esemplificazione di disegno vettoriale su immagini raddrizzate.

La piattaforma software *Z-Map* consente di usare immagini aeree, terrestri e satellitari oltre ai sensori digitali aerei, all'interno dei tradizionali processi fotogrammetrici (fig. 06). Si tratta di una stazione fotogrammetrica multisensore che permette la definizione automatizzata dell'orientamento interno ed esterno, consente la generazione di DEM e DTM, così come la visualizzazione e collimazione monoscopica che

<sup>28</sup> Indicativamente come indice di sovrapposizione sono stimati circa un 80% per il ricoprimento laterale ed un 50% per quello verticale, secondo anche quanto espresso dalla consuetudine fotogrammetrica.

<sup>29</sup> PESCI *et al.* 2009; MENCI, CECCARONI, 2008; MENCI *et al.*, 2007.



stereoscopica. L'impiego dello strumento supporta la realizzazione di ortofoto ed ortofotomosaici e la generazione di curve di livello, prospetti e piante<sup>30</sup>.

Il programma opera sia in modalità monoscopica che stereoscopica ed è un grado di gestire sia dati in formato raster che vettoriale; la piattaforma è basata su un database proprietario di tipo CAD, di semplice impostazione, immediato utilizzo ed ampie potenzialità di editing delle informazioni caricate. Nello specifico, il sistema è stato sviluppato secondo due soluzioni funzionali alle esigenze dell'utente finale: *Z-Map Photo* orientato verso elaborazioni adatte alla fotogrammetria aerea, terrestre e satellitare e *Z-Map Laser*, piattaforma di lavoro idonea alla gestione di nuvole di punti 3D, ortofoto, editing e disegno vettoriale tridimensionale.

*All'interno del processo fotogrammetrico la prima operazione che si esegue è l'Orientamento Interno, ossia la descrizione della geometria del fotogramma e il passaggio dalle coordinate pixel dell'immagine a quelle fiduciali, grazie alla gestione del certificato di calibrazione della camera e la collimazione delle marche fiduciali. Si passa poi all'Orientamento Esterno per descrivere la posizione spaziale del centro di presa del fotogramma grazie all'inserimento dei GCP. Si può scegliere tra l'Orientamento Relativo – Assoluto e la Triangolazione Aerea nel caso di più coppie di fotogrammi. L'orientamento dei fotogrammi utilizza la compensazione a stelle proiettive (Bundle Block Adjustment) mediante una gestione intuitiva dei posizionamenti approssimati e delle collimazioni, manuali ed automatiche. Segue la fase di restituzione che può avvenire in modalità monoscopica e stereoscopica. Successivamente si può procedere alla generazione del DEM da entità, modelli 3D o immagini, in maniera totalmente automatica, settando solo alcuni parametri. Anche la generazione di Ortofoto richiede operazioni semplicissime. Queste possono poi essere composte in un ortofotomosaico. Uno degli aspetti principali nella realizzazione di mosaici di ortofoto è costituito dall'assemblaggio delle diverse immagini e dalla scelta ottimale delle linee di ritaglio per la giunzione dei fotogrammi ortorettificati. Per questo secondo aspetto ZMap offre due algoritmi per il calcolo automatico delle Linee di Taglio: l'uno, LPV (Luogo dei Punti Vicini), si basa sui "diagrammi di Voronoi" ed è più indicato per ortofotomosaici di ortofoto*

tab.3 - elenco descrittivo dei principali prodotti sviluppati dalla società Menci Software

<p><i>Z-Map Photo</i> è una stazione fotogrammetrica multisensore per la produzione e l'elaborazione di dati cartografici e architettonici. Il software integra informazioni raster e vettoriali anche di grandi dimensioni e consente una gestione rapida di:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• DTM densi acquisiti con le più diverse tecnologie</li> <li>• foto aeree di grandi dimensioni</li> <li>• foto da satellite</li> <li>• ortofoto rettificata e ortomosaici</li> <li>• modelli stereoscopici</li> <li>• cartografia vettoriale con i relativi tematismi</li> </ul> <p>L'architettura del sistema, basata su un database proprietario di tipo CAD, si dimostra molto versatile grazie alle sue numerose funzioni di editing.</p>
<p><i>Z-Map Laser</i> è un software per la restituzione CAD e la produzione di ortofoto su nuvole di punti. Il software offre numerose funzioni avanzate per l'editing di superfici, la generazione di ortomosaici, la gestione e l'unione di modelli 3D, l'orientamento e il disegno su immagini. Le nuvole di punti sono integrate nel CAD e processate come normali entità.</p>
<p><i>Z-Map Plotter</i> è una soluzione stand-alone per la vettorializzazione da modelli 3d stereoscopici. Sono incluse tutte le funzionalità stereoscopiche di disegno ed editing presenti in Z-Map. Si possono eseguire orientamenti interni di fotogrammi ed importare orientamenti esterni provenienti da altre stazioni fotogrammetriche.</p>
<p><i>ZScan Ter</i> è una estensione di ZScan progettata per l'acquisizione sincronizzata di immagini sullo stesso oggetto. Lo scatto sincrono di tre camere viene gestito dall'utente tramite un telecomando. Ogni tripla acquisita da ZScan Ter viene trasformata in un modello 3D dal software ZScan.</p>
<p><i>ZScan Micro</i> è basato sulla tecnologia ZScan ed è composto sia da elementi hardware che software, i quali consentono di generare nuvole di punti 3D ad alta definizione su piccoli oggetti. È progettato per misure metriche di precisione e analisi nel tempo di micro fratture o danni su beni culturali. Un altro uso, in virtù delle informazioni cromatiche fornite dalle immagini, è la documentazione 3D ad alta fedeltà, molto importante nel campo dei beni culturali. Il risultato finale di ZScan Micro è una griglia 3D di punti con un'immagine texture applicata sopra: in pratica un raster 3D.</p>
<p><i>Z-Glif</i> è una soluzione per la navigazione di modelli stereoscopici in analogico. Nata per scopi didattici, ZGlif è comunque in grado di generare orientamenti interni ed esterni e fornire strumenti di disegno e misura 3D.</p>
<p><i>StereoPro</i> è un sistema di stereovisione che supporta normali monitor LCD e che non richiede una scheda video stereo-ready. È uno strumento "passivo" basato su lenti e specchi che consente una visione stereo diretta.</p>
<p><i>SubMicro</i> consente di creare modelli tridimensionali di oggetti con dimensione inferiore al millimetro di lunghezza. Lo strumento opera senza toccare direttamente l'oggetto modellato e senza uso di punti di controllo. Agisce da interfaccia per la sincronizzazione e il controllo del microscopio e della camera digitale. Dopo che i dati sono stati acquisiti da SubMicro, il flusso di lavoro procede tramite i software ZScan e Z-Map, attraverso le fasi di generazione dei modelli e di analisi.</p>
<p><i>SubaScan</i>, basato sulla tecnologia ZScan, rappresenta la soluzione per il rilievo 3D in ambiente subacqueo. Composto da tre camere con scafandri, posizionate su una struttura in alluminio, SubaScan consente di eseguire scatti sincronizzati e di ottenere i relativi modelli 3d tramite il software ZScan.</p>
<p><i>FlyScan</i> è un sistema aereo di scansione 3D. Sospeso in aria grazie ad un pallone aerostatico consente di generare modelli tridimensionali di aree archeologiche. I dati raccolti sono utilizzati per studiare la distribuzione di spazi interni ed edifici, per ottenere planimetrie complete di zone di scavo, per analizzare aree di intervento e restauro. FlyScan è in grado di produrre DTM per un'analisi dettagliata dell'area ricostruita. È inoltre possibile navigare tridimensionalmente sui modelli acquisiti.</p>
<p><i>Car Body Scanner</i> è una soluzione ottimizzata per la ricostruzione tridimensionale di porzioni di carrozzeria integre o danneggiate. È basato su algoritmi software proprietari, in grado di assicurare elevate prestazioni in accuratezza e velocità. Tutto il processo necessario ad ottenere il risultato finale è completamente automatico.</p>

<sup>30</sup> Le caratteristiche principali dello strumento e le sue potenzialità applicative sono descritte in CASELLA *et al.*, 2006; CECCARONI, 2005; MENCI, 2004; EMMOLO, 2003-2004.

terrestri; l'altro, PPD (Percorsi mediante Programmazione Dinamica), è in genere usato per le ortofoto aeree e si basa sull'interazione tra metodi di *image-matching* e tecniche di *programmazione dinamica* (CALDARELLI, 2011, pp. 9-10)<sup>31</sup>.

## II.2 Z-Scan EVO

Il sistema fotogrammetrico *Z-Scan EVO* costituisce una soluzione innovativa nel settore della modellazione digitale tridimensionale. Fulcro del processo di elaborazione è la possibilità di creare nuvole di punti, e quindi un modello tridimensionale, a partire da *blocchi* di immagini digitali attraverso processi completamente automatici (fig. 07).

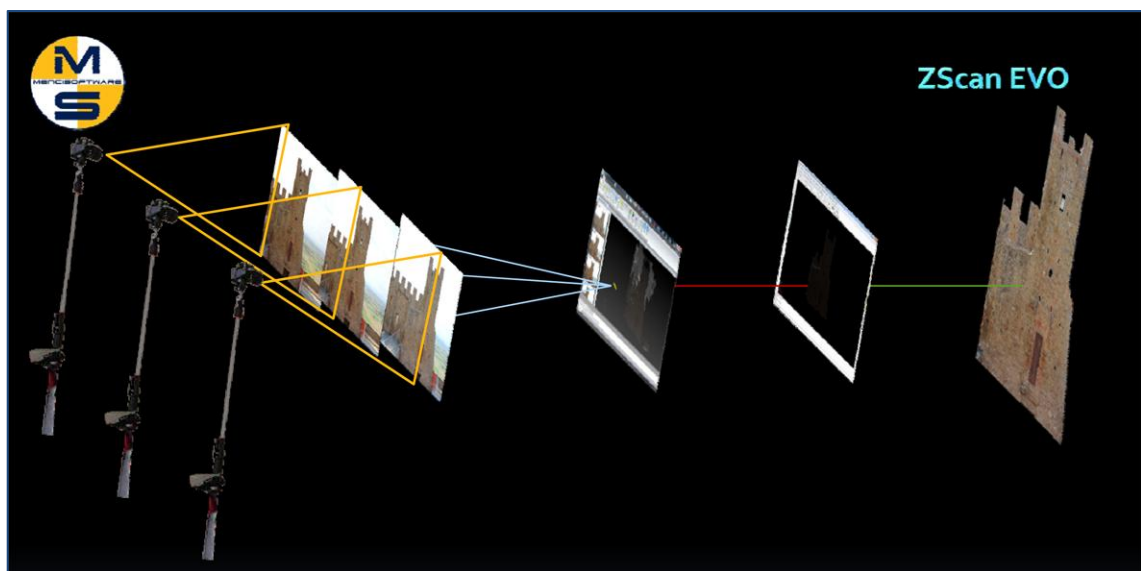


fig. 07 - schema esemplificativo del sistema fotogrammetrico *Z-Scan EVO*

### II.2.1 La metodologia

La piattaforma *Z-Scan EVO* si presenta come evoluzione del sistema fotogrammetrico *Z-Scan*. La generazione di nuvole di punti tridimensionali ad alta precisione metrica predispone l'impiego dello strumento per numerosi settori applicativi, tra i quali, in particolare, l'archeologia, l'architettura e, più in generale, gli ambiti di tutela e valorizzazione dei beni culturali.

Dai modelli tridimensionali ottenuti è possibile ricavare dati quali DEM, ortofoto, ortofotomosaici, profili e curve di livello; da questi elementi, a loro volta, è possibile ottenere rilievi bidimensionali e modelli vettoriali tridimensionali. Prodotti di ampia utilità nei campi della ricerca scientifica, della tutela e valorizzazione e della divulgazione e promozione culturale.

<sup>31</sup> CASELLA *et al.*, 2006; MENCI, 2004.

Il percorso di ricerca ha previsto una fase di analisi del sistema *Z-Scan EVO*, effettuata attraverso uno studio delle conoscenze e dei processi alla base della strumentazione. Passaggio successivo sono state una serie di prove di funzionamento pratico, ossia esercitazioni legate all'impiego dell'apparecchiatura, alla valutazione delle potenzialità applicative al variare delle tipologie volumetriche del soggetto. In seconda istanza, i dati ottenuti sono stati presi come campione per le sperimentazioni di post-processamento e le attività di elaborazione. Sulla base delle esperienze maturate, *Z-Scan EVO* è stato applicato per il rilievo di predeterminati manufatti architettonici, specifici soggetti con variabili caratteristiche volumetriche e posizionamento spaziale, in modo da poter valutare le effettive potenzialità applicative dello strumento nel campo dello studio ed analisi delle architetture.

### II.2.2 La strumentazione

L'equipaggiamento materiale di *Z-Scan EVO* si compone di una fotocamera digitale calibrata, un tablet, un porta-tablet, un cavo usb con prolunga, un'asta topografica con testa tilt regolabile (fig. 08). La fotocamera si innesta sulla testa dell'asta topografica alla quale è possibile appendere il tablet, tramite l'apposita base di sostegno; il cavo usb consente la connessione tra il tablet e la fotocamera, anche nella condizione di massima estensione dell'asta topografica<sup>32</sup>. Tale assetto consente l'utilizzo dell'intero sistema di rilievo da parte di un singolo operatore con relativa semplicità.

La sezione softwares è costituita da un pacchetto di programmi quali *EVO Capture*, *EVO Check*, *U-Map*. A questi va aggiunto la stazione fotogrammetrica *Z-Map* nella versione *Z-Map Laser*, essenziale per le attività di processamento dei dati raccolti.

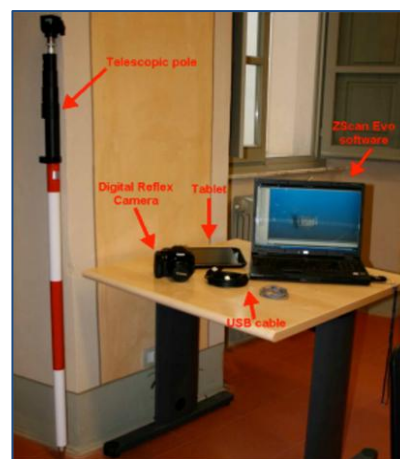


fig. 08 - la strumentazione del sistema fotogrammetrico *Z-Scan EVO* (da CALDARELLI, 2011, p. 21; MANZETTI, 2011, p. 19)

### II.2.3 Le procedure

Una volta assemblato lo strumento ed avviato il software *EVO Capture* installato nel tablet è possibile iniziare il processo di rilievo fotografico del soggetto d'interesse, ma devono essere tenuti presenti una serie di accorgimenti ed indicazioni.

<sup>32</sup> L'altezza raggiungibile dallo strumento fotografico varia in base al modello di asta topografica utilizzata. Nel caso dell'esperienza descritta del presente elaborato è stata utilizzata un'asta con un'estensione massima di 4 m.

Z-Scan EVO è adatto all'utilizzo sia su soggetti in elevato che a terra: è valido anche in contesti dove sussiste una continuità tra il piano orizzontale e la superficie verticale ed è applicabile altresì a contesti chiusi e con geometria complessa quali soffitti e volte. Difficoltà si possono riscontrare con spazi caratterizzati da una geometria particolarmente articolata, rispetto alla quale non è possibile seguirne l'andamento, piuttosto che con soggetti caratterizzati da una elevata omogeneità cromatica<sup>33</sup>. L'operatore deve valutare con particolare attenzione la *distanza di presa* da cui catturare le immagini. Non esiste un valore di riferimento, lo spazio tra il soggetto da rilevare e la fotocamera varia in base all'ottica adottata, alle dimensioni ed alla tipologia del soggetto e rispetto al livello di dettaglio che si vuole raggiungere.

*Dati i limiti imposti dalla distanza minima di messa a fuoco e dalla distanza minima consentita, la distanza di presa è dunque stabilita in base a:*

- *area della superficie da acquisire (una volta definito l'oggetto di interesse cioè, occorre far sì che esso costituisca l'elemento principale nell'immagine, anche se questo implica una leggera inclinazione della camera)*
- *piattezza della superficie (che implica la necessità di una maggiore o minore profondità di campo)*
- *risoluzione sul modello necessaria*
- *sovrapposizione ottenibile con la lunghezza focale a disposizione*

(CALDARELLI, 2011, p. 48)

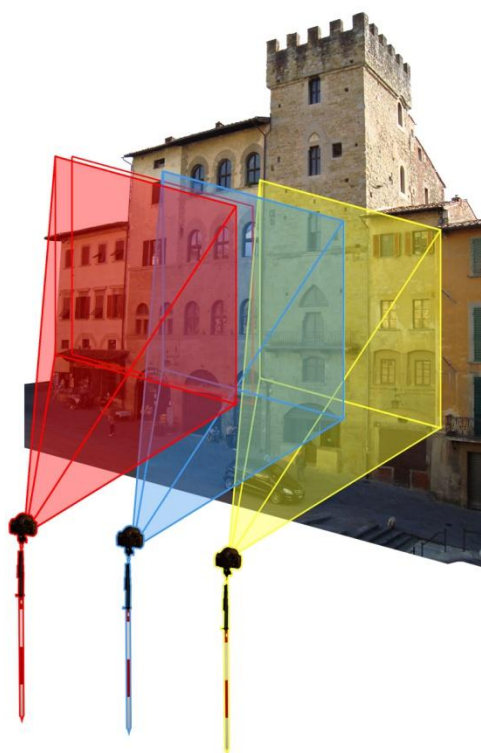


fig. 09 - rappresentazione schematica della procedura di acquisizione fotografica tramite Z-Scan EVO.

L'acquisizione dei fotogrammi avviene attraverso uno spostamento progressivo dell'operatore in modo tale da variare il punto di vista dell'immagine catturata e con la cura di rispettare i parametri di sovrapposizione dei fotogrammi (fig. 09). Sebbene sia auspicabile mantenere la stessa distanza di presa, anche se con un certo margine di approssimazione, è possibile variare l'intervallo con il soggetto; soprattutto se quest'ultimo presenta variazioni geometriche quali, ad esempio, porzioni aggettanti piuttosto che ostacoli che impediscono il movimento. Il cambiamento deve tuttavia essere progressivo, evitando variazioni nette della distanza. Fondamentale permane la corretta porzione di sovrapposizione tra uno scatto e l'altro<sup>34</sup>.

La variabile della distanza va tenuta in considerazione

<sup>33</sup> CALDARELLI, 2012; CALDARELLI, 2011; MANZETTI, 2011.

<sup>34</sup> Nel caso di rilievi ad un'altezza prossima a quella dell'operatore, orientativamente circa 1.5 m, il supporto dell'asta topografica e del tablet può essere trascurato ed il rilievo fotografico può essere effettuato tramite l'utilizzo diretto della fotocamera. Tale procedura richiede una maggiore esperienza dell'operatore, soprattutto per quanto riguarda la valutazione della porzione di sovrapposizione tra due fotogrammi consecutivi.

anche per quanto riguarda il valore di *risoluzione dei pixels* che si vuole ottenere. Determinate esigenze di ricostruzione tridimensionale possono richiedere una specifica pixel size. Una risoluzione molto alta, determinabile anche attraverso un'acquisizione più ravvicinata, comporterà la creazione di una nuvola di punti molto densa; in questo caso, ad esempio, si dovrà tenere presente che si determineranno processi di elaborazione con tempi più lunghi e una maggiore occupazione dello spazio di memoria.

L'operatore nel corso del rilevamento pianifica un percorso di ripresa, impostato sulla base della geometria del soggetto e della distanza di presa dallo stesso; la *modalità di scatto* prevede l'esecuzione di una singola acquisizione ad ogni stazione di ripresa, cercando di intervallare un punto di cattura del fotogramma dal successivo da una distanza omogenea. Si cercano di privilegiare scatti frontali, tentando di avvicinarsi ad una posizione zenitale rispetto alla superficie di interesse. I fotogrammi acquisiti in maniera consecutiva devono tendere ad una sovrapposizione, ossia ad un'area di ripresa comune a due fotogrammi successivi, di almeno l'80% in progressione di rilievo orizzontale e del 50% con andamento in verticale. L'esperienza attuale e le attività sperimentali pregresse indicano come garanzia di un risultato idoneo l'opportunità di rendere visibile uno stesso punto almeno su tre immagini. Una procedura di acquisizione ottimale prevede l'avvio delle operazioni a partire da un estremo del soggetto da riprendere, con una buona percentuale del campo dell'immagine occupata dal contesto esterno al soggetto: in questo modo anche le porzioni estreme e limitari dell'oggetto di interesse saranno presenti su distinti fotogrammi ed osservati da differenti punti di vista. Altro fattore da tenere in considerazione è la convenienza per tutti gli altri fotogrammi di far occupare dal soggetto almeno 2/3 della finestra di visualizzazione.

Nel corso del rilievo fotografico si devono valutare le condizioni della *luce* e l'impatto che l'illuminazione ambientale ha sui fotogrammi. Repentini cambiamenti della luce, specialmente, tra scatti successivi, possono compromettere sia l'efficienza dell'intervento di rilievo<sup>35</sup> che le possibilità di realizzazione del modello tridimensionale nel corso del processamento dei dati raccolti. In generale, è preferibile operare in condizioni di luce diffusa ed emanata in maniera indiretta.

La fotocamera va settata in modo da ottimizzare la messa a fuoco di tutti gli elementi del soggetto da rilevare, per fare questo viene suggerito come impostazione idonea al rilievo fotografico un settaggio della macchina con una *messa a fuoco* in modalità con priorità di diaframmi ed un numero *f* alto<sup>36</sup>.

Per quanto riguarda l'impianto software il primo programma che si incontra nel corso della procedura di acquisizione fotografica è *EVO Capture*, strumento implementato all'interno del tablet. Una volta associato allo strumento fotografico<sup>37</sup>, permette di visualizzare sullo schermo il live view

---

<sup>35</sup> Si fa riferimento all'efficacia della funzione *link image* del software *EVO Capture*. Per un approfondimento si rinvia alla specifica sezione all'interno del presente paragrafo.

<sup>36</sup> Con valori pari o superiori a 10 il diaframma tenderà alla chiusura e si avrà, di conseguenza, una profondità di campo sempre più estesa ed una maggiore zona di nitidezza.

<sup>37</sup> L'operazione avviene in modo automatico una volta connesso il tablet all'apparecchio fotografico.

della macchina, di avviare lo scatto per la cattura dell'immagine e di memorizzare una serie di fotografie a blocco; inoltre, particolarmente interessante si rivela la funzione di verifica dei requisiti minimi di sovrapposizione delle immagini acquisite in successione (fig. 10).

L'avvio dello scatto della fotocamera avviene attraverso un semplice tocco del touch screen del tablet, ovvero un click del live view; modalità che semplifica notevolmente le operazioni di inquadratura e cattura dell'immagine per l'attività di un singolo operatore. Il controllo della corretta percentuale di sovrapposizione dei fotogrammi viene avviato attraverso l'attivazione della funzione 'Link to Last Image', la quale avvisa, negando la memorizzazione dell'immagine, nel caso di una non congrua correlazione tra le immagini in successione.

Una volta realizzato il blocco di immagini è possibile valutare il potenziale informativo dell'operazione di rilievo appena svolta attraverso l'utilizzo del software *EVO Check*. Strumento da impiegare idealmente su strumentazione da campo, quale,

ad esempio, un notebook, in quanto consente una verifica preliminare attraverso la creazione di una nuvola di punti tridimensionale in tempi limitati a partire dai dati immagine immessi. Attraverso un processo del tutto automatico il programma elabora i dati raster a partire dal passaggio preliminare del 'finding features', per poi passare al 'matching image' ed infine una compensazione a stelle proiettive, indicata come 'bundle adjustment'. Il risultato ottenuto è la visualizzazione di una 'points cloud' con indicazione spaziale di tutti i centri di presa. Il modello è completamente visualizzabile attraverso i tasti funzione di zoom e di rotazione tridimensionale. È possibile così valutare gli



fig. 11 - Menci Software *EVO Check*.

effettivi legami dei fotogrammi raccolti<sup>38</sup> ed intervenire con eventuali integrazioni in caso di riconoscimento di lacune prima di lasciare l'area operativa (fig. 11).

Il processo di generazione del modello tridimensionale si completa attraverso l'impiego del programma *U-Map*. Evoluzione di *EVO Check*, il software propone un work flow simile, sebbene i vincoli di elaborazione dei dati siano

notevolmente più stringenti e selettivi. Anche in questo caso, le immagini vengono caricate

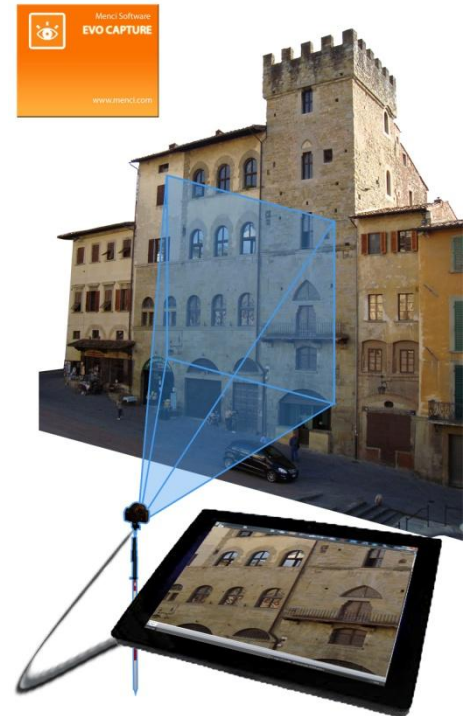


fig. 10 - Menci Software *EVO Capture*

<sup>38</sup> Vengono indicate le 'bundled images', ossia le immagini effettivamente utilizzate per la costruzione della nuvola di punti, e quindi correttamente processate, e le 'free images', ossia i fotogrammi che non si sono rivelati utili ai fini del processo di creazione del modello 3D.

all'interno dello strumento virtuale per subire i processi di 'finding features' e di 'matching image' per poi giungere al 'bundle adjustment', prima ricostruzione sommaria che lega le immagini tra di loro; funzione aggiuntiva ed essenziale è la 'reconstruction', grazie alla quale è possibile generare il modello tridimensionale: in fase di impostazione è possibile regolare il passo di ricostruzione della nuvola di punti. Funzione opzionale concessa dal programma è l'inserimento, la selezione e la collimazione di punti di controllo (GCP), possibilità che consente la georeferenziazione e la messa in scala del modello. L'alto livello analitico del processamento restituisce quindi una nuvola di punti RGB a densità parametrizzabile (fig. 12).

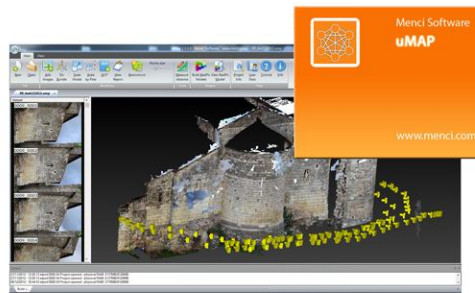


fig. 12 - Menci Software U-Map.

È a partire da quest'ultimi modelli che possono essere implementate successive elaborazioni quali operazioni di pulizia della nuvola, creazione di DEM, ortofoto ed ortofotomosaico, attraverso l'esportazione delle nuvole nella già citata stazione fotogrammetrica *Z-Map*.

#### II.2.4 La pratica: esercitazioni e test operativi

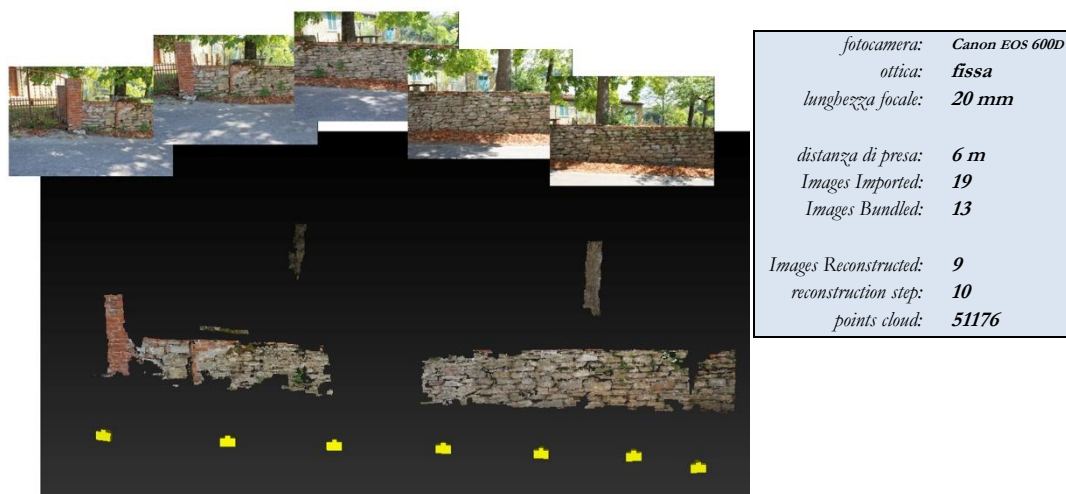
Le esercitazioni sull'utilizzo della strumentazione *Z-Scan EVO* sono state applicate ad una serie di manufatti architettonici, elementi che presentavano un'ampia varietà morfologica e geometrica. Le prove operative hanno avuto lo scopo di far acquisire dimestichezza con l'apparecchiatura, sperimentare e prendere confidenza con le specifiche metodologie di acquisizione dei rilievi fotografici e creare un'iniziale base di dati sufficiente a testare la fase di processamento delle informazioni raccolte.

##### ➤ *paramento murario* - Villa Guillichini, Tregozzano (AR)

La sessione di rilievo è stata svolta di fronte ad un accesso secondario della porzione meridionale dell'immobile ed ha interessato un tratto di una struttura muraria limitrofa alla strada vicinale. La struttura, di fattura moderna in mattoni e cemento, è stata esaminata per un tratto di circa 6 m, parte nella quale presenta un'altezza approssimativa di circa 1.5 m e con un andamento che da sud-ovest svolta verso nord-est, in sintonia con lo sviluppo della viabilità.

L'elaborazione dei dati di questo primo intervento ha messo in evidenza una serie di errori procedurali determinati dall'inesperienza dell'operatore: la fase di acquisizione dei fotogrammi è stata effettuata da una distanza di presa eccessiva rispetto alle

dimensioni del soggetto. Le immagini prodotte erano occupate solo in parte dalla struttura e il contesto circostante andava a costituire una sorta di rumore di fondo dei fotogrammi che determinava difficoltà per un'adeguata ricostruzione del modello tridimensionale (*fig. 13*).

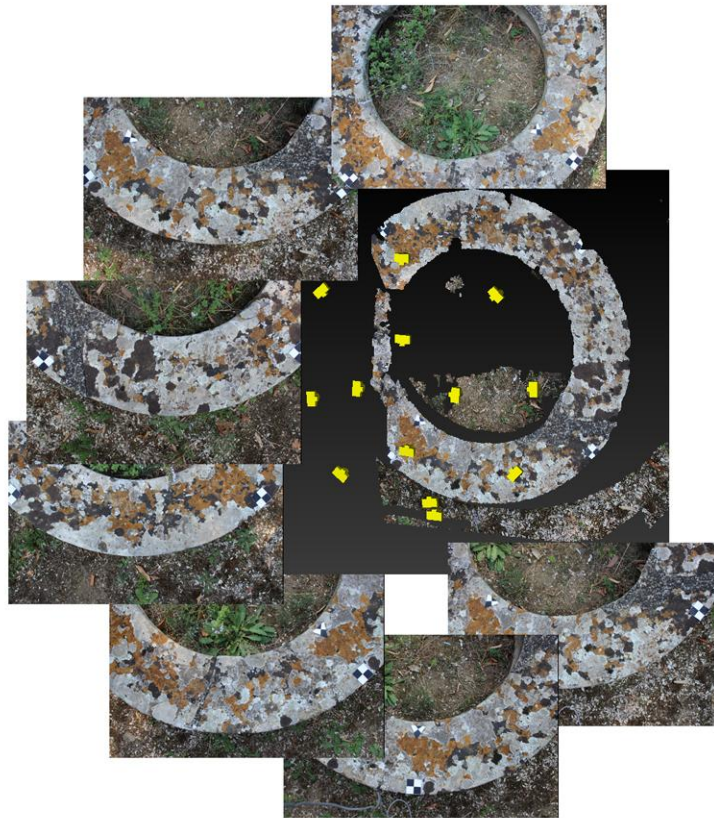


*fig. 13 - test operativo: paramento murario - Villa Guillichini. Rilievo fotografico e processamento immagini tramite U-Map.*

➤ *elemento litico* - Villa Guillichini, Tregozzano (AR)

All'interno del giardino del complesso abitativo è collocata una pietra in arenaria, lavorata in forma circolare con foro centrale, disposta con funzione decorativa al centro degli incroci dei vialetti delle aiuole. Si presentava come valido elemento architettonico tridimensionale per saggiare le possibilità di elaborazione di un modello digitale. La pietra, con un diametro di circa un 1.20 m ed uno spessore approssimativo di 0.30 m è posizionata direttamente al suolo. In conseguenza dell'ubicazione dell'elemento è stato deciso di effettuare il rilievo fotografico utilizzando direttamente lo strumento fotografico, facendo a meno del supporto di asta, tablet e software *EVO Capture*. La restituzione tridimensionale del manufatto effettuata in seguito presentava lacune determinate dalla non completa copertura fotografica del soggetto (*fig. 14*), fattore causato, anche in questo caso, dalla limitata esperienza dell'operatore: nel contesto in esame, il processo di elaborazione dei dati acquisiti è stato compromesso dalla scarsa attenzione rivolta ai repentini cambiamenti dell'intensità della luce; evento originato da una condizione meteorologica variabile durante la fase di ripresa. Esposizioni diverse delle immagini, anche per un soggetto di limitate dimensioni e ad una distanza di presa piuttosto ravvicinata, hanno determinato notevoli difficoltà nella fase di riconoscimento dei punti omologhi tra i diversi fotogrammi.





<i>fotocamera:</i>	<b>Canon EOS 600D</b>
<i>ottica:</i>	<b>fissa</b>
<i>lunghezza focale:</i>	<b>20 mm</b>
<i>distanza di presa:</i>	<b>1.5 m</b>
<i>Images Imported:</i>	<b>13</b>
<i>Images Bundled:</i>	<b>13</b>
<i>Images Reconstructed:</i>	<b>8</b>
<i>reconstruction step:</i>	<b>10</b>
<i>points cloud:</i>	<b>258770</b>

*fig. 14 - test operativo: elemento litico - Villa Guillichini. Rilievo fotografico e processamento immagini tramite U-Map.*

➤ *struttura muraria - parco della Fortezza Medicea, Arezzo*

Nei pressi del tratto occidentale del circuito difensivo della fortezza medicea della città di Arezzo, in una porzione di superficie destinata a giardino, sono presenti una serie di lacerti murari individuati nel corso di scavi condotti tra il XVIII ed il XIX secolo che



*fig. 15 - Parco della Fortezza Medicea di Arezzo: lacerti murari.*

la tradizione storiografica attribuisce ad epoca etrusca e riconosce quali resti dell'antico circuito difensivo della città protostorica. Allo stato attuale sono visibili differenti tipologie di strutture litiche, dai lacerti di un manufatto costruito con grandi bozze di arenaria

legate a secco, a porzioni di muratura in laterizi uniti con malta, a porzioni di pietre spaccate legate con terra (*fig. 15*).

A prescindere dalla complessità stratigrafica delle murature e dal contesto storico di appartenenza, la posizione dei manufatti, localizzati all'interno di una depressione del piano di campagna e visibili grazie alla persistenza di una trincea di scavo a ridosso di alcune delle strutture, offriva una particolare condizione logistica per il rilievo. L'attenzione è stata rivolta sia alla muratura di maggiori dimensioni (a), un lacerto con un andamento da est verso

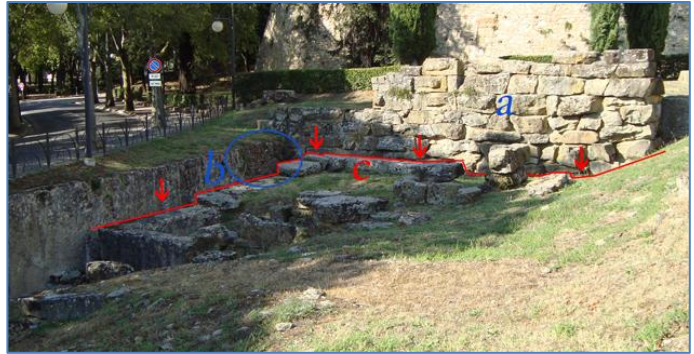
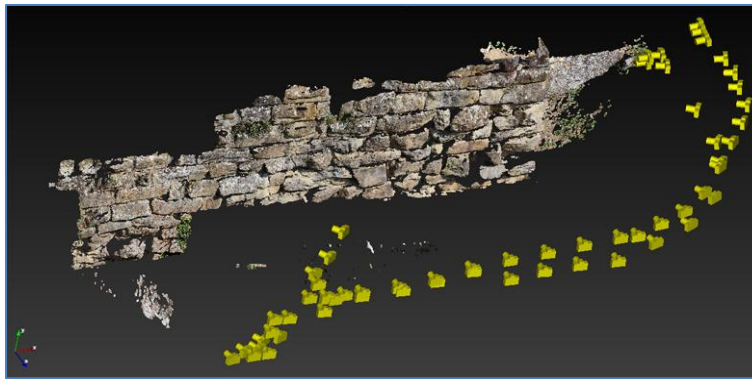


fig. 16 - Parco della Fortezza Medicea di Arezzo: lacerti murari. a struttura muraria realizzata con grandi bozze di arenaria; b lacerti murario in laterizi; c indicazione della trincea e limite del dislivello del piano di calpestio.

ovest, di circa 10 m ed un'altezza variabile dai 2.5 m ai 6 m rispetto al prospetto meridionale; sia al tratto in laterizio (b) con andamento nord-sud che si addossa alla struttura precedente all'estremità nord-occidentale (fig. 16).

Come già indicato, le maggiori difficoltà incontrate provenivano dalle possibilità di movimento dell'operatore e di posizionamento della strumentazione nel tentativo di mantenere una corretta inquadratura e una certa costante nella distanza di presa. Elemento quest'ultimo che è stato valutato in questa esercitazione come variabile, in quanto, in conseguenza della presenza della trincea di scavo (c) di circa 1.5 m di ampiezza e 2 m di profondità limitrofa alla struttura muraria principale, è stato tentato di condurre un rilievo fotografico continuativo, ossia cercando di produrre un avvicinamento progressivo alla struttura tra una strisciata di acquisizione e la successiva. Il tentativo è stato quello di variare la distanza di presa e di privilegiare un'inquadratura tendenzialmente zenitale. Dall'esperienza prodotta è emersa la possibilità di variare la distanza di presa non oltre un certo limite: nell'esempio menzionato il sistema di elaborazione dei fotogrammi è in grado di legare tra se le immagini all'interno di un range di variazione della distanza di circa 1.5-2 m; a partire da una stazione di circa 6 m dal soggetto, la ripresa fotografica si era spinta, con una corretta continuità di sovrapposizione dei fotogrammi, fino ai circa 2 m di distanza concessi ai piedi della struttura. Con l'adozione di un ottica della fotocamera di 24 mm, le immagini generate a partire da un avvicinamento alla muratura oltre i 4 m non sono state ritenute idonee dalla strumentazione software utilizzata per il processamento (fig. 17).



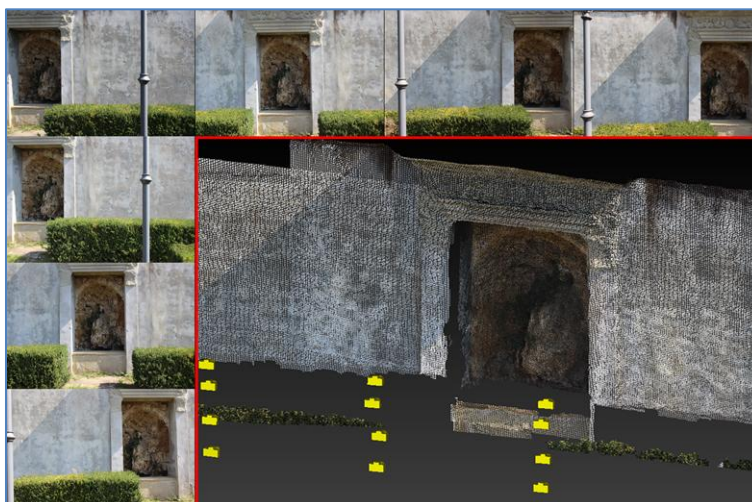
<i>fotocamera:</i>	<b>Canon EOS 600D</b>
<i>ottica:</i>	<b>fissa</b>
<i>lunghezza focale:</i>	<b>24 mm</b>
<i>distanza di presa:</i>	<b>6 m</b>
<i>Images Imported:</i>	<b>83</b>
<i>Images Bundled:</i>	<b>60</b>
<i>Images Reconstructed:</i>	<b>49</b>
<i>reconstruction step:</i>	<b>15</b>
<i>points cloud:</i>	<b>668298</b>

fig. 17 - test operativo: struttura muraria - Parco delle Fortezza Medicea di Arezzo. Processamento immagini tramite U-Map: modello tridimensionale della porzione superiore della struttura (a) effettuata con scatti a partire dal livello di campagna e ad una distanza di presa di circa 6 m.

Utile indicazione da trarre anche da questo esperimento è stata quella di valutare con particolare attenzione lo spazio circostante il soggetto da indagare ed orientare le scelte di rilievo secondo metodologie idonee al contesto. Nello specifico caso trattato, ad esempio, con l'esperienza maturata a posteriori, sarebbe stato preferibile definire due acquisizioni fotografiche indipendenti del medesimo manufatto, concentrate su due orizzonti strutturali diversi ed unire in seconda istanza, in fase di post-processamento, i due modelli tridimensionali ottenuti.

➤ *fontana* - Villa Guillichini, Tregozzano (AR)

All'interno della parete orientale del giardino settentrionale della villa è collocata una fontana incavata nella roccia lavorata. L'esercitazione ha permesso di operare su un soggetto che presentava una forte variazione della geometria soprattutto per quanto riguarda la profondità. Con un limitato numero di fotogrammi ed un'attenzione nel rispetto dell'andamento geometrico della struttura è stato possibile produrre un modello tridimensionale accettabile in una porzione di tempo limitata sia per quanto riguarda le operazioni di rilievo, sia rispetto alla fase di processamento dei dati (fig. 18).

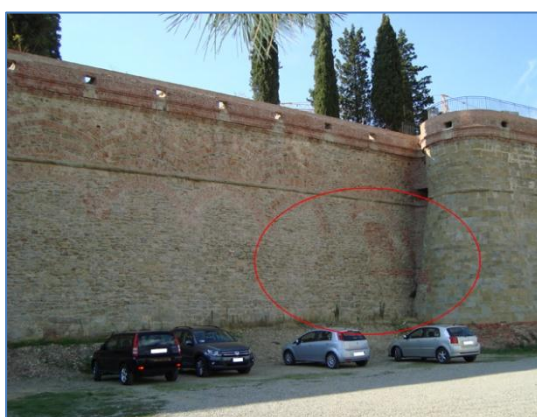


<i>fotocamera:</i>	<b>Canon EOS 600D</b>
<i>ottica:</i>	<b>fissa</b>
<i>lunghezza focale:</i>	<b>20 mm</b>
<i>distanza di presa:</i>	<b>3 m</b>
<i>Images Imported:</i>	<b>12</b>
<i>Images Bundled:</i>	<b>12</b>
<i>Images Reconstructed:</i>	<b>12</b>
<i>reconstruction step:</i>	<b>10</b>
<i>points cloud:</i>	<b>390683</b>

fig. 18 - test operativo: fontana - Villa Guillichini. Rilievo fotografico e processamento immagini tramite U-Map.

➤ *tratto di struttura muraria* - circuito murario della Fortezza Medicea, Arezzo

Cercando di portare l'attenzione verso strutture di carattere architettonico, *Z-Scan EVO* è stato utilizzato per rilevare un tratto della porzione orientale del circuito difensivo della fortezza medicea della città di Arezzo. Le mura in esame sono costituite da un tratto rettilineo di circa 8 m e con un'altezza approssimativa di circa 15-18 m, non ulteriormente indagabile nel suo proseguimento meridionale in quanto lo spazio di accesso viene impedito dalla presenza di una recinzione, mentre la porzione settentrionale prosegue fino alla congiunzione in continuità stratigrafica con una torre perimetrale a base circolare. La porzione di superficie prospiciente il tratto di mura in

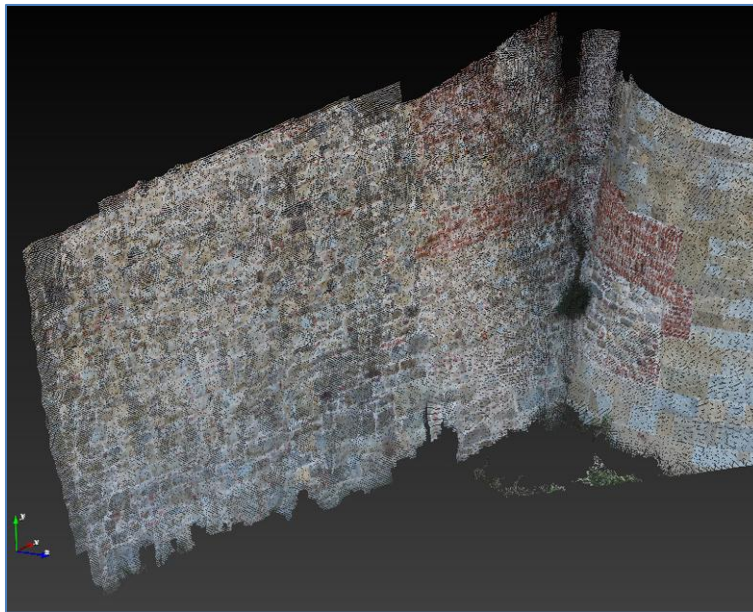


*fig. 19* - Fortezza Medicea di Arezzo: tratto orientale del circuito difensivo. In evidenza (*rosso*) la porzione di superficie muraria presa in esame.

esame si caratterizza per uno spazio aperto attualmente adibito a parcheggio, soluzione idonea alla tipologia di intervento da svolgere. Funzionalmente negativa per le specifiche attività è la presenza di un riporto di terra di circa 2 m di altezza a ridosso della struttura muraria, elemento che determina una limitazione delle possibilità di rilievo della struttura in verticale (*fig. 19*).

Nel tentativo di mantenere un discreto dettaglio fotogrammetrico il rilievo è stato effettuato ad una distanza di circa 2.5 m e per un'estensione in verticale massima rispetto alla copertura di inquadramento concessa dall'ottica della fotocamera (ottica fissa con lunghezza focale di 20 mm) e dall'estensione massima di 4 m dell'asta topografica in dotazione.

L'esperienza si è rivelata utile ai fini dell'esercitazione per comprendere le modalità di rilievo da adottare in condizioni di strutture con morfologie aggettanti e parti introflesse, come nel caso della sezione muraria di collegamento tra il tratto rettilineo e la torre perimetrale. Inoltre, la pratica ha permesso di valutare i limiti di ripresa fotografica in verticale e di stimare eventuali accorgimenti da prendere in condizioni di strutture con forte sviluppo verticale, quali una corretta valutazione dell'ottica da adottare e della distanza di presa da mantenere in considerazione del dettaglio di restituzione tridimensionale da ottenere (*fig. 20*).



<i>fotocamera:</i>	<b>Canon EOS 600D</b>
<i>ottica:</i>	<b>fissa</b>
<i>lunghezza focale:</i>	<b>20 mm</b>
<i>distanza di presa:</i>	<b>2.5 m</b>
<i>Images Imported:</i>	<b>49</b>
<i>Images Bundled:</i>	<b>49</b>
<i>Images Reconstructed:</i>	<b>36</b>
<i>reconstruction step:</i>	<b>15</b>
<i>points cloud:</i>	<b>493604</b>

fig. 20 - test operativo: struttura muraria - Fortezza Medicea di Arezzo. Processamento immagini tramite U-Map.

➤ *prospetto murario generale* - Pieve di Socana, Castel Focognano (AR)

Nel tentativo di portare l'esercitazione a confrontarsi con elementi architettonici più complessi, le attività sono state dedicate al rilievo del prospetto absidale esterno della Pieve di Socana, struttura caratterizzata da una riconosciuta complessità stratigrafica muraria, una discreta complessità geometrica ed un'ideale architettura (fig. 21); elementi ritenuti altamente idonei per valutare le potenzialità operative dello strumento.

La porzione retrostante dell'edificio ecclesiastico, adibita a giardino archeologico, si è rivelata idonea per gli spazi di manovra e di inquadramento fotografico. Sono state effettuate varie sessioni di rilievo fotografico, svolte su due giorni di attività. In questo modo è stato possibile creare blocchi di dati-immagine definiti in differenti condizioni atmosferiche<sup>39</sup>, con equipaggiamenti diversi<sup>40</sup> e da distinte distanze di presa<sup>41</sup>.



fig. 21 - Pieve di Socana, Castel Focognano (AR). Veduta prospettica della porzione absidale dell'edificio ecclesiastico.

<sup>39</sup> Le attività di rilievo si sono sviluppate su orario e condizioni atmosferiche differenti: mattina con sole alle spalle dell'operatore e pomeriggio con luminosità al di là del soggetto; condizione di meteo variabile con alternanza di

Di seguito viene proposto l'esempio ricostruttivo che appare risultare migliore nella valutazione dei tempi di rilievo fotografico e di elaborazione del modello, qualità del risultato e dettaglio ricostruttivo raggiunto. Su questa stessa base dati sono stati elaborati strati informativi e dati successivi quali DEM ed ortofotomosaici (fig. 22).

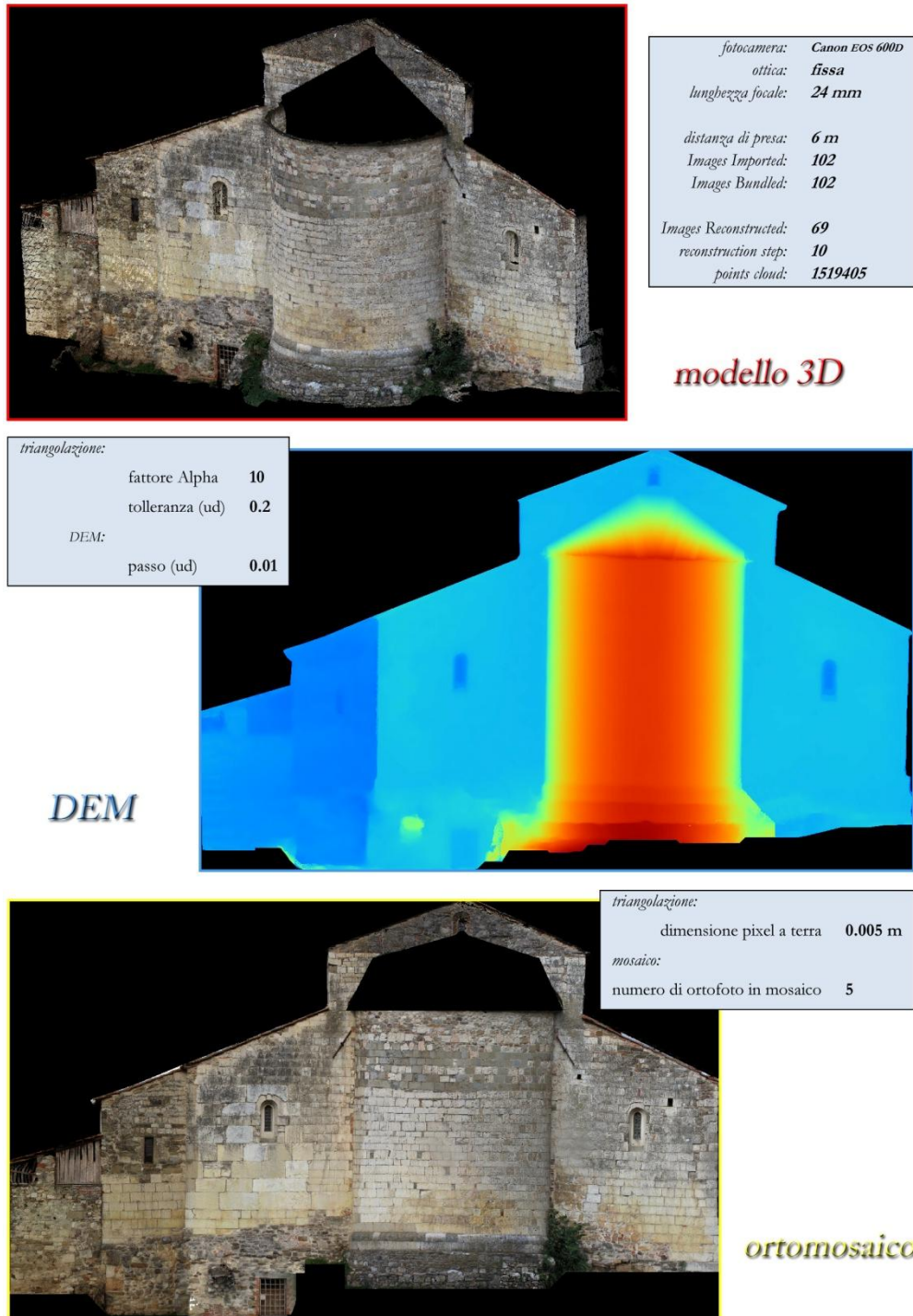


fig. 22 - test operativo: prospetto murario generale - Pieve di Socana. Processamento del modello tridimensionale, elaborazione del DEM e generazione dell'ortofotomosaico della parete meridionale dell'edificio ecclesiastico.

copertura nuvolosa e luce diretta e situazione di luce diffusa costante grazie alla presenza di cielo coperto in modo omogeneo.

<sup>40</sup> Le sessioni di rilievo hanno previsto sia l'impiego di asta topografica e tablet, sia l'utilizzo dello strumento fotografico diretto, nonché l'uso della fotocamera montata sull'asta e l'impiego dello scatto remoto senza l'ausilio del tablet.

<sup>41</sup> Distanze di presa sperimentate: 3 m, 4 m, 6 m, 9 m.

### III. Applicazioni ad un contesto archeologico: il castello di Montecchio Vesponi

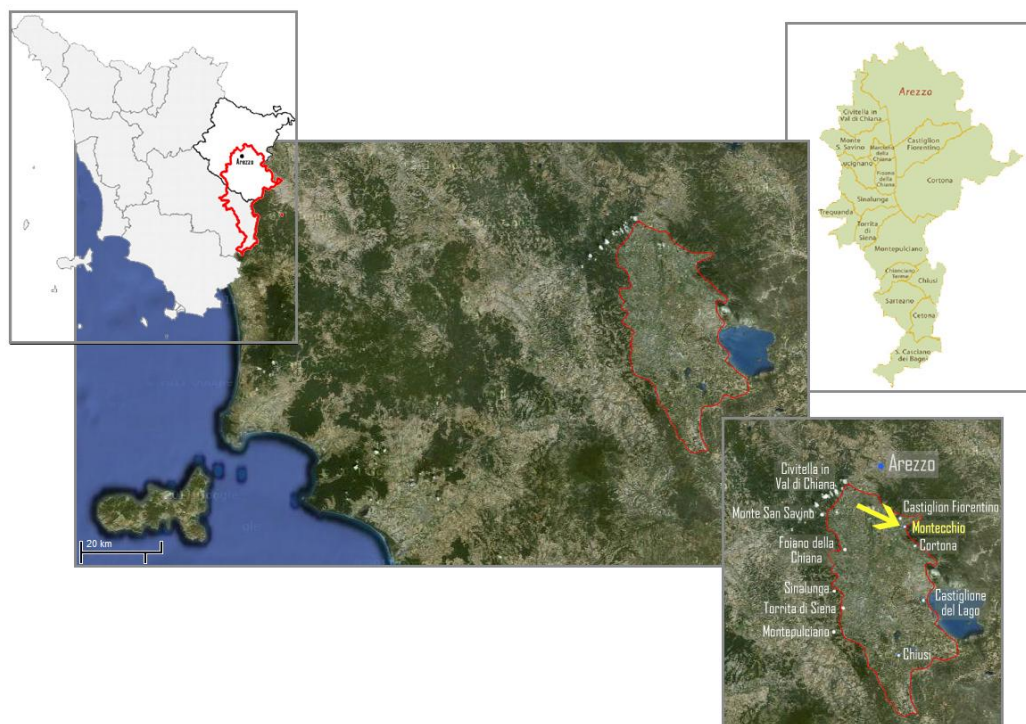
Il castello di Montecchio Vesponi (*fig. 23*), complesso monumentale della Toscana orientale, è localizzato al di sopra di un pianoro collinare di circa 5000 m<sup>2</sup> posto ad una quota media di circa 365 m sul livello del mare, a km 17 a meridione di Arezzo, sul lato orientale della Val di Chiana (*fig. 24*).



*fig. 23* - Castello di Montecchio Vesponi. Veduta aerea obliqua.

Come già accennato, il sito è stato oggetto di un programma pluriennale di indagini archeologiche, avviato a partire dalla primavera del 2005; progetto di ricerca nato con la finalità scientifica principale di conoscere e di chiarire la complessa storia insediativa del castello. Tuttavia, l'importanza dell'insediamento era

evidente ancora prima dell'intervento archeologico grazie alla ricchezza dei resti materiali conservati. Le strutture murarie del castello, infatti, mostrano tuttora diverse fasi costruttive e numerosi



*fig. 24* - La Val di Chiana. Immagine satellitare con l'estensione della valle in evidenza (al centro) e localizzazione dei principali centri abitati (in basso a destra). In alto a sinistra: Cartografia tematica della regione Toscana. In evidenza la provincia di Arezzo e l'estensione territoriale della Val di Chiana (in rosso). In alto a destra: Cartografia tematica della Val di Chiana aretina con la rappresentazione dell'attuale divisione amministrativa comunale.

restauri, realizzati già nel XVIII secolo, poi con maggiore intensità alla fine dell'Ottocento e, a più riprese, fino ai giorni nostri. Ampi tratti delle cortine murarie propriamente medievali sono tuttavia ben riconoscibili per tecnica costruttiva e tipologia degli edifici interessati. L'edificio al quale è attribuita la cronologia più alta, è la torre sommitale che, almeno nella sua fase più antica, è caratterizzata da un paramento in grandi conci di arenaria, alcuni dei quali bugnati. Il manufatto è inquadrabile tra XI e XII secolo per il tipo di tecnica muraria e sulla base delle analogie con edifici



fig. 25 - Castello di Montecchio Vesponi. Veduta interna della porzione sud-occidentale della superficie castellana.

aretini<sup>42</sup>. Al Duecento sono invece attribuibili: la casa-torre, situata al centro dell'area, cui erano annessi in origine altri edifici, nonché la fase originaria del recinto castellano, dotato sin dall'inizio di almeno otto torri rompitratta rettangolari, aperte verso l'interno. Per chiudere con gli edifici medievali, quello di cronologia più bassa (XIV secolo), è senz'altro il cosiddetto Cassero, di forma trapezoidale, con murature che si appoggiano sia alla torre sommitale, sia alle mura del castello (fig. 25).

### III.1 L'architettura del castello

Il complesso architettonico di Montecchio Vesponi presenta una pianta pseudo circolare e si articola in un circuito murario esterno, che ne delimita la superficie, e in una serie di edifici e strutture interni.

Le mura castellane (fig. 26) si sviluppano su un perimetro di circa 265 m; la superficie interna del castello copre un'area approssimativa di 5000 m<sup>2</sup>. Il circuito murario è contraddistinto dalla presenza di otto torri rompitratta, a pianta quadrata ma prive del lato interno, secondo una tipologia definita "scudata". Le torri sono dislocate a distanza piuttosto regolare, ad eccezione della porzione di mura a nord-ovest, che non presenta alcuna struttura, sebbene sia ipotizzabile che in passato vi fosse stata un'altra torre perimetrale anche in questo

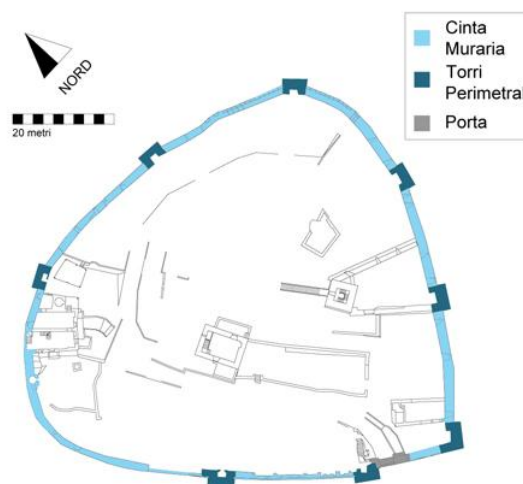


fig. 26 - Pianta del castello di Montecchio con l'individuazione della cinta muraria, delle torri perimetrali e della porta di accesso.

<sup>42</sup> MINI, 2008-2009; MINI, 2005; MINI, PAMPALONI, 2004.



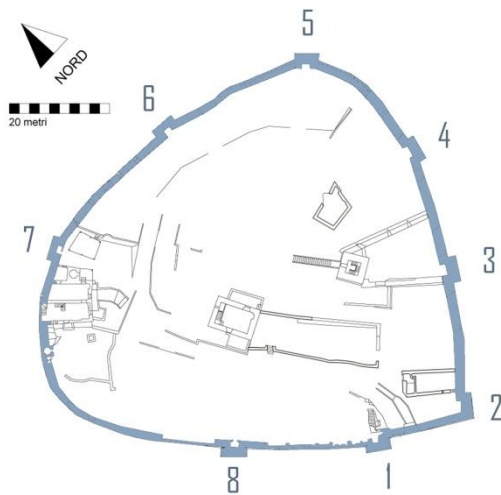


fig. 27 - Pianta del castello di Montecchio: il recinto castellano e la numerazione di riferimento delle torri perimetrali.

Una rampa di accesso introduce all'interno del castello; il percorso prosegue svoltando a sinistra ed indirizzandosi verso nord.

La superficie interna del castello si presenta pianeggiante nell'area limitrofa alla porzione occidentale della cinta muraria. A partire da questa zona si evidenzia una progressiva crescita delle quote altimetriche del terreno, che divengono massime nella parte centro meridionale, andando a formare un promontorio interno. Sul punto



fig. 29 - La torre di Montecchio, veduta del prospetto settentrionale.

massimo di altura, a circa 14 m di distanza dalle

mura perimetrali meridionali, si eleva la torre sommitale (fig. 29). La struttura presenta una pianta quadrangolare, con le dimensioni di circa 5.40 m per 5.20 m e si sviluppa per un'altezza di circa 30 m. Lo spessore dei muri sembra variare da 1.20 m a 1.35 m.

Agli spigoli di nord-est e di sud-ovest della torre si appoggiano due imponenti strutture murarie che, divergendo dai rispettivi punti di origine, proseguono fino ad addossarsi alla porzione meridionale delle mura castellane. L'area così delimitata va a costituire il cassero di Montecchio, che copre una superficie di circa 130 m<sup>2</sup>. Il lato occidentale presenta un'altezza massima di circa 13.50 m e si distende per una lunghezza di circa 16.20 m. Lo spessore della

setto, su un originario numero di nove torri esterne (fig. 27).

L'accesso all'interno del complesso è consentito attraverso una porta posta a sud e protetta, sul lato settentrionale, da una delle torri perimetrali. La porta e le strutture immediatamente adiacenti appaiono fortemente restaurate e sembra ormai perso l'aspetto originario delle murature. La porta è costituita da un arco a tutto sesto, realizzata per tre quarti con conci di arenaria, ben squadri e lavorati a subbia e scalpello, il resto con pietre sbazzate, probabilmente i resti dell'originario stipite destro.



fig. 28 - Veduta aerea del complesso architettonico di Montecchio precedente agli interventi di restauro e recupero architettonico della fine del secolo scorso.

muratura varia alla base da 0.95 m a 1.60 m. La struttura muraria orientale mostra un'altezza media di circa 12.70 m e una larghezza di circa 18.60 m. Da 1.50 m a 2.30 m è la variazione approssimativa dello spessore del muro misurato alla base (fig. 30).

Qualche metro più a nord-ovest della torre, in una posizione piuttosto centrale rispetto al circuito murario, è localizzato l'edificio che nelle fonti è variamente indicato come *Palazzo dei figli di Orsello*, *Palazzo del Comune*, *Palazzo dell'Ufficiale* o *Palazzo di*



fig. 30 - Il cassero di Montecchio, veduta del prospetto occidentale.



fig. 31 - La casa-torre di Montecchio, veduta del prospetto occidentale.

*Giustizia*. La struttura è suddivisa in quattro piani e recenti lavori di restauro ne hanno permesso l'abitabilità. Il fabbricato, riconoscibile come casa-torre, presenta una base quadrangolare con i lati a nord e a sud di circa 6.30 m ed i lati ad est e ad ovest di circa 9 m. Lo spessore della muratura varia da 0.90 m a 1.20 m (fig. 31).

I restauri degli anni '80 del secolo scorso si sono concentrati anche sull'unica abitazione che si era conservata in alzato. Tali lavori hanno permesso l'abitabilità dello stabile, concentrandosi sul consolidamento e recupero delle strutture murarie superstiti e sulla ricerca della planimetria originale dell'edificio, in quel momento nascosta a causa dell'innalzamento del livello di calpestio. E' stato asportato, inoltre, lo strato di intonaco che copriva

completamente le pareti esterne. L'abitazione si trova di fronte al lato settentrionale della casa-torre e si addossa alla porzione nord- occidentale delle mura perimetrali (fig. 32)



fig. 32 - L'abitazione di Montecchio., veduta del prospetto meridionale prima e dopo gli interventi di restauro degli anni '80 del secolo scorso.

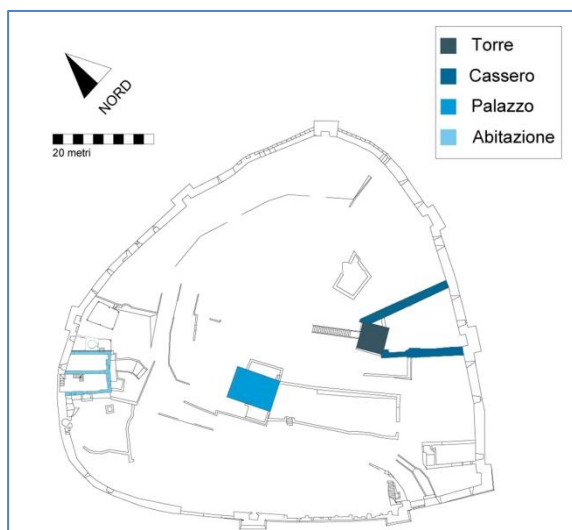


fig. 33 - Pianta del castello di Montecchio con l'individuazione dei corpi di fabbrica interni.

Resti di probabili abitazioni sono individuabili sia alla destra della porta di ingresso al castello, nell'angolo sud-occidentale della cinta muraria, sia nei pressi del lato orientale della torre. Anche le strutture murarie localizzate a ridosso della parete sud della casa-torre, oggi utilizzate come mura di terrazzamento, si rivelano testimonianze di precedenti abitazioni, ormai sopravvissute nei soli livelli del basamento.

Il Castello di Montecchio Vesponi si presenta ad oggi recuperato nelle emergenze architettoniche che erano sopravvissute, fino alla

fine degli anni '70 del XX secolo, allo stato di edifici malandati o veri e propri ruderi. La storia recente del castello appare contraddistinta da una progressiva distruzione delle numerose abitazioni testimoniateci fino ai primi decenni dell'ottocento. Alcune aree interne al castello, in precedenza edificate, hanno subito livellamenti ed accumuli di materiale eterogeneo; fonti orali ci parlano della conversione di alcune superfici in terreni agricoli e piccoli orti. Le strutture architettoniche oggi presenti mostrano i segni di profonde modifiche e di intensi restauri.

Una prima stagione di restauri fu promossa da Giacomo Servadio, in seguito all'acquisto del complesso, avvenuto a partire dal 1872. Attività di consolidamento furono condotte anche agli inizi del novecento dalla famiglia Budini Gattai. Con il passaggio del castello all'attuale proprietaria, dopo alcuni decenni di degrado ambientale e di generale incuria delle strutture, tra il 1980 ed il 1984 sono stati apportati importanti ed incisivi interventi di restauro. Pochi anni dopo, ulteriori lavori di consolidamento sono stati svolti con la partecipazione del Ministero dei Lavori Pubblici.

Le ristrutturazioni che si sono succedute tra la fine del XIX e gli inizi del XX secolo, talvolta, sembrano aver prodotto una profonda mutazione dell'aspetto originario delle architetture. Più in generale, i recenti restauri hanno determinato una notevole difficoltà nell'analisi dei giacimenti stratigrafici verticali, conseguenza diretta di un'ingente patina restaurativa che tende ad uniformare le tipologie murarie.

### III.2 La scelta del sito e gli obiettivi dell'intervento

La prima fase di indagine archeologica sul complesso monumentale di Montecchio, avviata nella primavera del 2005, aveva previsto proprio un'iniziale analisi delle emergenze architettoniche

presenti sul sito. In un primo momento, i dati raccolti sono stati oggetto di due dissertazioni di laurea, tramite le quali è stato possibile elaborare le prime informazioni materiali sul castello ed avviare l'inquadramento storico-archeologico del centro castrale<sup>43</sup>. In seguito, i risultati di quella prima ricerca sono stati nuovamente elaborati ed emendati da eventuali errori una volta ultimato il programma di indagine stratigrafica, affinando e precisando cronologie ed interpretazioni; il tutto sulla base di una più matura esperienza ed alla luce delle nuove scoperte<sup>44</sup>.

Nel corso di questa fase operativa, si era rivelata essenziale per lo sviluppo dei vari processi d'indagine l'elaborazione dei prospetti generali dei singoli corpi di fabbrica<sup>45</sup>. Le notevoli dimensioni delle strutture da rilevare non avevano consentito di adottare un'indagine tradizionale con una misurazione unitaria diretta. Per la realizzazione dei prospetti generali era stata utilizzata una metodologia applicata all'informatica con l'utilizzo di programmi specifici<sup>46</sup> per il raddrizzamento fotografico: era stato possibile realizzare rilievi fotogrammetrici attraverso il *raddrizzamento prospettico* di immagini fotografiche, ossia applicando una trasformazione di tipo omografico.

L'utilizzo dei software aveva permesso di scomporre il soggetto da rilevare in più parti, per poi



fig. 34 - Schematizzazione del processo di rilievo fotogrammetrico attraverso il metodo del raddrizzamento prospettico.

essere fotografato e riassembleto successivamente. In ogni parte erano stati individuati almeno quattro punti di appoggio, tramite i quali era stato possibile ottenere restituzioni fotogrammetriche bidimensionali. Ogni punto era stato rilevato tramite trilaterazione manuale. Così era stato possibile

creare disegni prospettici misurati, le cui dimensioni rispettavano, con un accettabile margine di errore, i volumi delle strutture (fig. 34).

L'opportunità di poter sperimentare l'utilizzo del sistema fotogrammetrico *Z-Scan EVO* su questo medesimo contesto è apparsa particolarmente congeniale per una valutazione delle potenzialità applicative rispetto ad un tipico contesto di indagine archeologica ricco di architetture caratterizzate da un alto livello informativo e da una notevole varietà geometrica.

Fattori di natura diversa, come proprio la conformazione del terreno piuttosto che le dimensioni del soggetto da rilevare, influenzano notevolmente la strategia da adottare e le accortezze da ricercare.

<sup>43</sup> GIOVANNINI, 2005-2006; ORECCHIONI, 2005-2006.

<sup>44</sup> GIOVANNINI, 2010-2011, pp. 120-194.

<sup>45</sup> A tal proposito si veda BROGIOLO, 1988.

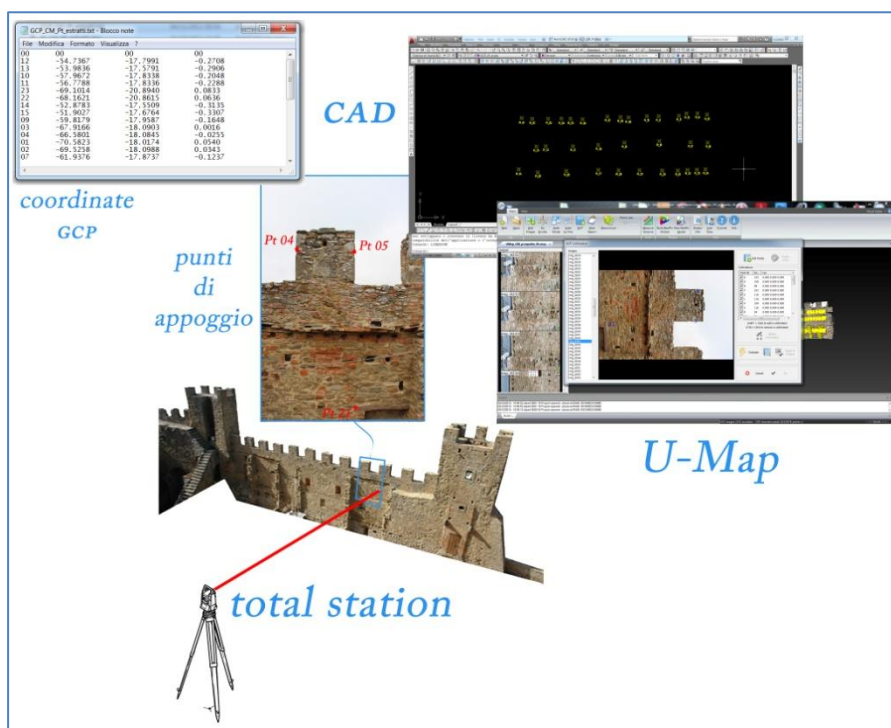
<sup>46</sup> Vectar RealView; Autodesk Raster Design 2010.

A tutto questo va aggiunto, il fattore della pregressa esperienza di rilievo fotogrammetrico e le possibilità di confronto tra le due diverse tecniche; nonché l'opportunità di comparare le differenti fasi operative, i tempi di elaborazione e la qualità dei risultati ottenuti rispetto ad un medesimo campione architettonico.

Nelle pagine seguenti viene proposta una sintesi descrittiva dei momenti principali dell'esperienza maturata con l'applicazione di *Z-Scan EVO* ad una selezione dei corpi di fabbrica presenti all'interno del castello; casi studio ritenuti idonei e sufficienti per valutare le funzionalità dello strumento e stimare la qualità delle elaborazioni e le possibilità di utilizzo. Vengono prese in considerazione le diverse fasi di lavoro, dall'acquisizione sul campo alle elaborazioni dei dati raccolti in laboratorio.

### III.3 L'acquisizione del dato geometrico

Eseguita l'analisi preventiva delle caratteristiche geometriche dei corpi di fabbrica prescelti ed effettuata una ricognizione degli spazi circostanti, dopo aver stabilito le modalità con cui svolgere le differenti riprese fotografiche, nonché le inquadrature necessarie alla corretta copertura di ogni



soggetto, è stato elaborato un piano di rilievo attraverso l'impiego di uno strumento topografico<sup>47</sup>. In questo modo è stato possibile creare un sistema di riferimento spaziale tridimensionale per ogni struttura indagata; una serie finita di punti in formato numerico e vettoriale, per ognuno dei quali è stato possibile conoscere le

fig. 35 - Schematizzazione del processo di realizzazione del sistema di riferimento spaziale per la georeferenziazione dei modelli tridimensionali realizzati tramite U-Map.

esatte coordinate. La posizione di questi punti di appoggio è stata tale da abbracciare il più possibile il prospetto murario di riferimento (fig.35). Rispetto ai soggetti di grandi dimensioni, come nel caso

<sup>47</sup> Per questa operazione la strumentazione utilizzata è stata una stazione totale Leica CTR 110C.

della torre sommitale (CF 1), in conseguenze delle difficoltà di rilievo strumentale, le misure si sono limitate alla determinazione di una distanza esatta tra due punti noti della superficie muraria; dato comunque sufficiente per la definizione di un valore dimensionale di riferimento.

La creazione di questa base numerica spaziale ha consentito, nel corso della fase di processamento dei dati raccolti, di generare un modello tridimensionale *georeferenziato* ovvero di consentire la *messa in scala* dello stesso attraverso l'importazione e la collimazione dei *punti di controllo* (GCP) misurati con i punti omologhi individuati nei fotogrammi (*mire*). Il software di elaborazione dei fotogrammi e di generazione delle nuvole di punti *U-Map*, consente infatti l'importazione delle coordinate dei punti di controllo e la procedura di collimazione monoscopica di tutti i punti presenti sulle immagini<sup>48</sup>.

#### III.4 Sperimentazione di scansione fotografica: le evidenze architettoniche

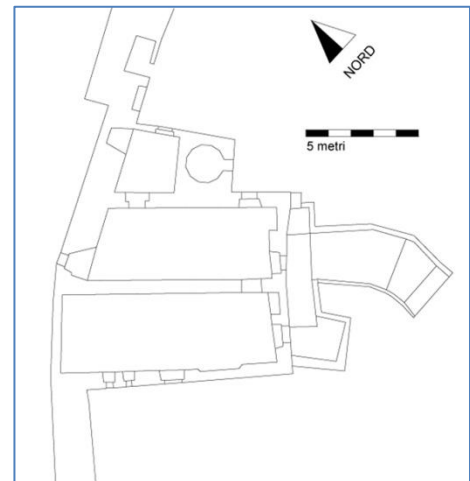
- PROGETTO 1: CF 4 - la casa a pilastri

➤ *La struttura architettonica:*

Si tratta dell'unica abitazione superstite tra i numerosi edifici che un tempo si addossavano alla cinta muraria del castello. Il fabbricato è caratterizzato dalla presenza di tre pilastri che si addossano alla porzione settentrionale delle mura castellane. Le murature non sono perfettamente parallele e tendono a convergere verso sud, probabilmente conseguenza della curva che effettua la cinta muraria in quel punto.

La muratura occidentale presenta una lunghezza di circa 9.20 m ed uno spessore che varia dai 0.60 m ai 0.72 m. La struttura muraria centrale mostra una lunghezza di circa 8.85 m ed uno spessore di circa 0.63 m. La muratura orientale misura circa 8.70 m ed ha uno spessore che varia dai 0.65 m ai 0.70 m. Le murature distano tra di loro approssimativamente 3.20 m (*fig. 36*).

La parete meridionale deriva dalla costruzione di due murature intermedie tra le strutture murarie descritte in precedenza e nel suo complesso si sviluppa per una lunghezza di circa 8.10 m.



*fig. 36* - Planimetria dell'abitazione del castello, CF 4.

<sup>48</sup> Si ricorda che di per sé l'operazione di georeferenziazione non è strettamente obbligatoria per la ricostruzione del modello 3D, ma è necessaria nel caso si voglia generare un modello metrico sul quale effettuare delle misure. Il software è in grado di georeferenziare la nuvola di punti attraverso l'importazione e collimazione dei GCP, ma è possibile determinare la messa in scala del modello tridimensionale anche soltanto attraverso una apposita funzione di messa in scala della nuvola indicando una distanza di riferimento tra due punti noti.

L'edificio presenta un'altezza massima di circa 7.30 m, misurata a partire dalla soglia di ingresso, situata sul lato meridionale.



fig. 37 - L'abitazione del castello, CF 4. Veduta del paramento meridionale.

Nel lato sud di ogni pilastro si osservano i buchi per l'alloggio dei travi, disposti con simmetria sulle tre strutture. Tali elementi non sembrano essere in fase con le strutture murarie su cui si impostano (fig. 37).

Sulla parete orientale sono riconoscibili le evidenze di numerosi interventi, quali l'apertura di una finestra nella parte centrale della parete e di una porta seminterrata nella parte

settentrionale; la costruzione delle merlatura; la tamponatura successiva all'impostazione dell'impianto di aspirazione del camino.

Nel periodo precedente agli interventi di restauro degli anni '80 del secolo scorso, l'edificio si trovava parzialmente interrato, l'attuale ambiente inferiore si trovava completamente ostruito. Inoltre era presente uno strato di intonaco che copriva completamente i paramenti murari.

### ➤ Fase 1: il rilievo fotografico

Tenendo conto delle caratteristiche geometriche del fabbricato, il rilievo fotografico è stato effettuato utilizzando l'asta topografica grazie alla quale la fotocamera è stata posta ad un'altezza di circa 2.5 m da terra. Le stazioni di ripresa sono state effettuate ad una distanza

fotocamera:	Canon EOS 600D
ottica:	fissa
lunghezza focale:	20 mm
distanza di presa:	3 m
immagini n.:	76

indicativa di 3 m dal soggetto. Tale posizione ha consentito una inquadratura completa del corpo di fabbrica in senso verticale in ogni fotogramma pur mantenendo una certa propensione alla zenitalità (fig. 38). In base a questo, è stata sviluppata un'unica strisciata di ripresa a partire dall'angolo nord-

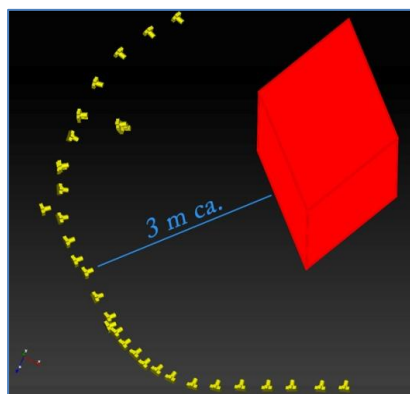


fig. 38 - CF 4, schematizzazione delle stazioni di ripresa fotografica.

orientale del manufatto; il rilievo è proseguito in senso orario con punti di stazione ad intervalli di circa 1 m, andando a circoscrivere un percorso a semicerchio ricongiungente con l'angolare nord-occidentale dell'edificio. Particolare attenzione è stata dedicata al necessario margine di sovrapposizione dei fotogrammi ed all'avvio e conclusione della battuta fotografica oltre i limiti circoscritti del soggetto; fattore, quest'ultimo, ricercato nel tentativo di restituzione di un modello tridimensionale completo e definito anche nelle parti marginali.

➤ *Fase 2: generazione della nuvola di punti*

Avviando la fase di processamento, le 76 immagini, risultato dell'acquisizione fotografica, sono state importate all'interno del software *U-Map* e qui processate attraverso i già citati passaggi di elaborazione con un tempo totale<sup>49</sup> di elaborazione di circa 1h 20'. La ricostruzione, georeferenziata sulla base di una congrua serie di 14 GCP, ha ricomposto il modello 3D, includendo anche le porzioni marginali ed una serie di elementi superflui rispetto alla struttura esaminata i quali sono stati ritagliati ed eliminati in un

points cloud:	464370
tie points:	18382
reconstruction step:	10



fig. 39 - CF 4, modello tridimensionale generato tramite *U-Map*.

I procedimenti successivi sono stati operati sui dati relativi al prospetto meridionale del corpo di fabbrica, ossia la facciata dell'edificio e la componente con un maggiore potenziale informativo di carattere stratigrafico (fig. 40).

fig. 40 - CF 4, modello tridimensionale del prospetto meridionale definito tramite *Z-Map*.

secondo momento importando la nuvola all'interno del software *Z-Map Laser* (fig. 39).

L'esistenza di lacune nella nuvola prodotta al termine della fase di 'pulizia' è causata dalla presenza di annessi strutturali addossati all'abitazione piuttosto che una folta vegetazione limitrofa alle murature; fattore di disturbo assolutamente non svincolabile dagli esiti del rilievo.



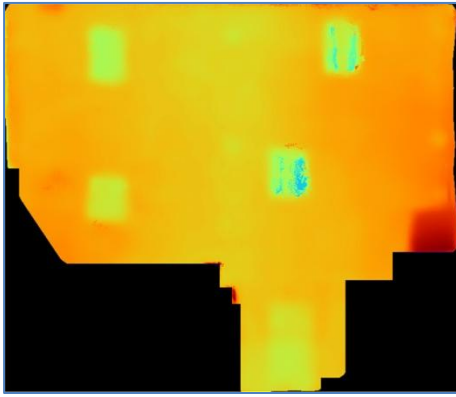
➤ *Fase 3: realizzazione del DEM*

Una volta estrapolate le sole informazioni tridimensionali relative alla parete meridionale dell'abitazione ed orientato il sistema di coordinate (UCS) di *Z-Map Laser* in conformità alla superficie muraria, è stato generato il modello di elevazione digitale (DEM). Le variazioni di

<i>triangolazione:</i>	
fattore Alpha	10
tolleranza (ud)	0.2
<i>DEM:</i>	
passo (ud)	0.01

<sup>49</sup> Bundle Process Time: 00:06:27  
 Match Feature Process Time: 00:05:08  
 Find Feature Process Time: 00:03:06  
 Reconstruction process: 01:07:02





quota su base raster sono state impiegate come passaggio intermedio per la creazione di ortofoto (fig. 41).

fig. 41 - CF 4, DEM del prospetto meridionale generato tramite Z-Map.

➤ *Fase 4: sviluppo dell'ortofoto e dell'ortomosaico*

Grazie alla porzione di superficie inquadrata dalla fotocamera dotata di un ottica fissa da 20 mm e con il supporto dell'asta topografica per l'elevazione, è stata sufficiente la generazione di 2

*triangolazione:*

dimensione pixel a terra **0.001 m**

*mosaico:*

numero di ortofoto in mosaico **2**



ortofoto per raggiungere una copertura completa della parete. Le due immagini ortorettificate sono state poi fuse in un unico raster (fig. 42).

fig. 42 - CF 4, ortofotomosaico del prospetto meridionale creato tramite Z-Map.

• PROGETTO 2: CF 3 - la casa-torre

➤ *La struttura architettonica*

La casa-torre sorge in una posizione elevata ed è situata pressappoco al centro del castello; presenta una pianta quadrangolare ed un'altezza massima di circa 15.45 m, misurata sul lato meridionale. L'edificio è costruito con pietra arenaria lavorata, di media pezzatura, mentre per i cantonali sono state utilizzate bozze di notevoli dimensioni, soprattutto alla base, dove si individuano elementi litici che misurano 0.90-1.00 m per 0.40 m; la struttura si appoggia direttamente sulla roccia vergine che emerge sul lato sud.

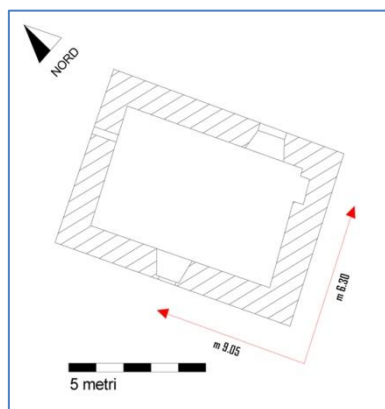


fig. 43 - Planimetria della casa-torre del castello, CF 3.

Il CF 3 si sviluppa su quattro piani che sono stati resi nuovamente abitabili grazie ai recenti interventi di restauro; su ogni lato è possibile riconoscere le tracce di rifacimenti e ristrutturazioni (fig. 43).

Sul prospetto occidentale attualmente sono presenti cinque aperture, suddivise in tre finestre e due porte di accesso al piano terra. Le porte si aprono su una terrazza, la quale si trova ad un'altezza di circa 2.50 m, rispetto alla via sottostante. L'analisi stratigrafica della parete permette di individuare le evidenze di tre precedenti aperture, attualmente tamponate.

Testimonianze di un'apertura si trovano nella muratura su cui s'impone l'attuale porta di sinistra. È possibile rintracciare parte degli stipiti, costruiti con conci di arenaria, e l'architrave sorretto da mensole aggettanti, sormontato a sua volta dai resti di un arco a tutto sesto, in gran parte intaccato dalla costruzione della finestra soprastante. Tale accesso doveva presentare un'apertura di circa 1.10-1.20 m per un'altezza massima di circa 3.20 m.

Un'apertura si doveva trovare anche nella parte superiore dell'attuale accesso di destra; si riconoscono qui i segni di una successiva tamponatura, attività probabilmente da porre in relazione con l'impostazione della porta sottostante.

L'attuale finestra del secondo piano sembra sia stata ricavata dalla parziale tamponatura di una apertura precedente; si notano, infatti, i resti di uno stipite costruito con blocchi di arenaria squadrati.

L'apertura dell'ultimo piano è costruita con blocchi di arenaria che sorreggono due mensole aggettanti, sulle quali si imposta un architrave. Quest'elemento architettonico presenta un'ampiezza di circa 4.85 m per un'altezza di circa 1.20 m (fig. 44).



fig. 44 - L'abitazione del castello, CF 4. Veduta della porzione sud-occidentale del corpo di fabbrica.

Sulla parete meridionale, a circa 7.30 m dal livello del terreno, è possibile leggere le tracce di una precedente struttura che si appoggiava al CF 3 da questo lato. Sono evidenti i segni del profilo di un tetto e si possono osservare i numerosi alloggi per le trabeazioni che si andavano ad impostare su questa parete, in gran parte tamponati durante i recenti lavori di restauro.

La parete meridionale presenta anche un'apertura nella parte sinistra, costruita con mensole aggettanti ed architrave, ma la documentazione fotografica d'archivio evidenzia come tale elemento architettonico sia di recente fattura.

Il lato orientale è caratterizzato dalla presenza di un terrazzo, di recente costruzione, su cui si apre una porta che permette l'accesso al primo piano. La porta appartiene ad una fase tarda del CF 3. Di fronte a questa apertura, almeno fino ai primi anni del XX secolo, si addossava un'ulteriore struttura, probabilmente un'anticamera di ingresso, la quale è testimoniata dalle fotografie di inizio novecento e sui cui resti dovrebbe essere stato impostato l'attuale

terrazzo. Alcune aperture oggi presenti su questo lato del CF 3 sono state create con le ristrutturazioni degli anni '80 del secolo scorso, come dimostra, anche in questo caso, una comparazione con la documentazione fotografica. In fase con la muratura principale è da ritenere l'apertura localizzata nella parte alta del prospetto (0.18 m per 0.85 m).

Il lato settentrionale mostra una tipologia muraria pressoché omogenea; si notano, in particolare, le pietre alla base dello stipite di nord-est, che tendono a sporgere verso l'esterno e sulle quali si osservano segni di una lavorazione più accurata (elementi litici bugnati). Nella parte alta del prospetto si osserva un'apertura delle dimensioni approssimative di 0.18 m per 1.00 m.

➤ *Fase 1: il rilievo fotografico*

La posizione sopraelevata della casa-torre ai margini del pianoro del castello ha rappresentato una contemporanea caratteristica di vantaggio e sfavore per quanto riguarda la fase di acquisizione fotografica. La possibilità di inquadrare l'edificio a 360° ha permesso, in ultima analisi, la possibilità di creare un modello tridimensionale completo che copre la fabbrica dal basamento

<i>fotocamera:</i>	<b>Canon EOS 600D</b>
<i>ottica:</i>	<b>fissa</b>
<i>lunghezza focale:</i>	<b>20 mm</b>
<i>distanza di presa:</i>	<b>5 m</b>
<i>immagini n.:</i>	<b>63</b>

fino alla porzione sommitale con la sola esclusione del tetto. Al contrario, la variazione di quota della superficie intorno al manufatto con sbalzi fino a 6-8 m non ha consentito di mantenere in maniera sempre omogenea la distanza di presa dal soggetto. A tutto questo va aggiunto la presenza di ostacoli e di elementi di disturbo soprattutto nelle porzioni limitrofe alle pareti settentrionale ed occidentale. Quest'ultima, in modo particolare, ha presentato notevoli difficoltà di ripresa fotografica a causa della presenza di un terrazzo addossato alla parte di basamento della casa-torre, sopraelevato di circa 2.5 m rispetto al sottostante piano di calpestio, dotato di parapetto posto ad una distanza

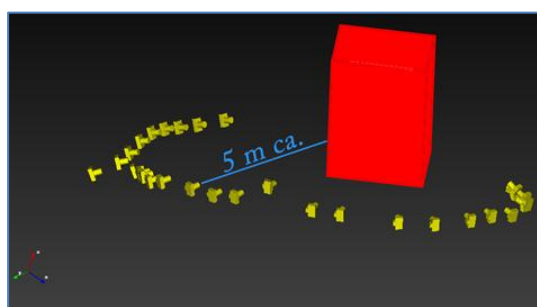


fig. 45 - CF 3, schematizzazione delle stazioni di ripresa fotografica.

dalla parete grossomodo di 1.5 m. Nel tentativo di rilevare anche queste aree della superficie architettonica, le operazioni di acquisizione sono state realizzate attraverso tre processi di rilievo fotografico.

Un primo blocco di immagini è stato prodotto ad una distanza di circa 5 m dal soggetto, inquadrando l'intero fabbricato in senso verticale in ogni fotogramma e muovendosi lungo un percorso pressoché circolare

intorno a tutto il soggetto; sono state prodotte 63 immagini con un idoneo fattore di sovrapposizione e con un distanza di presa laterale di circa 1.5 m (fig. 45). Per quanto riguarda la parete nord e la parete ovest è stato tentato di effettuare un'acquisizione delle porzioni di superficie rimaste non visibili nel corso della prima battuta, cercando di ovviare agli ostacoli presenti. Tuttavia, i notevoli limiti di movimento concessi all'operatore hanno impedito di completare pienamente il rilievo della superficie.

➤ *Fase 2: generazione della nuvola di punti*

*U-MAP* ha processato la prima serie di fotogrammi in circa<sup>50</sup> 1h 05', generando un modello tridimensionale con 366359 punti. Quest'ultimo è stato georeferenziato attraverso l'inserimento di una misura di riferimento del fabbricato. Al momento del rilievo geometrico erano state misurate una serie di distanze dimensionali della struttura, le quali sono state utilizzate per la procedura di messa in scala della nuvola di punti secondo la procedura di *U-Map*. In seguito sono state elaborate le immagini relative ai due successivi blocchi di ripresa fotografica, utili all'integrazione del modello principale nelle porzioni con presenza di lacune.

<i>points cloud:</i>	<b>366359</b>
<i>tie points:</i>	<b>15463</b>
<i>reconstruction step:</i>	<b>10</b>



Dai modelli sono stati eliminati gli elementi superflui tramite la loro importazione all'interno di *Z-Map laser*. Sempre attraverso l'utilizzo di questo software la nuvola principale è stata implementata con i dati tridimensionali provenienti dai due successivi rilievi mirati delle pareti nord ed ovest del fabbricato. I dati sono stati uniti attraverso una corretta georeferenziazione delle tre nuvole. Sebbene il dato sia soddisfacente, le difficoltà incontrare per le citate ragioni logistiche e soprattutto la presenza di barriere hanno determinato la presenza di qualche lacuna dell'informazione tridimensionale (*fig. 46*).

*fig. 46* - CF 3, modello tridimensionale generato tramite *U-Map*.

<sup>50</sup> Bundle Process Time: 00:02:58  
 Match Feature Process Time: 00:03:16  
 Find Feature Process Time: 00:02:21  
 Reconstruction process: 00:57:44

➤ *Fase 3: realizzazione del DEM*

L'elaborazione dei dati tridimensionali appartenenti ad ogni prospetto ha permesso la produzione di un DEM. In questo contesto sono presentati i risultati provenienti dalle informazioni raccolte del prospetto meridionale e del prospetto orientale, quali elementi conseguiti con maggiore completezza (fig. 47 - fig. 50).

<i>triangolazione:</i>	
fattore Alpha	10
tolleranza (ud)	0.2
<i>DEM:</i>	
passo (ud)	0.01



fig. 47 - CF 3, modello tridimensionale del prospetto orientale definito tramite Z-Map.

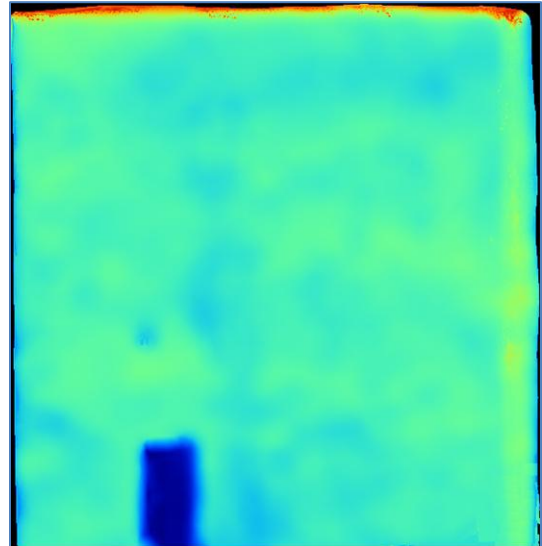


fig. 48 - CF 3, DEM del prospetto orientale generato tramite Z-Map.



fig. 49 - CF 3, modello tridimensionale del prospetto meridionale definito tramite Z-Map.

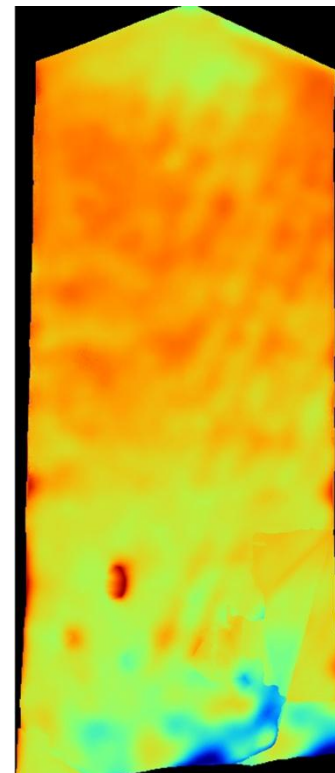


fig. 50 - CF 3, DEM del prospetto meridionale generato tramite Z-Map.

➤ *Fase 4: sviluppo dell'ortofoto e dell'ortomosaico*

Sulla base dei DEM elaborati sono state generate le ortofoto, rappresentazioni altamente aderenti alla realtà dal punto di vista metrico. In continuità con i casi esempio proposti nel paragrafo precedente sono qui proposti l'ortofotomosaico del prospetto meridionale, generato attraverso l'assemblaggio di 3 ortofoto e l'ortofotomosaico del prospetto orientale, creato sempre a partire dall'ortorettifica di 3 fotogrammi (*fig. 51 - fig. 52*).

<i>triangolazione:</i>	
dimensione pixel a terra	<b>0.005 m</b>
<i>mosaico:</i>	
numero di ortofoto in mosaico	<b>3</b>

*fig. 51 - CF 3, ortofotomosaico del prospetto orientale creato tramite Z-Map.*



*fig. 52 - CF 3, ortofotomosaico del prospetto meridionale creato tramite Z-Map.*

- PROGETTO 3: CF 1 - la torre sommitale

- *La struttura architettonica:*

La torre sommitale presenta una pianta quadrangolare e si eleva ad un'altezza di circa 30 m. Sono completamente visibili i lati nord, ovest e sud; mentre il prospetto orientale è parzialmente coperto dall'adiacente struttura del cassero.

I recenti interventi di restauro hanno reso l'edificio praticabile nella parte interna. L'ingresso all'interno del CF 1 è consentito tramite una rampa di scale in pietre e laterizi di probabile epoca sette-ottocentesca, che si addossa alla parete settentrionale dell'edificio. La scala conduce ad un'apertura situata a circa 5 m di altezza rispetto all'attuale livello del terreno. La porta, che si apre alla base per circa 0.55 m e presenta un'altezza di 2.10 m, è costruita con pietre squadrate visibilmente logorate negli stipiti, sormontate da due mensole aggettanti, che sorreggono l'architrave sul quale si imposta un arco a sesto acuto.

Un'ulteriore apertura è localizzata sul lato meridionale della torre, a circa 10 m dall'attuale livello del suolo. Gli stipiti dell'apertura sono costruiti con pietre lavorate, sui quali si impostano due mensole ed un architrave. Un'altra apertura si doveva trovare, approssimativamente alla stessa altezza, anche sul lato orientale. Dall'esame del paramento murario interno, difatti, è possibile individuare un taglio in questo punto, che sembra aver subito, in una fase successiva, una parziale tamponatura. Non è stato possibile analizzare con precisione il paramento murario esterno alla stessa altezza, a causa dell'estrema vicinanza della struttura muraria del cassero, che si imposta direttamente sulla torre. Tuttavia, sembrerebbe possibile individuare anche qui un taglio nel paramento murario e una successiva tamponatura con la quale è stata creata l'apertura oggi presente.

Le pareti interne presentano delle mensole in pietra, dislocate sui quattro angoli, sulle quali si dovevano impostare delle strutture in legno, quali palchi, che suddividevano in vari livelli la torre. Il CF 1 termina con una merlatura, riferibile ad una delle fasi costruttive più recenti (fig. 53).



fig. 53 - La torre del castello, CF 1. Veduta della parte settentrionale del corpo di fabbrica.

- *Fase 1: il rilievo fotografico*

Anche in questo caso l'ubicazione del corpo di fabbrica, ma soprattutto la sua estensione in verticale sono stati parametri vincolanti degli esiti della sperimentazione.

Tentativi di acquisizione fotografica sono stati svolti su tutti e quattro i

prospetti della torre. Il paramento meridionale, visibile dall'interno dell'attiguo cassero è rilevabile con la massima distanza di presa raggiungibile di circa 15 m fino ad un'altezza di circa 20 m con

fotocamera:	Canon EOS 600D
ottica:	fissa
lunghezza focale:	20 mm
distanza di presa:	6 m
immagini n.:	38

l'adozione dell'ottica da 20 mm per la fotocamera e collegando quest'ultima all'asta topografica nella sua massima estensione di 4 m. Il paramento occidentale si posiziona quasi al limite del promontorio sommitale della collina e la superficie antistante si contraddistingue per una notevole pendenza fin quasi a ricongiungersi con la sottostante porzione del circuito murario castellano; caratteristiche che limitano fortemente una corretta acquisizione dei fotogrammi con la strumentazione in dotazione. La muratura orientale è più accessibile dal punto di vista delle inquadrature fotografiche, unico limite permane la notevole altezza del manufatto. Analogo problema si è presentato per quanto riguarda il rilievo del prospetto settentrionale, dove a vantaggio delle possibilità di manovra dell'operatore si è comunque rivelata piuttosto insufficiente la strumentazione di supporto alla ripresa fotografica per un'idonea inquadratura delle porzioni di soggetto comprese tra i 20 m ed i 30 m di altezza. Nei paragrafi seguenti, ad esemplificazione del lavoro svolto su questa tipologia architettonica, vengono proposti i dati relativi alla parete settentrionale.

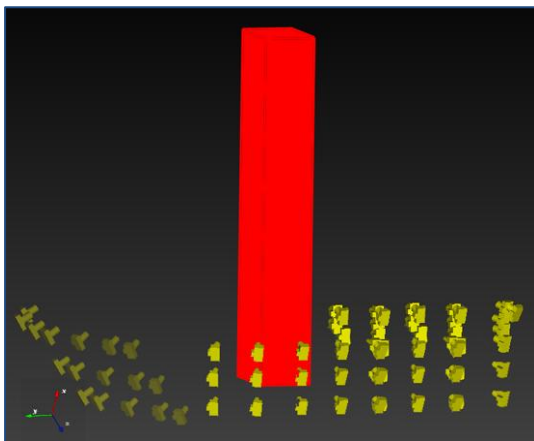


fig. 54 - CF 1, schematizzazione delle stazioni di ripresa fotografica.

Il rilievo della porzione nord della torre è stato effettuato registrando 38 immagini, valutando gli idonei margini di sovrapposizione ad una distanza di circa sei metri e cercando di rispettare un andamento semicircolare rispetto alla superficie in esame, una distanza tra una stazione di ripresa e la successiva di circa 1 m e sviluppando il rilievo su 4 strisciate di immagine a circa 1.5 m, 3 m, 4 m e l'ultima pur sempre a 4 m di altezza dal suolo ma con un ingente fattore di inclinazione, necessario alla completa copertura fotografica della struttura in elevato (fig. 54).

➤ *Fase 2: generazione della nuvola di punti*

Ai fini della creazione del modello tridimensionale sono state svolte le ormai consuete operazioni di generazione<sup>51</sup> della nuvola di punti, contestuale alla georeferenziazione tramite la messa in scala del modello sulla base di una misura di riferimento, attività seguita dall'intervento di pulizia degli elementi superflui. Sebbene le condizioni di ripresa fotografica non siano state effettuate completamente secondo i canoni

points cloud:	429996
tie points:	17607
reconstruction step:	10

<sup>51</sup> Bundle Process Time: 00:04:44  
 Match Feature Process Time: 00:01:10  
 Find Feature Process Time: 00:01:27  
 Reconstruction process: 00:54:46





fig. 55 - CF 1, modello tridimensionale del prospetto settentrionale definito tramite Z-Map.

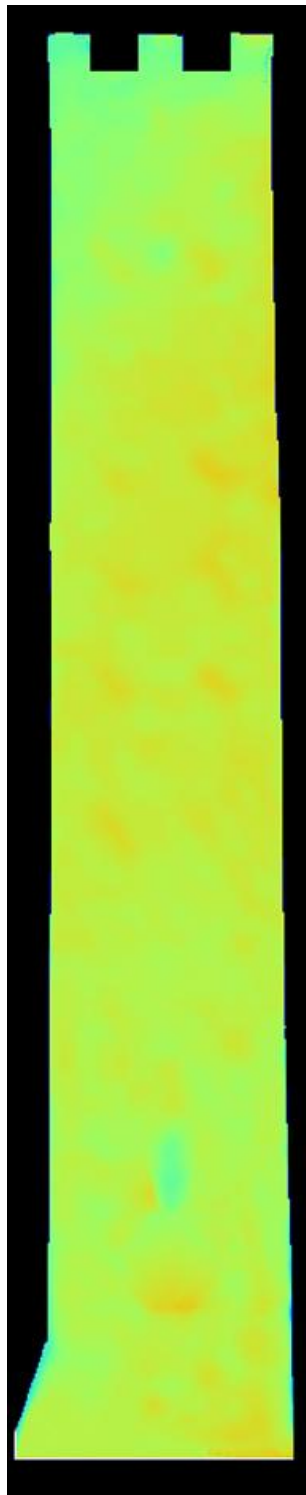


fig. 56 - CF 1, DEM del prospetto settentrionale generato tramite Z-Map.

prestabiliti dagli sviluppatori del sistema *Z-Scan EVO*, si deve comunque registrare il risultato positivo del software nella fase di processamento della nuvola sulla base di questa tipologia di dati immessi. *U-Map* è stato comunque in grado di definire una corretta restituzione tridimensionale del corpo di fabbrica rispettando il dato geometrico reale, malgrado una scarsità di dati, ossia una nuvola di punti piuttosto rada, per la porzione sommitale della torre (fig. 55).

➤ *Fase 3: realizzazione del DEM*

Sulla base dei dati provenienti dalla nuvola attraverso l'impiego di *Z-Map laser* è stato prodotto un DEM della parete settentrionale con un passo di risoluzione congruo al grado di definizione raggiunto dalla nuvola 3D. Risultato comunque sufficiente per il passaggio successivo (fig. 56).

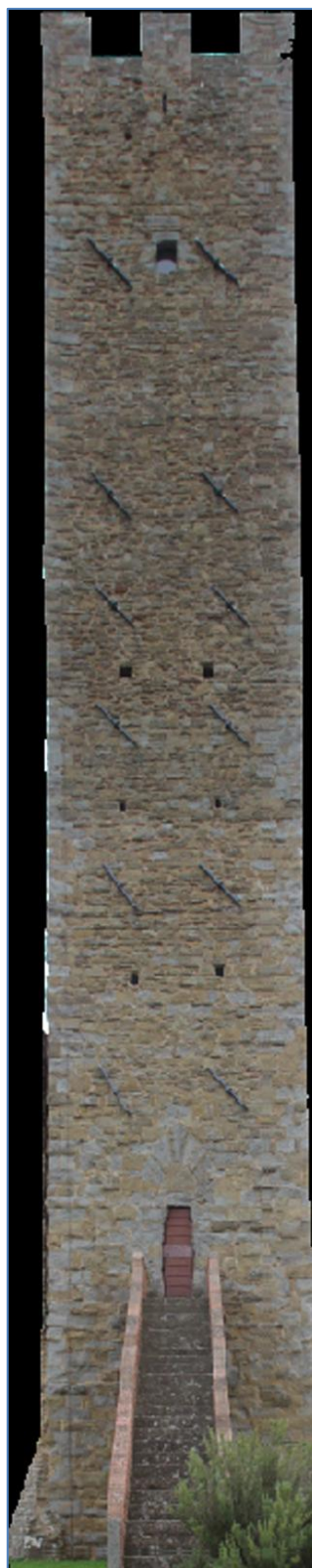
<i>triangolazione:</i>		
fattore Alpha		<b>10</b>
tolleranza (ud)		<b>0.2</b>
<i>DEM:</i>		
passo (ud)		<b>0.05</b>

➤ *Fase 4: sviluppo dell'ortofoto e dell'ortomosaico*

Nel corso della generazione delle ortofoto, determinate sulla base del DEM creato, sono riemersi i limiti di definizione

fotografica degli scatti dedicati alla porzione sommitale della torre nell'intervallo in elevato tra i 20 m ed i 30 m. La risoluzione raggiunta dai fotogrammi della parte alta della muratura determina una bassa qualità del dato fotografico ortorettificato. Tuttavia, si deve pur sempre sottolineare il

fig. 57 - CF 1, ortofotomosaico del prospetto settentrionale creato tramite Z-Map.



mantenimento di una accettabile dato geometrico ed un conseguente rispetto e possibilità di sfruttamento dell'informazione metrica (fig. 57).

<i>triangolazione:</i>	
dimensione pixel a terra	0.01 m
<i>mosaico:</i>	
numero di ortofoto in mosaico	4

- PROGETTO 4: CMW - la cinta muraria, tratto occidentale

➤ *La struttura architettonica:*

L'attuale aspetto della cinta muraria del castello di Montecchio è il risultato di diversi interventi susseguitisi nel corso della sua lunga storia. In particolare, nei secoli più recenti risultano evidenti gli interventi per la costruzione della merlatura che sappiamo essere stata realizzata, lungo tutto il perimetro murario da Giacomo Servadio, proprietario del castello a partire dal 1872 fino all'ultimo decennio dello stesso secolo; inoltre, sono ancora ben evidenti i segni dei restauri della soprintendenza promossi alla fine del secolo scorso, identificabili sulla base della documentazione fotografica e dei chiari orizzonti individuabili nella muratura; nonché, le evidenze dei restauri più recenti, caratterizzati dall'uso del cemento.

Il circuito castellano, dal perimetro di circa 265 m, è costituito da murature dallo spessore molto variabile, dai 0.70 m nel tratto sud-occidentale ai quasi 2.00 m nel tratto sud-orientale.

A distanza regolare si trovano attualmente le otto torri perimetrali, ma, come si è già indicato in precedenza, si può ipotizzare la presenza, in passato, di una nona torre tra l'attuale settima ed ottava, in quanto la distanza tra queste è esattamente doppia rispetto a quella intercorrente tra le altre. Tale tipologia di torre si è visto che è definita scudata, ossia a base quadrata ma priva del lato interno, sporgente dalle mura verso l'esterno ed allineata con questo nella parte interna. Il camminamento di ronda, che doveva essere continuo lungo tutto il perimetro, attraversava ciascuna torre per mezzo di aperture. Infatti, è possibile vedere alcune buche funzionali alloggio di travi che dovevano sostenere i palchi in legno posti in prossimità delle aperture, le quali collegavano le torri ai camminamenti.

Come superficie di verifica sperimentale è stata presa in esame la porzione occidentale delle mura, indicativamente il tratto compreso tra la porta di accesso e l'ottava torre verso nord. Quest'ultima, nella parte interna è, stata tamponata per ricavarvi quello che divenne durante l'epoca moderna il campanile della chiesa di San Biagio, edificio ecclesiastico presente all'interno del castello almeno a partire dal XIII secolo. Anche il tratto di mura interessato dal rilievo presenta una serie di rifacimenti. All'esterno, fino ad un'altezza di circa 5 m la muratura sembrerebbe appartenere alla fase più antica mentre la parte sovrastante è stata interamente ricostruita per la creazione di alcune abitazioni, sormontate

dalla merlatura attribuibile a Servadio. Nel lato interno sono visibili consistenti tracce delle abitazioni poste lungo la parete. Si possono infatti notare gli innesti dei setti murari delle pareti laterali delle abitazioni, che qui legano con la muratura della cinta. Dato, quest'ultimo, che porta ad ipotizzare un abbattimento o un crollo del tratto di muratura in esame; porzione

muraria che in un secondo momento è stata ricostruita interamente per la realizzazione di una serie di case (fig. 58).

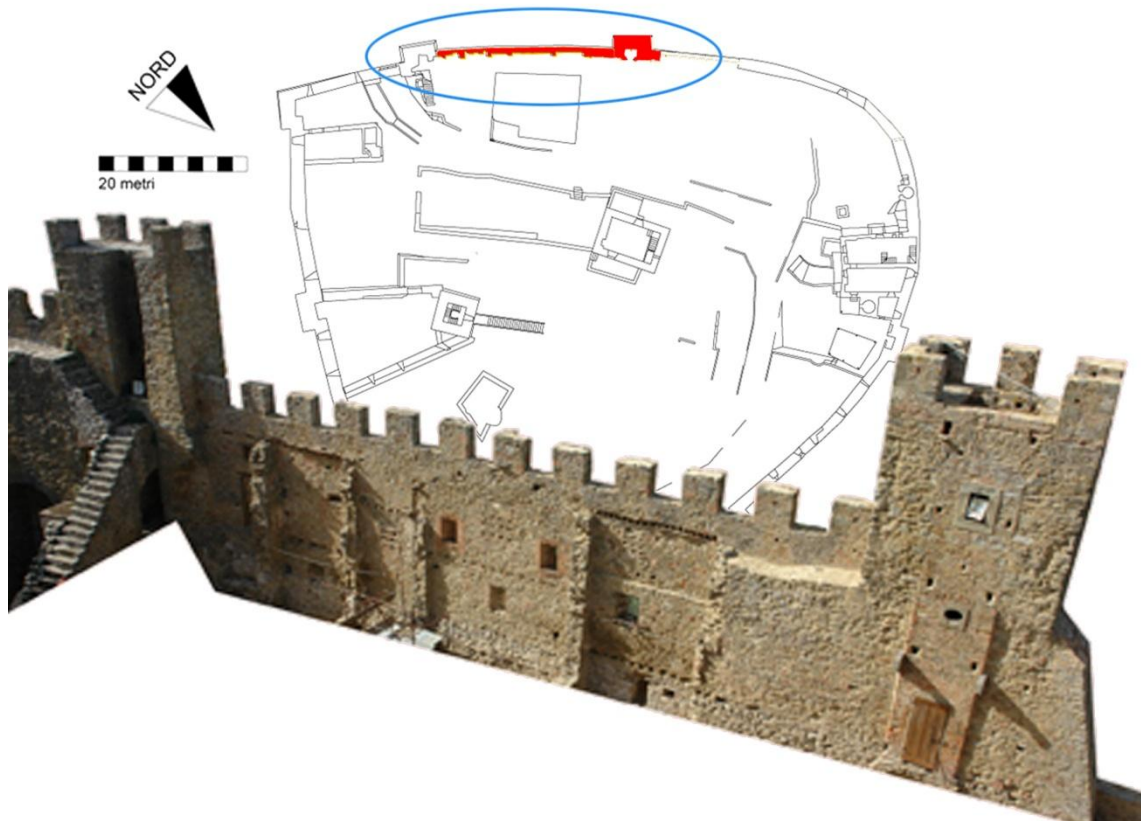


fig. 58 - La porzione occidentale del recinto castellano presa in esame.

### *Fase 1: il rilievo fotografico*

È stato preso in esame il tratto occidentale del recinto castellano, la porzione di mura comprese tra la porta di accesso al castello e la torre perimetrale rompitratta posta immediatamente a nord.

A livello geometrico si tratta di una parete architettonica complessa, caratterizzata dalla presenza di numerose parti aggettanti e vuoti; elementi riconoscibili come aperture e resti di strutture murarie di edifici. Quest'ultimi costruiti in continuità architettonica con la cinta muraria nel corso dell'epoca moderna.

L'attività di acquisizione fotografica è stata resa ulteriormente difficoltosa dalla presenza a ridosso della muratura dell'area archeologica e dell'ancora attivo cantiere di restauro e di conservazione delle evidenze archeologiche. Nello specifico, il primo tratto di mura analizzato, una porzione con andamento nord-sud e con un'estensione approssimativa di circa 20 m a partire dalla porta di accesso al castello, mostrava una limitata superficie di manovra nella parte antistante il paramento murario interno, con un minimo spazio dal soggetto, che ne consentiva una corretta inquadratura variabile dai 2 ai 5 m, rispetto ad un'altezza media della struttura di circa 6.80 m. Il secondo tratto

indagato, corrispondente all'ottava torre rompitratta del circuito, al contrario non consentiva un rilievo ravvicinato della parete a causa delle profonde variazioni di quota del piano di calpestio determinate dai precedenti scavi archeologici.

In conseguenza di queste condizioni, è stato deciso di adottare due

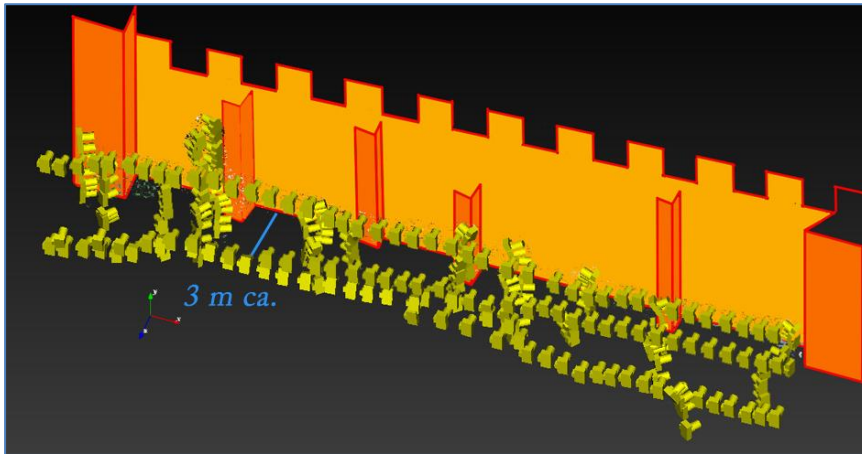


fig. 59 - CF-W, prima porzione (a), schematizzazione delle stazioni di ripresa fotografica.

1.5 m, 3 m e 4 m; ponendo particolare cura della ripresa delle parti aggettanti, seguendone la geometria ed il profilo. In totale sono state registrate 243 immagini, intervallate ad una distanza approssimativa di circa 1.5 m (fig. 59).

Il tratto caratterizzato dalla torre perimetrale è stato rilevato da una notevole distanza, circa 18 m, ma si trattava dell'unico stazionamento idoneo ad una sufficientemente corretta inquadratura del soggetto, unitamente alla possibilità di cambiamento di prospettiva ed idonea sovrapposibilità degli scatti. Riuscendo ad inquadrare il soggetto in un'unica fotografia si è rivelata soddisfacente l'acquisizione di 5 immagini (fig. 60).

fotocamera:	Canon EOS 600D
ottica:	fissa
lunghezza focale:	20 mm
distanza di presa:	18 m
immagini n.:	5

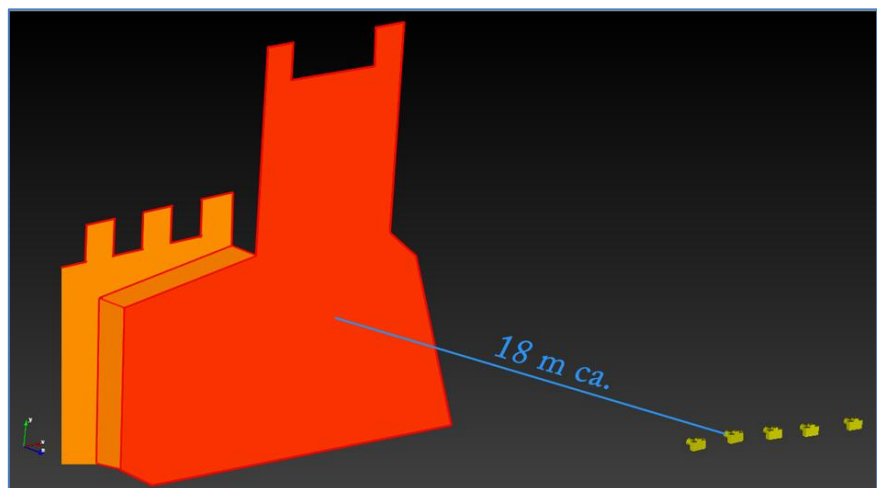


fig. 60 - CF-W, seconda porzione (b), schematizzazione delle stazioni di ripresa fotografica.

fotocamera:	Canon EOS 600D
ottica:	fissa
lunghezza focale:	20 mm
distanza di presa:	3 m
immagini n.:	243

distinti interventi di rilievo fotografico.

Le immagini della prima porzione (a) di parete sono state così acquisite ad una distanza media di circa 3 m, effettuando 3 strisciate di fotogrammi alle altezze di

## Fase 2: generazione della nuvola di punti



fig. 61 - CFW, modello tridimensionale del prospetto murario definito tramite Z-Map.

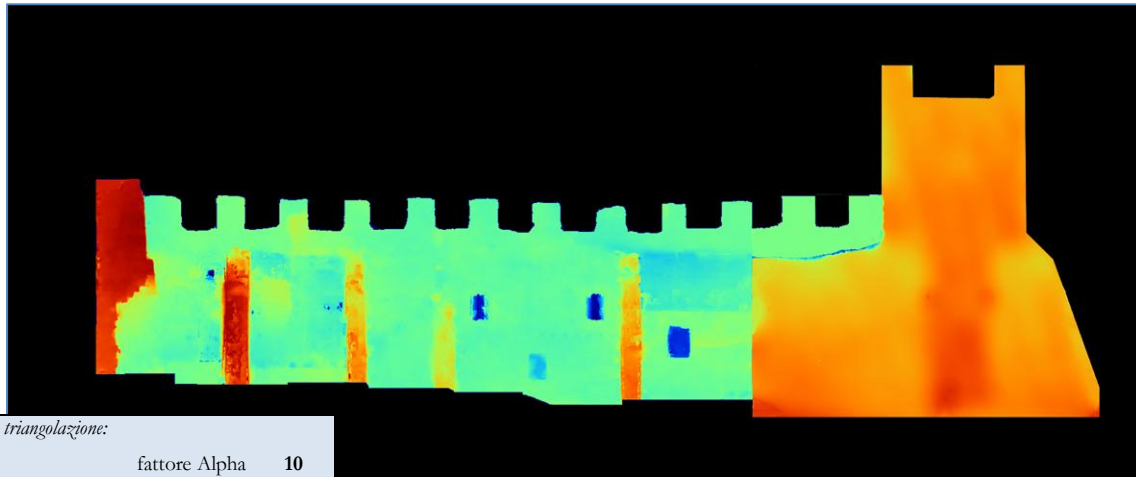
Il processamento delle 243 immagini relative alla prima porzione del tratto occidentale delle mura ha determinato la generazione di un modello tridimensionale ad alta definizione e con un elevato valore di dettaglio<sup>52</sup>. Al contrario, i limiti operativi concessi per le riprese fotografiche della torre hanno determinato il processamento di poche immagini e la creazione di una nuvola di punti meno raffinata<sup>53</sup> ma pur sempre valida da un punto di vista geometrico. I dati tridimensionali sono stati spazialmente referenziati tramite l'importazione di 34 GCP. Le due nuvole sono state correttamente georeferenziate ed unite (fig. 61) all'interno di un unico spazio di lavoro tridimensionale.

## Fase 3: realizzazione del DEM

Una volta emendate dagli elementi di disturbo, le due nuvole sono state utilizzate per la generazione di due DEM, per i quali è stato scelto un passo di costruzione basandosi sulla conformazione della nuvola meno prestante in modo da creare una similarità del livello di informazione ottenuto. In seguito i due dati raster sono stati uniti in un unico modello di elevazione (fig. 62).

<sup>52</sup> Bundle Process Time: 04:17:41  
 Match Feature Process Time: 00:53:52  
 Find Feature Process Time: 00:10:36  
 Reconstruction process: 01:49:39

<sup>53</sup> Bundle Process Time: 00:00:25  
 Match Feature Process Time: 00:00:02  
 Find Feature Process Time: 00:00:11  
 Reconstruction process: 00:04:54



<i>triangolazione:</i>	
fattore Alpha	10
tolleranza (ud)	0.2
<i>DEM:</i>	
passo (ud)	0.05

fig. 62 - CF W, DEM del prospetto murario generato tramite Z-Map.

#### *Fase 4: sviluppo dell'ortofoto e dell'ortomosaico*

Anche in questo caso, il DEM è stato utilizzato come supporto per la generazione delle ortofoto. L'alto livello analitico del procedimento di acquisizione dei fotogrammi del primo tratto di muratura in esame ha determinato la necessità di creare 46 ortofoto per ottenere una copertura completa della struttura. Le immagini ortorettificate sono state poi unite in un unico ortomosaico (fig. 63).



fig. 63 - CF W, ortofotomosaico del prospetto murario creato tramite Z-Map.

#### IV. I risultati: i modelli tridimensionali tra analisi, conoscenza e comunicazione

L'esperienza operativa maturata attraverso l'utilizzo del sistema di rilievo fotogrammetrico *Z-Scan EVO* ha consentito di ottenere ottimi risultati in termini di valutazione del potenziale applicativo dello strumento e, contestualmente, per quanto riguarda le personali competenze maturate.

La varietà dei soggetti architettonici selezionati per la sperimentazione ha permesso di osservare una casistica piuttosto ampia e geometricamente eterogenea nell'ambito delle evidenze archeologiche in elevato, la cui analisi ha consentito di apprezzare pregi e limiti della strumentazione.

L'esercitazione svolta sui corpi di fabbrica del contesto archeologico di Montecchio Vesponi ha potuto far apprezzare la funzionalità del sistema come vettore di trattamento delle immagini digitali per la restituzione di rilievi fotogrammetrici di precisione rispetto a tecnologie informatiche basate su restituzioni fotogrammetriche bidimensionali<sup>54</sup>.

La versatilità applicativa di *Z-Scan EVO* è una delle caratteristiche maggiormente apprezzabili della strumentazione. È stato possibile ottenere ottimi risultati di acquisizione delle informazioni su differenti tipologie di soggetto: nell'ambito delle architetture, una volta conseguite le necessarie competenze di utilizzo, si è stati in grado di operare sia su strutture di ridotte dimensioni, come ad esempio su limitate porzioni di superfici murarie, sia su corpi di fabbrica di elevata estensione verticale ed autonomia dello sviluppo architettonico, come nel caso della casa-torre del castello dove il dispositivo ha permesso l'acquisizione tridimensionale di gran parte del fabbricato. Ulteriore risultato da menzionare è l'estrema praticità di registrazione delle informazioni geometriche legate alle parti aggettanti o introflesse di una muratura, come nel caso della parete del recinto castellano.

La strumentazione in dotazione, costituita dall'asta topografica, il tablet e il funzionale software di cattura delle immagini *EVO Capture*, offrono maggiori possibilità di acquisizione dei dati. Lo strumento fotografico è facilmente utilizzabile anche a quote elevate rispetto alla consueta altezza dell'operatore senza necessità di supporti aggiuntivi o particolari accorgimenti nella scelta delle stazioni di ripresa fotografica.

---

<sup>54</sup> Si fa riferimento qui alle tecniche di restituzione fotogrammetrica basate su trasformazioni geometriche proiettive o differenziali a partire dalla conoscenza di almeno quattro punti di appoggio o due misure lineari, le quali consentono il raddrizzamento della ripresa fotografica.

Più in generale, il processo di acquisizione dei dati si caratterizza per una notevole duttilità: l'indipendenza dell'operatore nel corso delle fasi di rilievo e l'apparecchiatura piuttosto maneggevole determinano una discreta semplicità di utilizzo, facilmente adattabile alla tipologia di soggetto da analizzare ed alle necessità del risultato che si vuole ottenere. Il differente grado di analiticità che vuole essere raggiunto determina la variazione dei tempi del rilievo fotografico, il grado di accuratezza e la meticolosità delle singole operazioni. Validi esempi di questo fattore sono il rilievo della casa-torre di Montecchio, dove l'intera struttura è stata analizzata attraverso l'acquisizione di 63 fotogrammi ottenendo un discreto risultato<sup>55</sup>, ampiamente usufruibile per successive elaborazioni, e il caso della porzione di circuito murario dove è stato effettuato l'esperimento di un intervento maggiormente dettagliato: 243 immagini rilevate ad una distanza di circa 3 m con un ottica fissa di 20 mm; una volta acquisite le immagini, è stato possibile realizzare un modello tridimensionale con una risoluzione a terra approssimativa di 0.002 m.

A partire dai tempi necessari all'acquisizione dei fotogrammi necessari alle successive elaborazioni, l'utilizzo di *Z-Scan EVO* si è rivelato migliore rispetto sia alle tecniche di rilievo diretto tradizionale che all'applicazione delle procedure di raddrizzamento delle immagini bidimensionali.

Oltre ai tempi ovviamente non paragonabili, il rilievo manuale diretto viene effettuato attraverso una selezione delle informazioni da registrare e l'informazione ottenuta, pur sempre metrica, è fortemente limitata rispetto al livello di informazioni qualitative ottenibili da una immagine.

Rispetto alle esperienze maturate nel corso delle ricerche in esame, il livello di precisione e di accuratezza ottenibile con l'impiego di *Z-Scan EVO* si è rivelato superiore. Un confronto tra i dati ottenuti attraverso il raddrizzamento delle immagini, anche in casi in cui i punti di appoggio necessari alle trasformazioni erano stati acquisiti tramite strumentazione ad alta precisione, ed i risultati prodotti con le procedure di elaborazione indicate dalla Menci Software ha mostrato una maggiore aderenza alla realtà dal punto di vista metrico. Inoltre, le stesse fasi di post-processamento dei dati, a parità di complessità applicativa, sono da considerarsi mediamente più rapide e contraddistinte da un proprio livello informativo.

Il risultato finale ottenibile è un modello tridimensionale completo, dotato di un alto grado di precisione geometrica. Una nuvola di punti che sin dall'inizio si caratterizza per un'elevata fedeltà cromatica. Prodotti che possono trovare ampie possibilità di utilizzo che vanno dalla rappresentazione 3D dell'oggetto alla generazione di DEM, tramite i quali ottenere ortofoto e, da quest'ultime, ortofotomosaici; materiale di base per potenziali analisi e verifiche dimensionali, nonché supporti per la restituzione di un disegno metrico vettoriale (*fig. 64*).

---

<sup>55</sup> Con una distanza di presa media di 5 m la nuvola di punti ottenuta ha una risoluzione a terra di circa 0.01 m.



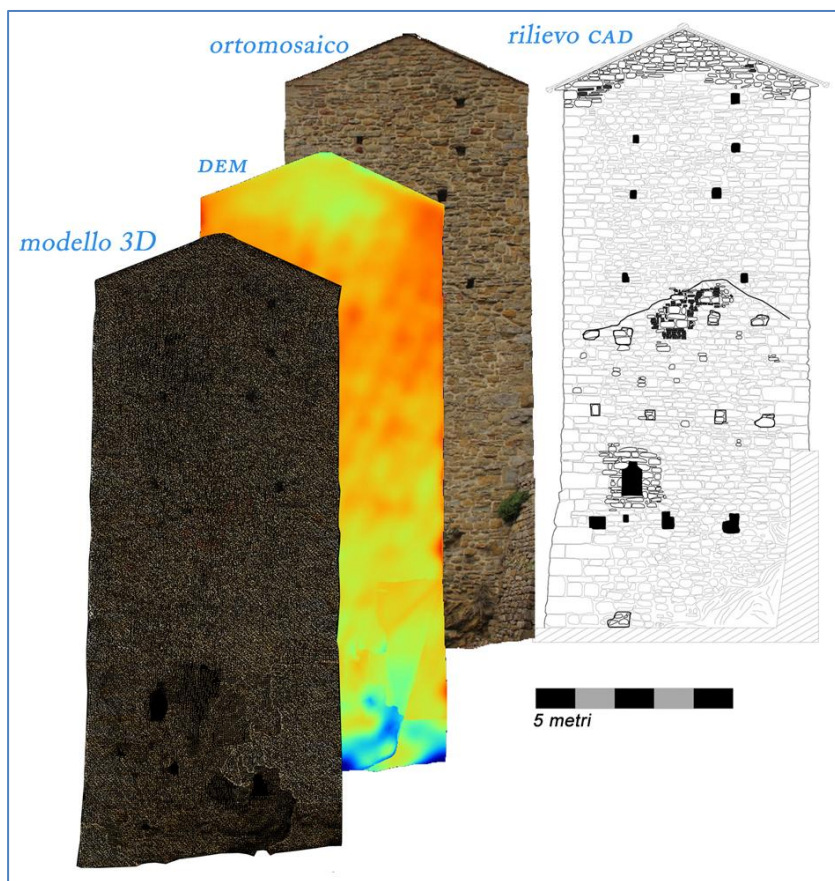


fig. 64 - schema esemplificativo del processo di analisi di un paramento murario corpo di fabbrica.

In quanto ai limiti dell'applicazione del sistema si deve sottolineare la dipendenza delle riprese fotografiche dalle condizioni atmosferiche: ai fini di un corretto processamento, i fotogrammi devono essere catturati in condizioni ambientali con un livello di luminosità idoneo alla restituzione fotografica e soprattutto in situazioni di omogeneità dell'intensità della luce. Durante un rilievo, una luminosità scarsa ovvero un eccessivo fattore di riflessione della luce dal soggetto, determinando una pessima

qualità dell'immagine, producono di conseguenza un esito negativo nel tentativo di realizzazione di un modello tridimensionale. Evento analogo, e forse ancor più incidente sugli esiti finali, è l'esecuzione di una ripresa fotografica in condizione di alta variabilità della luce: le immagini, anche se registrate con un idoneo fattore di sovrapposizione, se caratterizzate da fattori di esposizione particolarmente divergenti, non riescono ad essere poste in relazione dal software di elaborazione.

Altro elemento restrittivo rispetto all'uso di *Z-Scan EVO* è il fattore di elevazione dei soggetti da rilevare. Sebbene dipendente dalla strumentazione adottata e dalle condizioni dell'area di indagine, in base all'apparecchiatura in utilizzo, un'asta topografica di 4 m di estensione massima ed un'ottica fotografica fissa di 20 mm, è stato possibile valutare che una corretta acquisizione delle immagini avviene fino ad un'altezza compresa tra i 15 m ed i 20 m<sup>56</sup>. L'informazione colorimetrica e la definizione dell'immagine ortorettificata in seguito ottenibile risulta piuttosto carente, sebbene il software *U-Map* sia comunque in grado di generare modelli tridimensionali anche da immagini dotate di una forte inclinazione del punto di vista e mantenere così un sufficientemente corretto dato geometrico anche ad una certa distanza tra il punto di presa ed il soggetto<sup>57</sup>. Ovviamente è

<sup>56</sup> Caso esemplare è l'esperienza effettuata sulla torre sommitale del castello di Montecchio.

<sup>57</sup> La ripresa fotografica dell'ottava torre perimetrale del recinto castellano da una distanza di circa 18 m e la successiva elaborazione del modello tridimensionale, attraverso l'utilizzo di 5 fotogrammi con un fattore di inclinazione tendente il

plausibile ritenere di risolvere tale problematicità adottando strumenti accessori più adatti ed agevolando le riprese con mezzi specifici.

#### *IV.1 Dal processamento della nuvola di punti alla storia delle evidenze materiali*

La realizzazione di un modello tridimensionale di un'evidenza architettonica si è rivelata una possibilità estremamente utile ai fini dello studio e dell'analisi del manufatto dal punto di vista della sua architettura e della sua storia. Quello che è possibile ottenere è una nuvola di punti continua, dotata di un elevato fattore di precisione metrica e geometrica, realizzabile con poco dispendio di tempo, in agevolezza ed economia.

*Z-Scan EVO* permette un'acquisizione tridimensionale della realtà, attraverso la registrazione contestuale del dato geometrico e fotografico. Attraverso un'unica procedura è possibile creare una base di dati usufruibile come documento di archivio, strumento di conoscenza ed analisi, prodotto di valorizzazione e comunicazione.

L'estrazione di una ortofoto da una nuvola di punti può permettere un'analisi di un manufatto parzialmente inferiore soltanto a quella di un esame autoptico, ma con enormi vantaggi dal punto di vista realizzativo e dalla possibilità di registrazione delle informazioni individuate.

Da un ortofoto è possibile produrre un disegno geometrico bidimensionale con possibilità di dettaglio ed accuratezza raggiungibile con poche altre metodologie, ma con enormi vantaggi in fatto di praticità e produzione.

Un modello tridimensionale può essere facilmente impiegato come elemento di conoscenza e divulgazione: una rappresentazione del tutto simile alla realtà spaziale che ci circonda agevola enormemente la comprensione di un oggetto, di un manufatto, la sua storia, le sue trasformazioni; apre la strada della comprensione ad un contesto più ampio, permette di far conoscere i risultati di determinate attività, talvolta ritenute marginali piuttosto che inutili, come l'operato dell'archeologo, anche ad un pubblico di non addetti ai lavori.

---

più possibile alla condizione di perpendicolarità dal soggetto, ha comunque permesso di ottenere un modello tridimensionale corretto dal punto di vista geometrico e sufficiente per quanto riguarda i successivi processi di creazione dell'ortofoto.

## Bibliografia

- BARKER PH., 2003, *Tecniche dello scavo archeologico*, Milano.
- BEZOARI G., MONTI C., SELVINI A., 1992, *La fotogrammetria per l'architettura*, Napoli.
- BIANCHI G., 1995, *L'analisi dell'evoluzione di un sapere tecnico, per una rinnovata interpretazione dell'assetto abitativo e delle strutture edilizie del villaggio fortificato di Rocca S. Silvestro*, in FRANCOVICH R., BOLDRINI E. (a cura di), *Acculturamenti e mutamenti. Prospettive nell'archeologia medievale del Mediterraneo*, pp. 361 – 396, Firenze.
- BIANCHI G., 1996, *Trasmissione dei saperi tecnici e analisi dei procedimenti costruttivi*, in «*Archeologia dell'Architettura*», I, pp. 53 – 65.
- BIANCHI G., 1997, *Rocca S. Silvestro e Campiglia Marittima: storia parallela di due insediamenti toscani attraverso la lettura delle strutture murarie*, in GELICHI S. (a cura di), *Atti del I Congresso Nazionale di Archeologia Medievale. Auditorium del Centro Studi della Cassa di Risparmio di Pisa (Pisa, 29 – 31 maggio 1997)*, pp. 437 – 444, Firenze.
- BIANCHI G., 2003, *Archeologia dell'architettura nei castelli della Toscana sud – occidentale (Val di Cornia – Bassa Val di Cecina. Sec. IX – XII)*, in FIORILLO R., PEDUTO P. (a cura di), *III Congresso Nazionale di Archeologia Medievale, Castello di Salerno, Complesso di Santa Sofia (Salerno, 2 – 5 ottobre 2003)*, pp. 567 – 575, Firenze.
- BIANCHINI M., 2008, *Manuale di rilievo e di documentazione digitale in archeologia*, Roma.
- BOATO A., 2008, *L'archeologia in architettura. Misurazioni, stratigrafie, datazioni, restauro*, Venezia.
- BROGIOLO G. B., 1988, *Archeologia dell'edilizia storica*, Como.
- BROGIOLO G. B., 1997, *Dall'analisi stratigrafica degli elevati all'Archeologia dell'Architettura*, in «*Archeologia dell'Architettura*», II, pp. 181 – 184.
- BROGIOLO G. B., 2002, *L'archeologia dell'architettura in Italia nell'ultimo quinquennio (1997-2001)*, in «*Archeologia de la Architectura*», I, pp. 19-26.

- CAGNANA A., 1994, *Archeologia della produzione tra tardo-antico e altomedioevo. Le tecniche murarie e l'organizzazione dei cantieri*, Atti del 4° seminario sul tardoantico e l'altomedioevo in Italia centro-settentrionale, Montebello-Galbiate (Lecco), 2-4 settembre 1993, pp. 39-53, Mantova.
- CAGNANA A., 1996, *L'esperienza ligure dell'analisi archeologica delle strutture murarie*, in DELLA TORRE S. (a cura di), *Storia delle tecniche murarie e tutela del costruito. Esperienze e questioni di metodo*, pp. 159-170, Milano.
- CAGNANA A., 1997, *La transizione al Medioevo attraverso la storia delle tecniche murarie: dall'analisi di un territorio ad un problema sovregionale*, in GELICHI S. (a cura di), *I Congresso Nazionale di Archeologia Medievale*, pp. 445-448, Firenze.
- CAGNANA A., 2000, *Archeologia dei materiali da costruzione*, Mantova.
- CAIROLI GIULIANI F., 2008, *prefazione*, in BIANCHINI M., 2008, *Manuale di rilievo e di documentazione digitale in archeologia*, Roma.
- CALDARELLI D., 2011, *ZScan EVO: uno strumento innovativo per il rilievo 3D in archeologia*, elaborato finale, Master Universitario di II livello in Sistemi Informatici Territoriali e Telerilevamento (SITT), Università degli Studi di Siena, Centro di Geotecnologie di San Giovanni Valdarno.
- CARANDINI A., 2000, *Storie dalla terra. Manuale di scavo archeologico*, Torino.
- CALDARELLI D., CANTINI F., CECCARONI F., FATIGHENTI B., 2012, *Nuove tecnologie per il rilievo speditivo tridimensionale in archeologia: il caso di San Genesio*, in «*Archeomatica*», n.2, Giugno 2012, pp. 16-20.
- CAMIN L., 2009, *Tecnologie informatiche per la conoscenza e la comunicazione di Lucca Romana*, Tesi di Dottorato in Tecnologie e Management dei Beni Culturali, XXI ciclo, IMT Institute for Advanced Studies, Lucca, pp. 99-109.
- CAMIN *et al.*, 2010, CAMIN L., CARROZZINO M., LEONARDI R., NEGRI A., *Nuove Tecnologie per la conoscenza e la comunicazione di Lucca romana*, in «*Archeologia e Calcolatori*», 21, pp. 49-73.
- CARLINO A., *Valle dei templi: dalla nascita dell'archeologia al laser scanner 3D*, in «*Geomedia*», speciale 2007, pp. 24-26.
- CASELLA *et al.*, 2006, CASELLA V., FRANZINI M., MENCI L., CECCARONI F., *Gestione delle strisciate della camera ADS40 nella stazione digitale Menci Software ZMap*, in «*Archeomatica*», speciale, pp. 42-45.
- CECCARONI F., 2005, *Generazione di ortofoto ad alta risoluzione su scansione laser: il sistema Z-Map di Menci Software*, in «*Geomedia*», 1, pp.26-28.
- DI GRAZIA V., 1991, *Rilievo e disegno nell'archeologia e nell'architettura. Tecniche, Opinioni e Teorie*, Roma.
- DE FELICE G., SIBILANO M.G., VOLPE G., *Esperienze di laser scanning su rivestimenti pavimentali e parietali: il caso della cenatio della villa di Faragola (Ascoli Satriano, FG)*, in ANGELELLI C., RINALDI F. (a cura

- di), *Atti del XIII Colloquio dell'Associazione Italiana per lo Studio e la Conservazione del Mosaico (AISCOM)*, Canosa di Puglia, 21-24 febbraio 2007, Tivoli, pp. 535-542.
- DOMINACI D., GRASSI S., RADICIONI F., 2000, *Utilizzo delle tecniche innovative di fotogrammetria digitale per il recupero e salvaguardia dei beni architettonici* in BINCI M., (a cura di), *Atti del Convegno "Politiche per la salvaguardia e il recupero dei Beni Architettonici, Documentazione e Rilievo"*, 23 giugno, Ancona, pp. 33-42.
- DUBBINI M., ZANUTTA A., *Fotogrammetria digitale e 3D laser scannino: una possibile integrazione tra i metodi di rilievo*, in *Atti della 6° Conferenza Nazionale ASITA*, (5-8 novembre), Vol. II, Perugia, pp. 1091-1098.
- D'ULZIA A., 2005, *L'archeologia dell'architettura in Italia. Sintesi e bilancio degli studi*, in «*Archeologia dell'architettura*», X, pp. 9-41.
- DOCCI M., MAESTRI D., 1984, *Il rilevamento architettonico. Storia, metodi e disegno*, Roma-Bari.
- EMMOLO D., 2003-2004, *Nuovi Sensori Digitali Aviotrasportati*, Tesi di Dottorato in Scienze Geodetiche e Topografiche, XIX ciclo, Università degli Studi di Napoli "Parthenope".
- FABRIS *et al.*, 2007, FABRIS M., ACHILLI V., BOATTO G., BRAGAGNOLO D., MENIN A., SALEMI G., *Analisi ed integrazione di differenti metodologie di rilievo, classiche, laser scannino e fotogrammetriche terrestri finalizzate al rilievo architettonico ad alta risoluzione*, in *Atti della 11° Conferenza Nazionale ASITA*, (6-9 novembre), Torino, pp. 1045-1050.
- FABRIS *et al.*, 2010, FABRIS M., ACHILLI V., BONARDI I., BRAGAGNOLO D., FAVARETTO S., FRASSINE M., GRASSI M.T., MENIN A., TARGA G., *Metodologie integrate per la georeferenziazione e rilievo 3D terrestri nell'antica città di Palmyra (Siria)*, in *Atti della 14° Conferenza Nazionale ASITA*, (9-12 novembre), Brescia, pp. 947-952.
- FEDELI L., MOLINARI A., GIOVANNINI F., MINI A., ORECCHIONI P., 2007, *Castiglion Fiorentino (AR). Castello di Montecchio Vesponi: campagna di scavo 2006*, in *Notiziario Toscana 2, 2006 [2007]*, pp. 174-176, Firenze.
- FERRANDO CABONA I., 1998, *Problemi di datazione in archeologia dell'architettura*, in «*Archeologia dell'Architettura*», III, pp. 75 – 79.
- FRANCOVICH R., PARENTI R. (a cura di), 1988, *Archeologia e restauro dei monumenti, I ciclo di lezioni sulla ricerca applicata in archeologia, Certosa di Pontignano (Siena), 28 settembre – 10 ottobre 1987*, Firenze.
- GABUCCI A., 2005, *Informatica applicata all'archeologia*, Roma.
- GIGLIOZZI G., 2003, *Introduzione all'uso del computer negli studi letterari*, Milano.
- GIOVANNINI F., 2005-2006, *Montecchio Vesponi: storia di un castello attraverso l'archeologia dell'architettura*, tesi di laurea in Archeologia Medievale, Università degli Studi di Siena, Facoltà di Lettere e Filosofia di Arezzo.

- GIOVANNINI F., 2010-2011, *Archeologia e storia di un castello della Val di Chiana. Montecchio Vesponi dal medioevo all'età contemporanea*, tesi di laurea in Archeologia Medievale, Università degli Studi di Siena, Facoltà di Lettere e Filosofia.
- GUIDI A., 1999, *I metodi della ricerca archeologica*, Roma.
- GIULIANI C. F., *Archeologia e documentazione grafica*, Roma 1976.
- HARRIS E. C., 2002, *Principi di stratigrafia archeologica*, Roma.
- ISABELLA L., SALZOTTI F., VALENTI M., 2001, *L'esperienza dell'insegnamento di Archeologia Medievale nel campo dell'informatica applicata*, in DE MARCHI M., SCUDELLARI M., ZAVAGLIA A., *Lo spessore storico in urbanistica*, Mantova, pp. 31-64.
- LA TROFA M. 2007-2008, *Produzione e consumo di vasellame ceramico nel territorio aretino nel medioevo: il caso del castello di Montecchio Vesponi (Ambiente D)*, tesi di laurea in Archeologia Medievale, Università degli Studi di Siena, Facoltà di Lettere e Filosofia di Arezzo.
- MANACORDA D., FRANCOVICH R., 2000, *Dizionario di archeologia*, Roma.
- MANNONI T., 1976, *L'analisi delle tecniche murarie in Liguria*, Atti del Colloquio Internazionale di archeologia medievale, Palermo-Erice, 20-22 settembre 1974, pp. 291-300, Palermo.
- MANNONI T., 1984, *Metodi di datazione dell'edilizia storica*, in «*Archeologia Medievale*», XI, pp. 396 – 401.
- MANNONI T., 1990, *La tecnica muraria preindustriale e la trasmissione del sapere empirico*, in BONAFEDE L., FACCIO P., *Tecnologia e tecnica delle murature antiche*, Atti del convegno, 24 novembre 1990, Sala della Guardia - Padova, pp. 6-10, Padova.
- MANNONI T., 1994, *Caratteri costruttivi dell'edilizia storica, venticinque anni di Archeologia globale*, Genova.
- MANNONI T., 1995, *Lo stato dell'archeologia del costruito in Italia. Prima parte*, in «*Notiziario di Archeologia medievale*», 66, pp. 25-27.
- MANNONI T., 1996, *Lo stato dell'archeologia del costruito in Italia. Seconda parte*, in «*Notiziario di Archeologia medievale*», 67, pp. 7-11.
- MANNONI T., 1997, *Il problema complesso delle murature storiche in pietra 1. Cultura materiale e cronotipologia*, in «*Archeologia dell'architettura*», II, pp. 15 – 24.
- MANNONI T., 1997a, *Lo stato dell'archeologia del costruito in Italia. Terza parte*, in «*Notiziario di Archeologia medievale*», 68, pp. 10-11.
- MANNONI T., 2005, *Archeologia della produzione architettonica. Le tecniche costruttive*, in «*Archeologia de la Architectura*», IV, pp. 11-22.
- MANNONI T., BOATO A., 2002, *Archeologia e storia del cantiere di costruzione*, in «*Archeologia de la Architectura*», I, pp. 39-53.

- MANNONI T., CRUSI E., 1989, *Analisi stratigrafica del costruito*, in AA.VV., *Restauro: la ricerca progettuale*, pp. 197-208, Padova.
- MANZETTI M. C., 2011, *La modellazione 3D applicata ai beni archeologici attraverso la fotogrammetria*, elaborato finale, Master Universitario di II livello in Geotecnologie per l'Archeologia (GTARC), Università degli Studi di Siena, Centro di Geotecnologie di San Giovanni Valdarno.
- MASCIONE C., 2006, *Il rilievo strumentale in archeologia*, Roma.
- MEDRI M., 2003, *Manuale di rilievo archeologico*, Roma-Bari.
- MENCI L., 2004, *ZMap: stazione digitale multisensore per una moderna produzione di dati cartografici*, in "Geomedia", Reports 4, pp. 26-29.
- MENCI L., CECCARONI F., 2003, *Fotogrammetria digitale*, in *Atti della 7ª Conferenza Nazionale ASITA*, (28-31 ottobre 2002), Verona.
- MENCI L., CECCARONI F., 2008, *Zscan: generazione di modelli 3D per la ricognizione metrica e radiometrica dei beni culturali tramite immagini*, in *TECHA 2008, Technologies exploitation for the cultural heritage Advancement*, pp. 88-89.
- MENCI *et al.*, 2007, Menci L., Nex F., Rinaudo F., *ZSCAN Menci Software: un nuovo strumento per le elaborazioni fotogrammetriche multi immagine*, in *Atti della 11ª Conferenza Nazionale ASITA*, (6-9 novembre), Torino.
- MIGLIARI R. (a cura di), 2001, *Frontiere del rilievo. Dalla matita alle scansioni 3D*, Roma.
- MINI A., 2005, *Le torri urbane di Arezzo*, in DE MINICIS E., GUIDONI E. (a cura di), *Case e torri medievali III, atti del IV convegno di studi "Case e torri medievali. Indagini sui centri dell'Italia comunale (secc. XI – XV) Piemonte, Liguria, Lombardia" (Viterbo – Vetralla, 29 – 30 aprile 2004)*, pp. 169 – 180, Roma.
- MINI A., 2008-2009, *Tecniche e tipi edilizi: per una storia urbana di Arezzo dall'antichità al medioevo attraverso l'archeologia dell'architettura*, tesi di dottorato di ricerca in archeologia medievale, XX ciclo.
- MINI A., PAMPALONI A., 2004, *Esperienze di archeologia dell'architettura nell'aretino: problemi di metodo e risultati preliminari*, in PAOLO TORRITI (a cura di), *Quaderni storico artistici, arte archeologia architettura storia*, pp. 21 – 43, Città di Castello.
- MOLINARI A., GIOVANNINI F., MINI A., ORECCHIONI P., 2008, *Castiglion Fiorentino (AR). Castello di Montecchio Vesponi: campagna di scavo 2007*, in *Notiziario della Soprintendenza Archeologica per la Toscana* 3, 2007 [2008], Firenze.
- MOLINARI A., GIOVANNINI F., MINI A., ORECCHIONI P., 2009, *Castiglion Fiorentino (AR). Castello di Montecchio Vesponi: campagna di scavo 2008*, in *Notiziario della Soprintendenza Archeologica per la Toscana* 4, 2008 [2009], Firenze.

- MOLINARI A., GIOVANNINI F., ORECCHIONI P., C.S.(a), *Castiglion Fiorentino (AR). Castello di Montecchio Vesponi: campagne di scavo 2009-2010*, in Notiziario della Soprintendenza Archeologica per la Toscana, Firenze.
- MOLINARI A., GIOVANNINI F., ORECCHIONI P., C.S.(b), *Per una storia dell'incastellamento in Valdichiana: lo scavo nel sito di Montecchio Vesponi (AR)*, in VI Congresso Nazionale di Archeologia Medievale.
- NUMERICO T., VESPIGNANI A. (a cura di), 2003, *Informatica per le scienze umanistiche*, Bologna.
- ORECCHIONI P. 2005-2006, *Il Castello di Montecchio Vesponi. Il sistema difensivo nel contesto territoriale della Valdichiana*, tesi di laurea in Archeologia Medievale, Università degli Studi di Siena, Facoltà di Lettere e Filosofia di Arezzo.
- ORECCHIONI P. 2010-2011, *Il Castello di Montecchio Vesponi. Ceramiche bassomedievali per una lettura archeologica di un insediamento del territorio aretino*, tesi di laurea in Archeologia Medievale, Università degli Studi di Siena, Facoltà di Lettere e Filosofia.
- PARENTI R., 1981, , *La scheda di Unità Stratigrafica Muraria*, in AA.VV., *Come l'archeologo opera sul campo*, Atti del Convegno (Siena, 1981), Firenze.
- PARENTI R., 1983, *Le strutture murarie: problemi di metodo e prospettive di ricerca*, in «Archeologia medievale», X, pp. 332-338.
- PARENTI R., 1985, *La lettura stratigrafica delle murature in contesti archeologici e di restauro architettonico*, in «Restauro e Città», 2, pp. 55-68.
- PARENTI R., 1988, *Sulle possibilità di datazione e di classificazione delle murature*, in FRANCOVICH R., PARENTI R. (a cura di), *Archeologia e restauro dei monumenti*, Firenze, pp. 280-304.
- PARENTI R., 1988a, *Le tecniche di documentazione per una lettura stratigrafica dell'elevato*, in FRANCOVICH R., PARENTI R.(a cura di), *Archeologia e restauro dei monumenti*, Firenze, pp. 249-279.
- PARENTI R., 2002, *Dalla stratigrafia all'archeologia dell'architettura. Alcune recenti esperienze del laboratorio senese*, in «Archeologia de la Architectura», I, pp. 73-82.
- PARENTI R., VECCHI A., GILENTO P., 2010, *Integrated system for the study and the management of the historical buildings*, in *Proceedings of the 38th Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, Granada, Spain, April 2010.
- PELOSO D., 2005, *Tecniche laser scanner per il rilievo dei beni culturali*, in “Archeologia e Calcolatori”, 16, pp. 177-197.
- PENNACCHIONI M., 2004, *Metodologie e tecniche del disegno archeologico*, Firenze.
- PERIPIMENO M., RILIEVO DI MONUMENTI E STRATIGRAFIE: L'USO DEL LASER SCANNER, in FRONZA V., NARDINI A., VALENTI M., *Informatica e Archeologia Medievale. L'esperienza senese*, Firenze, pp. 111-130.



- PERIPIMENO M., SALVADORI F., 2005, *Modellazione tridimensionale*, in FRANCOVICH R. e VALENTI M. (a cura di), *Archeologia dei Paesaggi Medievali. Relazione Progetto (2000- 2004)*, Siena, pp. 561-637.
- PERIPIMENO M., SALZOTTI F., 2006, *La stratigrafia archeologica dal rilievo per mezzo di tecniche laser scanning alla gestione 3D*, in *ambiente GIS*, Atti del 51° Convegno Nazionale SIFET, Castellaneta Marina, 14-16 giugno 2006, Taranto.
- PESCI *et al.* 2009, PESCI A., LODDO F., CASULA G., CECCARONI F., BIANCHINI D., BALDI P., MENCINI L., *An experiment for Zscan Efficiency in Surface Monitoring*, Rapporti tecnici INGV, anno 2009, 121.
- PICCARRETA F., 1992, *Fotogrammetria finalizzata all'archeologia: il contributo del calcolatore*, in *Archeologia e Calcolatori*, III, pp. 101-120.
- RENFREW C., BAHN P., 1995, *Archeologia. Teorie, metodi, pratica*, Bologna.
- ROMEO M. (a cura di), 2002, *Architettura digitale. Tecnologie ed applicazioni informatiche per l'architettura*, Facoltà di Architettura, Firenze.
- SAINT AUBIN J.P., 1999, *Il rilievo e la rappresentazione dell'architettura*, Bergamo.