



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SIENA



MASTER UNIVERSITARIO DI II LIVELLO IN
SISTEMI INFORMATIVI TERRITORIALI
E TELERILEVAMENTO(SITT)
ANNO ACCADEMICO 2010/2011

ZSCAN EVO: UNO STRUMENTO INNOVATIVO PER IL RILIEVO 3D IN ARCHEOLOGIA

Elaborato finale di:

DEBORA CALDARELLI

Novembre 2011

RIASSUNTO

Il progetto formativo portato avanti durante il periodo di stage presso Menci Software, azienda leader nella produzione di software per la fotogrammetria, si è posto come obiettivo primario la sperimentazione di *ZScan Evo*, nuova soluzione per la ricostruzione di modelli tridimensionali, in campo archeologico.

Dopo aver individuato ed analizzato da un lato il contesto scientifico in cui l'attività si inserisce e dall'altro la missione dell'azienda, l'attenzione si è spostata sullo studio e utilizzo di software per i processi fotogrammetrici tridimensionali ed evoluti. In particolare l'approccio a *ZScan* ha favorito la costruzione di una base critica da cui muovere per capire le potenzialità dello strumento successivamente testato.

ZScan Evo, infatti, si presenta come evoluzione del software precedente *ZScan*, di cui riprende sostanzialmente i principi fondamentali, ma da cui si distingue per una maggiore versatilità e facilità d'uso. La nuova soluzione prevede, infatti, la ricostruzione dei modelli tridimensionali non più a partire da triplette ma da blocchi di immagini digitali.

Il pacchetto software prevede l'utilizzo delle seguenti soluzioni:

EVO CAPTURE: è un software associato al tablet da utilizzare sul campo. Consente di visualizzare il *live view* della fotocamera e di memorizzare una serie di scatti a strisciate, verificando in tempo reale i requisiti minimi per l'utilizzo delle immagini acquisite.

EVO CHECK: software installato sul notebook o PC da campo, da utilizzare per la verifica preliminare della nuvola di punti ottenuta. Garantisce il corretto legame delle immagini catturate.

UMAP: è il software per il processamento e la ricostruzione di nuvole di punti RGB a densità parametrizzabile. *U-Map* consente la visione complessiva dei modelli 3D reciprocamente orientati. Ogni modello dispone di una texture ad alta definizione.

AFTERWORK: software di post produzione, che rielabora e semplifica i modelli 3D prodotti da *U-Map*. *AfterWork* è in grado di riconoscere ed eliminare automaticamente le zone di sovrapposizione tra i modelli e ne rende omogenee e bilanciate le texture. Con *AfterWork* è possibile esportare il risultato in un unico modello 3D comprensivo di texture.

Le numerose prove pratiche previste hanno avuto come fine la valutazione dell'efficacia del prodotto e la determinazione di pregi e limiti, per giungere infine alla stesura del tutorial. In generale i risultati delle elaborazioni sono stati sempre accettabili; ovviamente sta all'utente impostare i parametri di ricostruzione a seconda delle esigenze e delle peculiarità dell'oggetto rilevato. La successiva sperimentazione sul sito archeologico di San Genesio (San Miniato, Pisa) ha consentito di determinare l'applicabilità dello strumento in questo settore.

Grazie all'esperienza maturata si è giunti alla conclusione che *ZScan Evo*, consentendo un'acquisizione morfologica 3D, geometrica e fotografica dell'oggetto di interesse, può essere a tutti gli effetti considerato come uno strumento di conoscenza oltre che per la restituzione grafica.

ABSTRACT

The aim of the present study is to investigate *ZScan Evo*, a new solution developed by Menci Software for build three-dimensional models from simple digital images through automates processes.

First, I have analyzed the scientific context and the company's mission. Then, I focused on two products, *ZMap* e *ZScan*, softwares for traditional and advanced photogrammetric processes. Especially the second solution gave me the opportunity to create a critical basis to know the capabilities of the instrument to be tested.

Based on the same photogrammetry principles that made *ZScan* a success, *ZScan Evo* represents an important innovation: it allows the user to have a complete 3d reconstruction model without having to rely on a complex hardware; it is also able to join automatically models to create a complete object.

The system includes the following software licenses:

EVO CAPTURE: this module is associated to the tablet for field use. Its purpose is to show live feed from camera (especially when topographical pole are used) and to acquire all the images you need in your project; it also helps users to verify the correct overlap between pictures, which is always an important requirement for photogrammetry.

EVO CHECK: a module that can be used on field, capable of pre-reconstruction. This module's primary function is to ensure that all images can be successfully tiled for reconstruction.

UMAP: main processing module for RGB point cloud reconstruction. *U-Map* also creates hi-res textures.

AFTERWORK: post-processing module for 3d model refining. It can recognize and eliminate automatically overlap zones between models, so that every project created with *ZScan Evo* will produce a homogeneous and sharp textured 3d model. With *Afterwork* users can export a fully texturized 3d model.

Many different tests have allowed us to evaluate usefulness of the product and to find out merits and limitations of the instrument, to get than to the writing of the tutorial.

The results of processing were always acceptable; obviously the user must set the parameters of reconstruction according to the needs and peculiarities of the case.

The application results to the archaeological site of San Genesio (San Miniato, Pisa) have determined the applicability of the instrument in the archaeological field.

Thanks to this experience we can assert that *ZScan Evo*, allowing a three-dimensional morphological, geometric and photographic acquisition of the objects of interest, must be considered an instrument of knowledge as well as for graphic representation.

The results reached by all the different tests were interesting and they have demonstrated that the software can certainly be used for three-dimensional models, in order to permit public knowledge and fruition of monuments.

INDICE

Introduzione	3
Dati	5
Revisione critica della letteratura disponibile	5
Fotogrammetria	5
Tecniche fotogrammetriche digitali per i beni culturali e il rilievo archeologico	6
Menci Software	7
Descrizione e analisi dei dati di partenza	9
Metodi, Strumenti, Procedure	11
Fotogrammetria tradizionale: <i>ZMap</i>	11
Fotogrammetria evoluta: <i>ZScan</i>	13
Procedura Operativa	14
Procedura software	15
<i>Z-Block</i>	16
Prove operative	17
Fotogrammetria sperimentale: <i>ZScan Evo</i>	21
Metodologia	21
Strumentazione	21
Procedure	21
Prove operative	23
Site Manager	28
Un caso applicativo: il sito archeologico di San Genesio	29
Un po' di storia	29
Area 39000	32
Area 35000	38
Risultati e Discussione	42
Conclusioni	44
Appendici	45
Appendice A: Informazioni sull'accuratezza	45
Appendice B: Focali-Glossario	45
Appendice C: Covering Area	47
Appendice D: dal Tutorial di <i>ZScan Evo</i> , Informazioni di base e operazioni preliminari	48
Bibliografia e Sitografia	50

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1: <i>ZMap</i> . Collimazione manuale delle marche fiduciali.	12
Fig. 2: <i>ZMap</i> . Ortofoto con linee di taglio in rosso per la generazione del mosaico.	13
Fig. 3: Kit <i>ZScan</i>	14
Fig. 4: <i>ZScan</i> . Workspace principale per la generazione dei modelli 3D.	15
Fig. 5: Pionta. Vista generale della discarica	18
Fig. 6: Pionta. Particolare della lastra	18
Fig. 7: Parete curva. Modello tridimensionale generato	18
Fig. 8: Tratto pavimentale. Ricostruzione tridimensionale	19
Fig. 9: Ara rilevata con baseline diversa	20
Fig. 10: Ricostruzione tridimensionale della parete absidale.	20
Fig. 11: Basamento. Risultato della generazione dei modelli 3D.	20
Fig. 12: Kit <i>ZScan Evo</i>	21
Fig. 13: Interfaccia di <i>Evo Capture</i>	21
Fig. 14: Interfaccia di <i>Evo Check</i>	22
Fig. 15: Interfaccia di <i>U-Map</i>	22
Fig. 16: Nuvola di punti ricostruita con <i>Evo Check</i>	24
Fig. 17: Vista frontale del modello 3D del basamento.	25
Fig. 18: Vista frontale della volta ricostruita.	26

Fig. 19: Elaborazioni dell'abside. In alto da sinistra: ricostruzione tridimensionale e vista dall'alto; curve di livello con base cromaltimetrica, profilo e ortofotomosaico.	26
Fig. 20: Vista frontale della ricostruzione 3D del tratto di mura cittadine.	27
Fig. 21: Frammento di lastra ricostruito. Vista frontale.	27
Fig. 22: Duomo di Arezzo. Da sinistra: distanza di presa per il rilievo e vista frontale della facciata ricostruita.	28
Fig. 23: Distanza di presa per l'acquisizione dell'iscrizione.	28
Fig. 24: Vista frontale tridimensionale della fontana e particolare.	28
Fig. 25: Viste panoramiche dell'area di scavo.	30
Fig. 26: Vista generale dell'area 35000.	31
Fig. 27: Vista generale dell'area 39000.	31
Fig. 28: Area 39000. Risultato dell'elaborazione con <i>Evo Check</i>	32
Fig. 29: Area 39000. Risultato del processo di ricostruzione su <i>U-Map</i>	33
Fig. 30: Area 39000. Vista dall'alto e frontale del modello 3D.	34
Fig. 31: Area 39000. Messa in scala del modello.	35
Fig. 32: Area 39000. Georeferenziazione.	35
Fig. 33: Area 39000. In alto a sinistra: DEM editato; curve di livello, profilo Nord, profilo Est, profilo Sud, profilo Ovest, profilo canaletta.	36
Fig. 34: Area 39000. Ortofoto.	37
Fig. 35: Area 39000. Ortofotomosaico.	37
Fig. 37: Area 35000. Risultato del processo di ricostruzione su <i>U-Map</i>	38
Fig. 36: Area 35000. Risultato dell'elaborazione con <i>Evo Check</i>	38
Fig. 38: Area 35000. Vista dall'altro del modello ricostruito e scalato.	39
Fig. 39: Area 35000. Dall'alto: DEM editato, profilo della canaletta, profilo Nord, profilo Est, profilo Sud, profilo Ovest e curve di livello.	40
Fig. 40: Area 35000. Ortofoto.	41
Fig. 41: Area 35000. Ortofotomosaico con cartiglio.	41

INDICE DELLE TABELLE

Tab 1: Progetto formativo suddiviso in step.	3
Tab 2: Gantt chart. In rosso le attività pratiche, in blu quelle di ricerca bibliografica e stesura dell'elaborato.	4
Tab 3: Dati relativi all'area 39000.	32
Tab 4: Work flow area 39000.	33
Tab 5: Dati relativi all'area 35000.	38
Tab 6: Work flow area 35000.	39

INTRODUZIONE

L'intento del progetto di stage formativo intrapreso è stato quello di sperimentare *ZScan Evo*, un nuovo strumento per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico¹.

L'ente ospitante, la Menci Software srl, si occupa, infatti, di ricerca e sviluppo di sistemi di misura da immagini, produzione di software per la Fotogrammetria e Computer Vision, ricostruzione tridimensionale da immagini digitali, disegno e mappatura cartografica. Ha numerose partnership non solo con le maggiori aziende attive nel settore ma anche con enti di ricerca come il MIBAC, CNR, Università².

L'obiettivo aziendale è quello di fornire tecnologie e servizi personalizzati negli ambiti della progettazione (rilievo del territorio, ingegneria, architettura, archeologia e beni culturali); della realizzazione per il controllo quantitativo e qualitativo di ciò che è ripreso; della manutenzione (per la verifica sistematica e puntuale dello stato di conservazione, della sua funzionalità); del monitoraggio (per la documentazione dello stato dei beni e dei luoghi, per la verifica delle condizioni di rischio ambientale a danno dell'opera e per la verifica delle modifiche ambientali conseguenti alla realizzazione dell'opera); della documentazione e conservazione (per la prevenzione e la tutela dei beni culturali, ambientali, paesaggistici, territoriali e infrastrutturali). Le soluzioni proposte si caratterizzano per un'alta accuratezza, versatilità e rapidità sia in termini di intervento che di elaborazione.

Si intuisce quindi come molto ampio sia il panorama di interessi e svariati i campi applicativi ma per le finalità del presente progetto, l'attenzione si è concentrata nel settore dei beni culturali e in particolare quello archeologico. In un inquadramento organizzativo-progettuale, l'attività è stata suddivisa in specifici step, riportati nella seguente tabella (Tab 1).

	OGGETTO	ATTIVITA'	
Step 1	Menci Software	1.1	Studio dei documenti scaricabili da sito
		1.2	Ricerca bibliografica
		1.3	Ricerca bibliografica sull'operato dell'azienda
Step 2	Logica dei prodotti Menci Software	2.1	Studio di prodotti di fotogrammetria tradizionale: <i>ZMap</i>
		2.2	Studio di prodotti di fotogrammetria evoluta: <i>ZScan</i>
Step 3	<i>ZScan Evo</i>	3.1	Studio e analisi del prodotto
		3.2	Approfondimenti per utilizzo
		3.3	Stesura tutorial
Step 4	Sperimentazione sul campo: l'esempio di San Genesio (PI)	4.1	Attività sul campo
		4.2	Elaborazioni
Step 5	Fase evolutiva del sistema	5.1	Report
		5.2	Revisione tutorial
Step 6	Stesura elaborato finale		
Step 7	Programmazione di attività seminariali		

Tab 1: Progetto formativo suddiviso in step.

¹ I miei ringraziamenti più sentiti vanno alla dott.ssa Francesca Ceccaroni e il dott. Luca Menci che hanno reso possibile questa esperienza, accogliendomi nella loro azienda. Ringrazio tutto il team di lavoro per l'immensa disponibilità dimostrata in ogni occasione e per la prontezza di intervento in ogni difficoltà incontrata. Un ringraziamento particolare va al prof. Riccardo Salvini, tutor dello stage e relatore, per i preziosi consigli forniti. Ringrazio anche tutti quelli che in vario modo hanno condiviso con me questo periodo, in particolar modo i miei genitori, ai quali devo tutto e Tommaso, che mi ha sempre supportato e sopportato.

² Maggiori dettagli sono reperibili sul sito internet dell'azienda: www.menci.com con descrizioni approfondite di tutti i prodotti commercializzati.

Gli obiettivi perseguiti sono stati:

- studiare la fotogrammetria e le implicazioni relative ai beni culturali e l'Archeologia;
- conoscere la Menci Software come azienda, prodotti, settori applicativi;
- conoscere i prodotti *ZMap* e *ZScan*;
- testare *ZScan Evo*;
- valutare l'efficacia del prodotto;
- realizzarne il tutorial;
- valutare la funzionalità della soluzione in contesti archeologici.

Per quel concerne la metodologia utilizzata, ciascuna fase ha sempre previsto un momento di studio teorico seguito da molteplici applicazioni in modo da fissare e assimilare le conoscenze e acquisire competenze con i prodotti.

Per una visione immediata e complessiva del progetto viene di seguito riportata la tabella delle attività relative allo stage e alla preparazione della tesi di master (Tab 2). Nel diagramma sono indicate le singole attività svolte (secondo la successione presentata nella tabella precedente) e la loro durata/sequenza nell'esecuzione del progetto.

ATTIVITA'	LUGLIO				AGOSTO		SETTEMBRE				OTTOBRE				NOVEMBRE		
	sett1	sett2	sett3	sett4	sett5	sett6	sett7	sett8	sett09	sett10	sett11	sett12	sett13	sett14	sett15	sett16	sett17
1.1																	
1.2																	
1.3																	
2.1																	
2.2																	
3.1																	
3.2																	
3.3																	
4.1																	
4.2																	
5.1																	
5.2																	
6																	
7																	

Tab 2: Gantt chart. In rosso le attività pratiche, in blu quelle di ricerca bibliografica e stesura dell'elaborato.

DATI

Revisione critica della letteratura disponibile

La fase iniziale del progetto qui esposto è consistita nella ricerca e nello studio della bibliografia disponibile, innanzi tutto in materia di Fotogrammetria come ambito disciplinare, ed in particolare delle sue applicazioni nel settore dei beni culturali e dell'Archeologia e riguardante l'azienda Menci Software e il suo operato, come tematica specifica.

In primo luogo l'analisi bibliografica ha preso in considerazione il materiale presente nell'area di download del sito dell'azienda³: si tratta di articoli di vario genere, sia tecnici sia divulgativi, pubblicati dalla Menci Software; user experiences di prodotti dell'azienda in vari settori applicativi; tesi di vario livello sia di Laurea Specialistica che di Dottorato, nella cui sezione metodologica sono descritti procedimenti basati sull'uso di prodotti Menci o comunque pertinenti all'ambito fotogrammetrico, che testimoniano da un lato l'interesse crescente per la materia e dall'altro anche la diffusione di soluzioni Menci in ambito accademico; infine schede di prodotti, depliant e materiale informativo di diversa natura.

A questi si sono poi aggiunti manuali di Fotogrammetria e vari scritti teorici; atti di convegni, fondamentali per una panoramica esaustiva e aggiornata sullo stato della ricerca nel settore; altri articoli e tesi pubblicate inerenti alle diverse metodologie di rilievo tridimensionale in Archeologia e nel settore dei beni culturali o relative ad esperienze con prodotti Menci; infine siti internet di news e di riviste specializzate⁴ e di aziende partner⁵.

Questa fase è stata indispensabile e propedeutica alle successive: in primo luogo ha consentito di approfondire la mia conoscenza in ambito fotogrammetrico ed in particolar modo delle applicazioni in campo archeologico; in secondo luogo mi ha permesso di entrare nell'ottica dell'azienda, con i suoi prodotti commercializzati ed i suoi settori di applicazione.

Prima di entrare nel vivo dello scritto, ritengo opportuno presentare, sinteticamente vista la natura tecnica dell'elaborato, una revisione critica della letteratura a mia disposizione, suddivisa per macro-argomenti.

Fotogrammetria⁶

Fino a qualche decennio fa la fotogrammetria era vista come una materia estremamente complessa, che esigeva l'impiego di attrezzature sofisticate e costose e di personale altamente qualificato. L'avvento dell'informatica ha senza dubbio facilitato le cose, velocizzando e semplificando le procedure e consentendo l'utilizzo di tecnologie a basso costo⁷, così come la crescente diffusione dei Sistemi Informativi Territoriali anche in ambiti precedentemente interessati a questa tecnologia solo in maniera potenziale, ha modificato il mercato della produzione di dati cartografici, costringendo la fotogrammetria tradizionale a confrontarsi con le nuove esigenze di economia, rapidità e sintesi connesse a questi nuovi metodi di acquisizione ed elaborazione.⁸

Le emergenti tecniche di laser scanning e le innovative procedure fotogrammetriche di elaborazione multi immagine, hanno trovato consenso nei settori più disparati: dall'architettura, l'archeologia, il restauro e i beni culturali al rilievo industriale, le perizie giudiziarie, il campo biomedico, la geologia e la cartografia.

³ www.menci.com

⁴ www.rivistageoedia.it

⁵ Si veda ad esempio: www.digitalsurvey.it

⁶ Non essendo questa la sede per dissertazioni teoriche sullo stato dell'arte in materia di fotogrammetria, né per una disamina dei maggiori scritti teorici, mi limiterò nella citazione di alcuni testi basilari e di altri rivelatisi utili per la mia ricerca: CUNDARI 1983; FONDELLI 1992; KRAUS 1994; SELVINI 1994; GALETTO – SPALLA 2000; SELVINI – GUZZETTI 2000; ROMEO 2002; MENCI – CECCARONI 2003; BARTOLINI – SALZOTTI 2003-2004; LONG 2005; BIANCHINI 2008; MENCI 2002; AGOSTINI sd.

⁷ Si pensi al passaggio dagli stereo restitutori analogici di tipo ottico-meccanico ai software che gestiscono formati sia raster che vettoriali (BIANCHINI 2008).

⁸ MENCI 2004.

Tecniche fotogrammetriche digitali per i beni culturali e il rilievo archeologico⁹

Nel corso degli anni, si sono moltiplicate le esperienze attestanti la diffusione delle tecniche fotogrammetriche in campo archeologico e nel settore dei beni culturali, tanto che sembra ormai indiscussa la loro utilità in questi ambiti.¹⁰

L'utilizzo del metodo fotogrammetrico digitale è fondamentale quando si parla di rilievo, in quanto fornisce uno strumento di lettura e analisi rigorosi, supporto per la ricostruzione storica, ma anche per attività di progettazione come interventi di restauro, manutenzione, tutela, monitoraggio. Le procedure consentono di archiviare ed elaborare un'enorme quantità di dati, consultabili in modo semplice e flessibile e allo stesso tempo trasmettere e comunicare il valore e l'importanza del patrimonio culturale.

In campo archeologico queste tecniche rientrano nell'ambito del rilievo indiretto¹¹: con l'intento di misurare le dimensioni dei manufatti per darne una rappresentazione esatta, a piante, prospetti e sezioni si sono gradualmente affiancati e a volte sostituiti nuovi metodi che prevedono l'uso della stazione totale, che restituisce in tempo reale le coordinate spaziali dei punti rilevati; il GPS sfruttato soprattutto per il rilievo del territorio; la fotogrammetria sia aerea con fotopiani, ortofotocarte ecc, sia terrestre, applicata inizialmente nel rilievo delle facciate di edifici storici e poi estesa ad altri soggetti; infine il laser scanner, che effettua misurazioni automatiche di milioni di punti restituendo forme tridimensionali all'interno di file vettoriali.

Così, se fino a qualche decennio fa, la sola ipotesi di un rilievo tridimensionale in laser scanning o un rilevamento in itinere *stop and go* con la tecnologia GPS, poteva essere considerato frutto di pura fantasia, oggi i tempi ridotti di acquisizione e l'elevato grado di dettaglio e precisione dei risultati ottenibili, hanno fatto sì che il ricorso a tali tecniche entrasse a pieno diritto nella comune prassi di rilievo e non solo per lo studio degli elevati ma anche per la documentazione planimetrica di dettaglio.

Di certo tale sviluppo, spinto dalla considerazione, basilare per gli archeologi, che il rilievo non sia solo una tecnica di documentazione, ma anche un mezzo di studio, per interpretare e ricostruire il passato, è stato possibile soprattutto grazie al sodalizio creatosi tra l'informatica e l'archeologia; e che questi nuovi metodi operativi si siano rivelati vincenti si evince infine dall'idea, maturata pian piano, della necessità di una nuova figura professionale che riunisca le competenze del rilevatore tecnico e dell'archeologo, fino a ieri sostanzialmente distinte.¹²

La lontananza delle due prospettive, infatti, ha comportato un iniziale scetticismo da parte degli archeologi nell'applicazione delle nuove tecniche, accusate in molti casi di non riuscire a cogliere ciò che è necessario segnalare, vale a dire non solo l'oggetto restituito ma anche la sua lettura storica, la sua interpretazione.

Ma una volta compreso che i metodi non sono esclusivi,¹³ e che anzi la giusta via è proprio quella dell'integrazione, della convivenza tra rappresentazioni statiche classiche e modelli dinamici, utilizzando il meglio che ciascuno di esse offre secondo le esigenze, l'innovazione ha avuto il sopravvento.¹⁴

⁹ Anche in questo caso si preferisce trattare in maniera sintetica l'argomento. Tuttavia, alcune indicazioni bibliografiche sono d'obbligo. Fondamentali sono i contributi sulla materia di CHEVALLIER 1969; PICCARRETA 1987; ALVISI 1989; BEZOARI *et al.* 1992; CHENE *et al.* 1999; CERAUDO 1999; PICCARRETA – CERAUDO 2000. Per una panoramica sul contesto scientifico e il dibattito in corso si veda BITELLI 2002. Un approfondimento sulle tecniche fotogrammetriche e le loro applicazioni in campo archeologico si trova poi in CANTONE 2004-2005 e RAPANA' 2010.

¹⁰ BITELLI 2002. L'importanza dell'utilizzo di tali tecniche per la conservazione del patrimonio culturale è rimarcata anche in SALONIA 2000, VANNINI 2009, CAMIN *et al.* 2010.

¹¹ Sul rilievo in archeologia si vedano: GIULIANI 1976; MIGLIARI 2001; GIORGI 2003; MEDRI 2003; MASCIONE 2006; BIANCHINI 2008.

Per approfondimenti sulle diverse tecniche si vedano: CUCARZI 1995; AZZENA-TASCIO 1996; GOTTARELLI 1997; GILLINGS *et al.* 1999; FRANCOVICH – VALENTI 2000; VALENTI 2000; GUAITOLI 2001; FORTE 2002; D'ANDRIA – SEMERARO 2003; SALZOTTI 2005; CONOLLY – LANE 2006 sui Gis ed i Sistemi Informativi Territoriali; CAMPANA – FORTE 2001; CAMPANA 2004; CAMPANA 2006; LASAPONARA *et al.* 2007; WISEMAN – EL BAZ 2007 sul Telerilevamento.

Sull'uso del GPS in archeologia si vedano GABRIELLI 2001 e CAMPANA 2005.

Si vedano PELOSO 2005; PERIPIMENO – SALVADORI 2005; CAMPANA – FRANCOVICH 2006; PERIPIMENO – SALZOTTI 2006; VISINTINI *et al.* 2006; PERIPIMENO 2009, SALVADORI 2009 sulle tecniche Laser Scanning.

Ancora, BARCELO *et al.* 2000; BORRA 2000; NICCOLUCCI 2002; CARROZZINO *et al.* 2005; BIANCHINI 2008; FORTE 2008 sui modelli tridimensionali e la realtà virtuale.

¹² DE FELICE *et al.* 2007, CAIROLI GIULIANI 2008.

¹³ Sul confronto ad esempio tra fotogrammetria e laser scanner si vedano: MENCI – CABRUCCI 2005; NEX – RINAUDO 2008.

¹⁴ Riportiamo qui una serie di casi applicativi. Nel caso della città romana di Grumentum l'uso integrato di laser scanner, tecniche di fotogrammetria digitale e GPS ha consentito di ottenere un modello computerizzato

Comunemente oggi si utilizzano laser scanner distanziometrici, che in maniera quasi completamente automatica, consentono di registrare oltre alle informazioni geometriche anche i valori di riflettività dei materiali, determinando la variazione cromatica dei punti acquisiti. Molto diffusa, nonché più economica e di facile impiego, sempre per la restituzione di modelli metrici tridimensionali è la fotomodellazione su base geometrica, utilizzando foto digitali scattate da diverse angolazioni le quali devono avere tra l'una e l'altra delle zone di sovrapposizione. I programmi di fotomodellazione più evoluti sono in grado di calcolare automaticamente la posizione spaziale di tutti i pixel delle coppie di fotogrammi che riproducono la superficie del medesimo oggetto, generando delle nuvole di punti tridimensionali analoghe a quelle dei laser scanner (*dense surface modeling*). Si tratta di tecniche che in molti casi hanno offerto un valido supporto non solo per lo studio ma anche per il recupero e la salvaguardia dei beni architettonici e più in generale del patrimonio culturale.¹⁵

Con la fotogrammetria digitale sono stati limitati i tempi di occupazione dello scavo e quindi di energie umane ed economiche dedicate; non sono stati dispersi dati, ma anzi sono state ottenute informazioni oggettive di natura metrica, geometrica e morfologica affidabili, consentendo di procedere ad analisi interpretative e classificatorie contemporaneamente all'avanzare dei lavori.¹⁶

Menci Software

Come già accennato, l'azienda si occupa di software per la fotogrammetria, che trovano applicazioni in vari settori. Dalla vasta gamma di soluzioni proposte, sicuramente spiccano *ZMap* e *ZScan*, ognuno corredato di propri moduli aggiuntivi.

ZMap è una stazione fotogrammetrica multi sensore, da impiegare quindi per immagini aeree, terrestri e satellitari, oltre che sensori digitali aerei, nell'ambito dei tradizionali processi fotogrammetrici. Comprende procedure di Orientamento Interno ed Esterno automatiche; permette la generazione di DEM e DTM oltre che la collimazione e visualizzazione monoscopica e stereoscopica. Tra le altre cose, consente di realizzare ortofoto, piante, prospetti, curve di livello, orto mosaici ad alta risoluzione su scansione laser.¹⁷

ZScan è un software che consente la realizzazione di modelli 3D senza utilizzo del laser, ma direttamente da immagini digitali, grazie ad un innovativo algoritmo di rettifica multifocale, mediante il quale le immagini vengono ricampionate secondo piani variabili in funzione della morfologia dell'oggetto da ricostruire.¹⁸

tridimensionale, fondamentale non solo per la registrazione dello stato di fatto ma anche come supporto delle analisi (BALLETTI – GUERRA 2006). Di particolare rilievo è poi l'utilizzo di laser scanner sui rivestimenti parietali e pavimentali della cenatio della villa di Faragola (FG) (DE FELICE *et al.* 2007) e una combinazione delle due tecniche ad Aosta (SALONIA *et al.* 2007).

Altre esperienze sull'integrazione di tecnologie sono quella della Valle dei Templi ad Agrigento (CARLINO 2007); quella del Tempio C di Selinunte (AMICI 2009); quella di Montecorvino, nel Subappennino daunio (FAVIA *et al.* 2009); quella di Lucca Romana (CAMIN 2009 e CAMIN *et al.* 2010) e quella di Monte San Martino, con la prospettiva di inserire i risultati ottenuti in un modello tridimensionale del terreno per avere una veduta globale e non solo spaziale e comprendere l'evoluzione del paesaggio circostante (RAPANA' 2010).

Un esempio di metodologia di lavoro nel campo delle ricostruzioni tridimensionali in CAD di edifici antichi è quello dei Mercati di Traiano (BIANCHINI 2008; BIANCHINI 2010; BIANCHINI 2010 (b); UNGARO *et al.* 2010).

Altre applicazioni delle tecniche digitali in ambito archeologico si trovano in ANGELINI *et al.* 2007; BITELLI *et al.* 2007; CARMIGNANI *et al.* 2007 e AMOROSO *et al.* 2009. Sono state infine sperimentate tecniche fotogrammetriche per reperti archeologici in fibra organica e legno (DE TROIA *et al.* 2008) e per reperti di piccole e medie dimensioni (LO BRUTTO – SPERA 2010).

¹⁵ Si vedano ad esempio le sperimentazioni fatte sul portale del Leone di Galeazzo Alessi e la cinta muraria di Città di Castello (DOMINICI *et al.* 2000) o anche CAPRIOLI *et al.* 2003. Soluzioni fotogrammetriche per le superfici curve sono state presentate per la Cappella Palatina a Palermo (D'AMELIO *et al.* 2004) e per il Palazzo Carignano a Torino (BONINO *et al.* 2005). Fondamentale risulta poi l'esperienza del Marco Aurelio, in cui l'uso del laser scanner è stato di grande supporto per il restauro (ACCARDO 2007).

¹⁶ BONORA 2003.

¹⁷ Premettendo che del prodotto si parlerà approfonditamente in seguito, riferimenti essenziali per una descrizione delle caratteristiche si trovano in MENCI 2004, CASELLA *et al.* 2006 e sul sito dell'azienda. Sull'uso di *ZMap* per la visione stereoscopica e vettorializzazione di nuovi sensori digitali aviotrasportati si veda EMMOLO 2003-2004. Su *Zmap Laser* (modulo per la gestione dei dati da laser scanner) si veda CECCARONI 2005.

¹⁸ Anche di questo prodotto si tratterà in maniera dettagliata più avanti. Descrizioni dettagliate sulla metodologia di utilizzo di *ZScan* si trovano in: PESCI *et al.* 2009; MENCI *et al.* 2007; MENCI – CECCARONI 2008. Un interessante caso applicativo si trova in CAMIN 2009 e CAMIN *et al.* 2010. Sull'uso dello strumento da parte di altre aziende specializzate nelle tecniche di rilievo topografico e fotogrammetrico e giudizio sull'utilizzo e applicabilità nei diversi settori si veda: <http://www.digitalsurvey.it/index.htm>.

Altri prodotti, non trattati in questa sede ma comunque riportati per completezza, sono: *CYCLOP*, che consente la realizzazione di riprese stereoscopiche prive di parallassi d'altezza e la loro restituzione;¹⁹ *Stereo Space* e *Stereo Pro* per la stereo visione²⁰; *Darklight* per rappresentare scene che presentano condizioni critiche di luminosità; *REM* (Remote Environment Mapping) per la mappatura 3D del territorio; *Deformation* per la determinazione dei profili deformati dei veicoli e calcoli dell'energia di deformazione; *Displan* per la ricostruzione 2D delle planimetrie stradali; *Body Scanner* per applicazioni in campo biomedico etc.

Le diverse soluzioni sono state utilizzate in vario modo: da test per la valutazione delle performances della tecnica di matching per generare dalle immagini nuvole di punti dense²¹ o esperimenti per generare un sistema integrato tra le varie tecniche²², ad applicazioni per il monitoraggio delle spiagge²³ o di fiumi²⁴; per la produzione di cartografia numerica²⁵.

Ai fini del presente progetto, particolarmente rilevante è stato però lo studio di applicazioni dei prodotti Menci Software nel settore dei beni culturali e dell'Archeologia. Tra i vari casi, se ne riportano sinteticamente alcuni, tra i più significativi.²⁶

Sul sito di Khor Rori in Oman, sono state testate procedure di fotogrammetria speditiva e orto proiezione per il rilievo geometrico e la registrazione degli interventi di restauro.²⁷

A Milano, per le strutture portanti del Duomo, è stato realizzato un database tridimensionale integrato, in cui poter misurare accuratamente le dimensioni dei dettagli architettonici e la distribuzione dei materiali. Inoltre sono state utilizzate stereofotocarte per la mappatura tridimensionale delle strutture. Entrambi si sono rivelati strumenti di grande supporto per la manutenzione di una costruzione così complessa.²⁸

La cinta urbana e l'arco di Augusto ad Aosta costituiscono altri due esempi interessanti. Nel primo caso si è proceduto alla copertura stereoscopica dell'intera cinta muraria, per predisporre una base scientifica di dati geometrici, utile per la valutazione dello stato di conservazione delle strutture e la pianificazione di interventi di restauro.²⁹ Nel secondo caso sono state comparate tecniche fotogrammetriche e tecnologia laser scanner, con un risultato promettente.³⁰

Per il contesto del cortile cinquecentesco del palazzo del Bo a Padova, sono state invece applicate procedure per texture mapping che permettono di integrare modelli tridimensionali di oggetti con acquisizioni fotografiche, associando a ciascun punto il corrispondente valore radiometrico contenuto nelle immagini.³¹

Petra, nella Giordania centro-meridionale, offre un ottimo esempio di integrazione di tecniche di rilievo. Nell'area monumentale, infatti, sono stati riscontrati pericolosi fenomeni di degrado causati dalle forti escursioni termiche; per questo nel corso del tempo è stata approntata una rete di canali e vasche di raccolta costruite nelle zone a monte e a margine delle opere monumentali. Tecnologie GIS, dispositivi per le riprese fotogrammetriche tridimensionali, oltre ad indagini topografiche e geologiche hanno consentito di ricostruire virtualmente il sistema di canalizzazioni per ipotizzare il percorso originario di deflusso delle acque, in modo da poter procedere alla valutazione dello stato di degrado, alla quantificazione e localizzazione delle parti mancanti.³² All'interno del progetto "Petra medievale" poi, gli strumenti utilizzati hanno consentito una produzione grafica completa, dalla nuvola di punti alla rappresentazione bidimensionale in un software GIS delle unità stratigrafiche, prospettando concretamente il nesso tra informazioni geometriche prodotte tramite la fotogrammetria e le conoscenze archeologiche.³³

Altro esempio di applicazione di tecnologie integrate quali GIS, cartografia e realizzazione di modelli 3D da scansione fotografica tramite *ZScan* è quello delle arcate e dei piedritti della facciata dell'Anfiteatro romano

¹⁹ MENCI – RINAUDO 2000.

²⁰ MENCI *et al.* 2001.

²¹ NEX – RINAUDO 2008.

²² PESCI *et al.* 2009.

²³ CARLI *et al.* 2006.

²⁴ LO BRUTTO 2009.

²⁵ FORESTA 2008-2009.

²⁶ Oltre a quelli descritti, casi applicativi si trovano in: BONORA *et al.* 2007; GABRIELLI *et al.* 2008(b); SALONIA *et al.* 2008; MARCOLONGO *et al.* 2009; SALONIA *et al.* 2009; PARENTI *et al.* 2010; REDDI 2010-2011.

²⁷ ORAZI 2000.

²⁸ GIUNTA *et al.* 2005 e MENCI *et al.* 2002.

²⁹ SALONIA *et al.* 2005; APPOLONIA *et al.* 2007.

³⁰ SALONIA *et al.* 2007.

³¹ FABRIS *et al.* 2007. FABRIS *et al.* 2007(b).

³² GABRIELLI *et al.* 2008; AMICO *et al.* 2009.

³³ VANNINI 2009.

di Lucca. L'utilizzo di tali tecniche, infatti, ha consentito di disporre di un rilievo metrico preciso e dettagliato sia dal punto di vista geometrico che cromatico.³⁴

Anche a Palmyra, in Siria, la topografia classica, il sistema GPS, la fotogrammetria digitale e il laser scanning hanno portato ad una descrizione metrica completa e dettagliata dei soggetti rilevati. Nello specifico è stata definita una rete topografica di inquadramento e sono state acquisite immagini fotogrammetriche terrestri per il rilievo ad alta risoluzione del paramento murario occidentale dell'Agora, di un arco al confine settentrionale del quartiere e dello scavo dell'Edificio con Peristilio. Per ciascuno degli elementi rilevati sono stati misurati punti d'appoggio necessari per l'orientamento delle immagini. Sono stati infine generati modelli 3D testurizzati ad alta risoluzione con finalità conoscitive e di catalogazione oltre che per analisi di dettaglio.³⁵

Nel tempio di Zeus Olympia ad Agrigento, invece, il rilievo tridimensionale dei telamoni che intervallano le colonne è stato fondamentale per la loro interpretazioni non solo come elementi decorativi ma anche di supporto strutturale.³⁶

Infine tra gli esempi pertinenti il restauro o il rilievo di reperti di piccole e medie dimensioni o fossili³⁷, si ricorda l'esperienza nel Tempio della Vittoria a Imera, dove sono state sperimentate soluzioni fotogrammetriche sia con classiche procedure stereoscopiche sia con approcci di tipo multi-immagine, per il rilievo di una piccola Arula con risultati senza dubbio accettabili.³⁸

In conclusione, dall'analisi dei casi sin qui presentati è emersa sicuramente l'attualità della tematica e l'utilità concreta delle tecniche fotogrammetriche nel settore dei beni culturali e dell'archeologia, non solo come valida strumentazione di supporto per il rilievo, ma anche per la conferma di ipotesi interpretative e soprattutto in vista di progetti di restauro, manutenzione e valorizzazione del patrimonio culturale.

Descrizione e analisi dei dati di partenza

All'interno del quadro scientifico sopra delineato, la base per lo sviluppo della mia ricerca è costituita senza dubbio dalla conoscenza e dall'utilizzo dei software *ZMap*³⁹ e *ZScan*⁴⁰. In particolar modo, di quest'ultimo, *ZScan Evo* rappresenta a tutti gli effetti l'evoluzione; è apparso quindi logico e funzionale, prima di procedere alla sperimentazione dell'ultima soluzione e release, avere padronanza e competenza con i software precedenti.

Come accennato *ZMap* è una stazione fotogrammetrica multisensore per la produzione e l'elaborazione di dati cartografici e architettonici. Lavora sia in modalità monoscopica che stereoscopica, integrando con efficienza informazioni raster e vettoriali anche di grandi dimensioni e consente una rapida gestione di DTM densi acquisiti con diverse tecnologie, foto aeree e da satelliti, ortofoto rettificate e ortomosaici, cartografia vettoriale e nuvole di punti. L'architettura del sistema basata su un database proprietario di tipo CAD, si dimostra molto versatile grazie alle sue numerose funzioni di editing. Due soluzioni end user pronte all'uso basate su tale piattaforma sono *ZMap Photo*, che include funzioni adatte alla fotogrammetria aerea, terrestre e satellitare e *ZMap Laser*, specializzato nella gestione di nuvole di punti, ortofoto, editing e disegno su modelli 3D.⁴¹

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.

³⁴ CAMIN 2009; CAMIN *et al.* 2010.

³⁵ FABRIS *et al.* 2010.

³⁶ LO BRUTTO – SPERA 2011.

³⁷ FABRIS *et al.* 2008.

³⁸ LO BRUTTO – SPERA 2010.

³⁹ Cfr. nota 15.

⁴⁰ Cfr. nota 16.

⁴¹ Altri moduli integrativi che estendono le potenzialità della piattaforma in varie direzioni, con numerose funzionalità specifiche sono: *ZMap Plotter*, per la vettorializzazione da modelli 3D stereoscopici; *Z-Glif* per la navigazione di modelli stereoscopici in anaglifico; *StereoPro* per la stereovisione da normale monitor LCD. Di tutti si trova una descrizione accurata sul sito www.menci.com

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 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.⁴²

Il sistema *ZScan*, invece, progettato essenzialmente per il rilievo dei beni culturali (sebbene applicabile a numerosi altri settori), consente di generare nuvole di punti tridimensionali con grande accuratezza, a partire da immagini digitali, senza bisogno di punti fissi a stazione. Il risultato è infatti una griglia di punti 3D ad alta precisione con la texture dell'immagine applicata: ovvero un raster 3D. È possibile prendere misure, graficizzare tematismi, fare rappresentazioni 3D nel Cad a disposizione, generare ortofoto e ortomosaici ad alta risoluzione.

Il kit prevede una fotocamera digitale reflex ad alta risoluzione, appositamente calibrata, dotata di ottica fissa⁴³; una slitta di precisione calibrata con carrello a ricircolo di sfere con testa tilt che consente di conoscere con alta precisione la base di presa; un treppiede professionale e il software *ZScan*, basato su un algoritmo di analisi multifocale dell'immagine che genera modelli 3D caratterizzati da accuratezza geometrica e fedeltà cromatica.

La procedura operativa è semplice e rapida: una volta montata la strumentazione, si realizza una sequenza di tre scatti (tripletta) dalle posizioni calibrate sulla barra e si ripetono da diverse posizioni seguendo la geometria dell'oggetto da rilevare.

La procedura software è completamente automatizzata: una volta preparate le triplette si procede alla ricostruzione della superficie.

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 cross-correlazione è simultaneo sulle tre immagini e sfrutta le componenti cromatiche RGB.

Una delle estensioni più utilizzate è *ZBlock*, che consente di rimontare i modelli 3d generati dalla soluzione *ZScan* in un processo batch completamente automatico.

Va poi menzionato anche *ZScan Micro*, che consente 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 e in virtù delle informazioni cromatiche fornite dalle immagini, per la documentazione 3D ad alta fedeltà.⁴⁴

⁴² Una descrizione approfondita delle fasi del processo fotogrammetrico si trova in FORESTA 2008-2009.

⁴³ In funzione dell'ottica utilizzata si può ampliare il campo di azione dello strumento.

⁴⁴ Ulteriori estensioni sono: *ZScan Ter*, progettato per l'acquisizione sincronizzata di immagini sullo stesso oggetto; *Sub Micro* per modelli tridimensionali di oggetti con dimensione inferiore al millimetro di lunghezza; *Scuba Scan*, soluzione per il rilievo 3D in ambiente subacqueo. Composto da tre camere con scafandri, posizionate su una solida struttura in alluminio, consente di eseguire scatti sincronizzati e di ottenere i relativi modelli tridimensionali. Infine *Fly Scan*, sistema aereo di scansione tridimensionale, sospeso in aria grazie ad un pallone aerostatico, consente di generare modelli e produrre DTM.

METODI, STRUMENTI, PROCEDURE

Dopo la fase preliminare di ricerca bibliografica, fondamentale per contestualizzare il progetto, l'attenzione si è spostata sulla logica dei prodotti Menci Software, sia di fotogrammetria tradizionale (*ZMap*) che evoluta (*ZScan*).

Come già visto, infatti, sono questi i dati di partenza da cui è mossa l'attività qui presentata. Al fine di raggiungere una buona conoscenza non solo teorica ma anche pratica dei due software si è ritenuto opportuno procedere con diverse esercitazioni, in vista poi della successiva sperimentazione di *ZScan Evo*. Questa ha previsto un primo momento di approccio al prodotto, supportato da alcune prove operative, per acquisire competenza e dimestichezza con lo strumento ed in seguito diversi approfondimenti di utilizzo, per creare una casistica il più ampia possibile, individuare vantaggi e limiti della soluzione, fino a giungere alla stesura di un tutorial.

Il progetto ha previsto infine un'attività di rilievo sperimentale sul campo, per testare questo nuovo sistema per la modellazione 3D e verificarne l'efficacia e l'efficienza in ambito archeologico.

Ciascuna fase ha previsto l'uso di una specifica strumentazione corrispondente nella maggior parte dei casi ai kit dei prodotti utilizzati, comprensivi di software, a cui si sono aggiunti di volta in volta, secondo le necessità, altri applicativi commerciali e proprietari di Menci Software.

Tutte le procedure svolte e di seguito descritte in dettaglio, possono essere sostanzialmente ricondotte ad un medesimo schema: ad una fase di studio individuale, necessaria per creare una base teorica è seguita una fase pratica comprendente acquisizioni ed elaborazioni, da cui sono scaturite correzioni e nuovi quesiti, in un continuo dialogo con gli operatori tecnici.

Fotogrammetria tradizionale: *ZMap*

Come già accennato *ZMap* è una piattaforma software per l'uso di immagini aeree, terrestri e satellitari, oltre che sensori digitali, nell'ambito dei tradizionali processi fotogrammetrici; permette inoltre la gestione di dati provenienti da laser scanner sia nel contesto aereo che terrestre.

Per lo studio di tale prodotto mi sono innanzitutto servita del materiale bibliografico raccolto nella precedente fase, focalizzando l'attenzione sulla scheda tecnica, i casi applicativi, le informazioni contenute nel sito, presentazioni di vario tipo e soprattutto sul tutorial del programma.

Da questo, infatti, provengono non solo le descrizioni delle procedure seguite ma anche la maggior parte dei dataset esemplificativi utilizzati per fissare le conoscenze assimilate e fare pratica con lo strumento.

Nello specifico, mi sono inizialmente concentrata sulla parte *ZMap Photo*: oggetto delle esercitazioni sono stati quindi i processi di Orientamento Interno ed Esterno; la vettorializzazione sia monoscopica che stereoscopica; la generazione di DEM, di Ortofoto e Ortomosaici.

Il software consente di gestire i certificati delle camere⁴⁵, importandoli o generandone di nuovi. Si procede quindi all'**Orientamento Interno**, operazione che descrive la geometria del fotogramma e che consente il passaggio dalle coordinate pixel dell'immagine a quelle fiduciali. Se la macchina utilizzata è metrica, sull'immagine saranno impresse le marche fiduciali che andranno collimate manualmente (se si tratta di immagini terrestri) o automaticamente (per quelle aeree) (Fig. 1). Seguirà la trasformazione delle coordinate e la memorizzazione del risultato in un file *.int e uno *.loi.

Con l'**Orientamento Esterno** si descrive invece la posizione spaziale del centro di presa di un fotogramma tramite tre coordinate 3d e tre angoli di rotazione: Omega, Phi e Kappa. Per ricavare queste informazioni il software consente l'utilizzo di diversi algoritmi:

- *Piramide Inversa e Trasformazione Lineare Diretta*. Il primo, rigoroso nel calcolo, si basa sia sui punti di controllo che sull'OI generato. In mancanza di quest'ultimo si può optare per l'altro algoritmo che si affida esclusivamente alla precisione dei punti di controllo collimati. Il file risultante è un *.est per ogni immagine.
- *Orientamento Relativo/Assoluto*. Per orientare coppie di fotogrammi. Dopo aver generato l'OI per ciascun fotogramma, si passa all'orientamento Relativo, basato sull'individuazione, automatica o

⁴⁵ I "camera passport" contengono informazioni generali della camera (nome, marca, seriale, data di calibrazione), sulla qualità delle lenti (lunghezza focale, PPA, PPS) e sui parametri di distorsione. Se la fotocamera è digitale occorre fornire la dimensione del pixel in mm, la dimensione dell'immagine in termini di pixel e le coordinate pixel del Punto Principale. Le marche fiduciali, che corrisponderanno agli estremi delle immagini, saranno aggiunte automaticamente sulla base dei dati precedentemente inseriti.

manuale, di almeno 6 punti omologhi, facilmente individuabili, tra le due immagini. Il risultato è l'orientamento di un'immagine rispetto all'altra in un sistema di riferimento locale non in scala e non collocato nello spazio. A questo segue l'orientamento Assoluto che si basa su almeno 3 punti di controllo che consentono di rototraslare e scalare il sistema di riferimento per renderlo metrico.

- *Orientamento CYCLOP*. Per coppie di foto scattate con la barra Cyclop, prodotta dalla Menci Software.⁴⁶
- *Bundle Block Adjustment*. Ha la stessa interfaccia dell'orientamento Relativo/Assoluto ma in questo algoritmo di compensazione, tutti i punti vengono considerati contemporaneamente. Conviene quindi usarlo quando si è sicuri della precisione dei punti di controllo, visto che nei residui finali non c'è distinzione sulla tipologia dei punti usati per il calcolo. Il calcolo dell'orientamento Relativo in ogni caso presente, ha qui lo scopo di testare la bontà dei punti di legame, ma non è strettamente necessario.

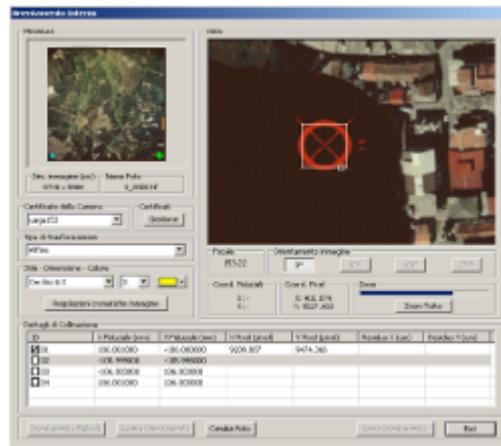


Fig. 1: *ZMap*. Collimazione manuale delle marche fiduciali.

Per l'Orientamento Esterno di più coppie di fotogrammi si ricorre alla **Triangolazione Aerea**. Partendo dalle immagini vengono prima orientate le singole strisciate e poi la loro composizione in blocchi. Anche in questo caso ci si serve di punti omologhi per appoggiare un fotogramma al precedente: almeno tre punti di legame per ogni area di sovrapposizione, che devono essere collimati su tutte le foto in cui rientrano e altri punti di controllo. Il calcolo della compensazione genera l'OE per i fotogrammi appartenenti alla strisciata corrente. Ripetuta la procedura per ciascuna strisciata si passa all'orientamento delle immagini all'interno del blocco, seguendo gli stessi passaggi.

Dopo l'orientamento si può procedere con la fase di **Restituzione**, sia monoscopica che stereoscopica. Il software si avvale degli snap ad oggetto 2d e 3d e la messa in quota sul modello, gestita attraverso una TrackBall USB, è facilitata da una funzione automatica che porta il cursore sulla quota del DTM o del Modello, secondo la modalità di lavoro.

Il **DEM** (*Digital Elevation Model*) è una rappresentazione cromo-altimetrica raster delle quote di una superficie. In *ZMap* può essere generato da immagini, da un insieme di entità CAD poste in quote diverse o da modelli 3d, dopo aver definito un UCS e averlo posto come corrente⁴⁷.

Dopo la generazione svariati tools consentono di modificare la superficie come una normale immagine raster ed è possibile scegliere il tipo di colore/rappresentazione tra quella geografica, che utilizza colori da cartina geografica, ottimizzata per lavorare su elevazioni territoriali; quella raster, che assegna ad ogni pixel il colore relativo al punto rilevato dal laser scanner nel modello *.vtp di partenza oppure quella a gradiente che consente di personalizzare la gamma di colori.

Le informazioni contenute nei DEM possono essere poi utilizzate per proiettare ortofoto, disegnare sulle immagini, collimare punti di controllo, comparare superfici, ecc.

Un'ortofoto è una fotografia di cui si conoscono le coordinate di riferimento spaziali associate ad ogni pixel, ottenibile grazie ad un raddrizzamento prospettico o ad una proiezione.

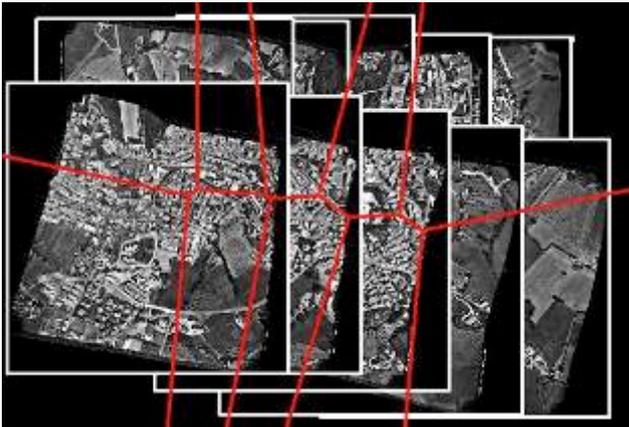
⁴⁶ Per approfondimenti si veda la relativa scheda tecnica sul sito dell'azienda www.menci.com.

⁴⁷ Lo spazio 3D è definito da tre assi cartesiani x, y, z identificati da un'icona collocata sempre in corrispondenza dell'origine. L'UCS (User Coordinate System) consente di impostare all'interno del file dei sistemi di riferimento locali, allineandoli ad un qualunque oggetto (BIANCHINI 2008). Questo spostamento facilita il lavoro su determinati piani, specie quando entriamo nella terza dimensione.

Il **raddrizzamento prospettico** è un metodo di generazione di ortofoto basato su una trasformazione omografica bidimensionale della fotografia⁴⁸ che è in grado di deformare l'immagine come se fosse stata eseguita perpendicolarmente all'oggetto da rilevare, annullando l'effetto prospettico della fotografia. Per avviare la procedura è sufficiente aver posto i punti di controllo tra DEM o nuvola di punti e immagine e aver definito l'UCS rispetto al quale si vuol rettificare l'immagine. Trattandosi di una trasformazione bidimensionale però ogni particolare nella foto sarà modificato secondo la scala e la prospettiva necessaria per il raddrizzamento sul piano di riferimento definito, il che significa che applicato a superfici con dislivelli, il procedimento fornirebbe risultati inconsistenti per scala o prospettiva.

La **proiezione** invece è una trasformazione tridimensionale di un'immagine rispetto ad una superficie (DEM) che produce quindi ortofoto dalle caratteristiche geometriche più rigorose. Sono necessarie al calcolo le informazioni contenute nell'OI e OE e occorre impostare alcuni parametri di proiezione quali la dimensione del pixel a terra, le regolazioni cromatiche, il fattore di ricampionamento etc.

Una volta generata, l'ortofoto verrà salvata con estensione *.tif assieme ad istogrammi e livelli piramidali, mentre le informazioni spaziali saranno contenute in un file *.tfw.



Dalla composizione di più ortofoto deriva un **ortofotomosaico**. Poiché vengono assemblate immagini diverse, occorre trovare il percorso ottimale tra le loro linee di giunzione, attraverso gli algoritmi LPV e PPD a seconda che le immagini siano terrestri o aeree (Fig. 2). Il software offre anche la possibilità di scegliere un'immagine di riferimento per il bilanciamento del colore e per rendere il modello ancora più omogeneo è utile uniformare anche la risoluzione e la dimensione del pixel a terra delle singole ortofoto.

Fig. 2: ZMap. Ortofoto con linee di taglio in rosso per la generazione del mosaico.

Acquisita praticità con questi processi, è stata esaminata *ZMap Laser*, soluzione che consente di editare, unire e analizzare i modelli 3d generati da laser scanner o da *ZScan*. Ogni nuvola può essere ripulita dal rumore, triangolata, georiferita e convertita nei formati standard.

Una volta inserito il modello apparirà sulla finestra CAD in un layer omonimo e sarà trattato come una semplice entità sulla quale si potranno eseguire diverse operazioni oltre a quelle già descritte per il modulo Photo. Potrà ad esempio essere suddiviso e ripulito attraverso una selezione inclusiva o esclusiva che non produce cambiamenti sull'originale, ma ne modifica solo la visualizzazione.

Per quanto riguarda la generazione di DEM dai modelli, occorrerà preventivamente sottoporli a triangolazione, in modo che siano stabilite interconnessioni tra loro. I parametri da impostare oltre al passo, ossia alla risoluzione con la quale sono rappresentati i punti, saranno: il fattore Alpha, che definisce il valore del diametro massimo del cerchio che circonda ciascun triangolo formato da tre punti; il valore di tolleranza, espresso in metri, che definisce la distanza minima tra due punti del modello affinché siano considerati distinti, per evitare triangolazioni ridondanti laddove il modello presenti molti punti vicini tra di loro. Una volta generate, le superfici possono essere ulteriormente elaborate, creando curve di livello o profili. I modelli possono inoltre essere ruotati tramite l'interfaccia 3DOrbit⁴⁹.

Fotogrammetria evoluta: ZScan

Anche per *ZScan* la procedura è stata la medesima di quella seguita per lo studio del prodotto precedente. Oltre alla visione di progetti già realizzati, forniti dall'azienda, per comprendere il funzionamento del software, in questo caso sono state effettuate numerose prove pratiche per esaminare tutto il processo, dall'acquisizione sul campo all'elaborazione in ufficio.

ZScan, infatti, è il software predecessore di *Evo*: si intuisce quindi facilmente la necessità di una conoscenza approfondita del prodotto per gli sviluppi successivi.

⁴⁸ La foto viene considerata come piano di appoggio sul quale stirare l'immagine originale e non come superficie.

⁴⁹ Con comandi da tastiera si può ruotare il modello attorno agli assi x, y, z in maniera distinta o simultanea.

Come già accennato, si tratta di un sistema per la realizzazione di modelli 3D senza laser, che acquisisce ed elabora nuvole di punti RGB, caratterizzati da accuratezza geometrica e fedeltà cromatica, a partire da immagini digitali. Al modulo base si affianca una serie di estensioni specializzate, in grado di adeguarsi al particolare contesto applicativo, al variare della configurazione hardware. Nato innanzitutto per il rilievo, la documentazione e il monitoraggio dei beni culturali, ha trovato poi applicazione in numerosi altri settori grazie alle sue caratteristiche di estrema versatilità, praticità e facilità d'uso. L'architettura, il restauro, l'archeologia, la microanalisi, le perizie giudiziarie, le scienze naturali sono tutti campi in cui la generazione di modelli tridimensionali da immagini porta un miglioramento nei risultati e un'ottimizzazione in termini di tempi e costi.

Procedura Operativa

L'operatività sul campo è molto semplice. Abbiamo già visto di cosa si compone l'attrezzatura (Fig. 3): il treppiede va collocato nella posizione di ripresa; la barra con slitta di precisione si innesta sulla testa con un click; la camera va posizionata e fissata sul carrello tramite un attacco rapido. Dopodiché si può procedere all'esecuzione degli scatti, a sequenze di tre (partendo da sinistra verso destra), dalle posizioni calibrate sulla barra, fino a ricoprire l'intero oggetto da ricostruire, cercando di mantenere sempre una visione frontale dello stesso. Per ottenere un buon risultato è opportuno, durante la fase di acquisizione, tener conto di alcuni accorgimenti. Innanzitutto per quel che concerne l'area del fotogramma si dovrebbe tendere ad una sovrapposizione tra il primo e il terzo scatto di circa il 60%. La baseline (distanza tra il primo e il terzo scatto di una tripletta) dovrebbe essere sempre commisurata a questa percentuale, in modo da non incorrere in problemi di disparità eccessiva (troppa differenza) o al contrario di insufficiente informazione spaziale (eccessiva somiglianza).

La distanza di presa ottimale varia in funzione dell'ottica utilizzata, del livello di dettaglio da ottenere, delle dimensioni dell'oggetto ripreso, della piattezza della superficie che implica una maggiore o minore profondità di campo e della sovrapposizione ottenibile con la lunghezza focale a disposizione. Una stima del dettaglio ottenibile alle varie distanze è reperibile nell'apposita tabella⁵⁰; tuttavia è intuibile come per aumentare l'accuratezza planimetrica basti avvicinarsi all'oggetto, anche se ciò implica la realizzazione di più triplette per coprire la stessa superficie.

L'algoritmo di ricostruzione 3D è favorito da superfici cromaticamente disomogenee; conviene quindi accertarsi che non vi siano vaste aree contigue dell'immagine prive di una significativa variazione di colore. È comunque possibile intervenire, dove possibile, con macchie e adesivi che rompano l'omogeneità cromatica, oppure con luci discontinue proiettate sulla superficie.

Per condizioni ottimali di esposizione poi, sarebbe opportuno evitare forti variazioni di luce sia in intensità che in direzione, tra uno scatto e l'altro dalla stessa posizione.

Per ottimizzare la messa a fuoco di tutti gli elementi della superficie ripresa è opportuno impostare sulla macchina la priorità di diaframmi (A) con numero "F" alto (diaframma molto chiuso, valori da 10 in su). Al chiudersi del diaframma aumenta la profondità di campo, vale a dire la zona correttamente a fuoco prima e dopo il punto di messa a fuoco. La nitidezza dell'immagine dipende anche dalla distanza del soggetto: a parità di lunghezza focale e diaframma utilizzati la profondità di campo diminuisce al diminuire della distanza del soggetto (e viceversa)⁵¹.

Potrebbero rivelarsi problematiche superfici che presentano pattern ripetuti in modo regolare. Un metodo per aggirare il problema è quello di inclinare leggermente la barra per consentire all'algoritmo di ricostruzione di orientarsi meglio.

Infine, le geometrie dispersive e le superfici di oggetti riflettenti sono d'intralcio all'elaborazione. Nel primo caso, infatti, la presenza sul fotogramma di oggetti vicini e lontani crea confusione al momento della ricostruzione: è quindi opportuno definire sempre un soggetto principale.

La criticità del secondo tipo di superficie risiede invece nel cambiamento delle proprietà cromatiche relative alla superficie acquisita, tra uno scatto e l'altro; di conseguenza i punti 3D non potranno essere ricostruiti correttamente. L'effetto si può in parte ridurre cercando di eseguire scatti quando la luce non è troppo forte, utilizzando delle lunghe esposizioni fotografiche o anche fonti di luce diffusa secondarie, contrapposte tra



Fig. 3: Kit ZScan.

⁵⁰ Si veda la tabella "Informazioni sull'accuratezza" in Appendice (p. 45). Secondo la distanza poi si può prevedere l'utilizzo della barra da 500 mm (fino a 6 m) o da 900 mm (fino a 12 m).

⁵¹ Per un approfondimento sulle focali si veda la digressione presentata in Appendice (p. 45).

loro e non frontali alla superficie acquisite in modo da fissare le ombre e i riflessi durante lo spostamento della camera.

Procedura software

Una volta acquisite le immagini, il lavoro di back office può essere completamente automatizzato mediante procedure batch.

Innanzitutto occorre creare un nuovo progetto, specificando se si usano immagini provenienti da una o tre camere digitali⁵² e selezionando il certificato della camera per la gestione delle fotografie.

Si passa così alla workspace per l'**importazione** delle posizioni, ossia delle triplette, composte ciascuna da un'immagine sinistra, una centrale e una destra in modo ordinato, prese da una stessa posizione del cavalletto. In questa fase è possibile utilizzare l'equalizzazione automatica dei colori per ridurre eventuali differenze di esposizione intercorse tra uno scatto e l'altro della tripletta. Si può quindi passare alla workspace successiva, per il processo di **generazione**. Si tratta di una tabella righe per colonne, in cui ogni riga rappresenta una posizione ZScan mentre le colonne indicano i passaggi da seguire (Fig. 4):

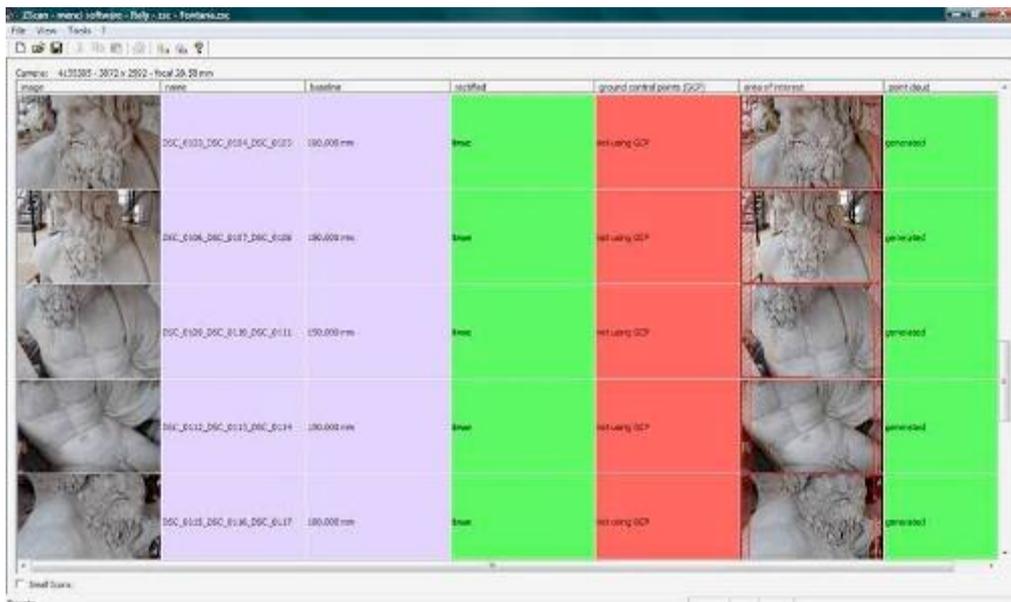


Fig. 4: ZScan. Workspace principale per la generazione dei modelli 3D.

- *Definizione della baseline*: bisogna impostare il valore della distanza totale tra il primo e il terzo scatto della camera all'interno della posizione corrente, specificando l'unità di misura, che deve essere in accordo con quella dei Punti di Controllo eventualmente utilizzati in seguito;
- *Rettifica*: è un procedimento software completamente automatico, per la correzione di imperfezioni di allineamento delle immagini dovute a micro spostamenti del cavalletto o della barra. Viene inoltre calcolata la dimensione del "pixel a terra" (GSD), che rappresenta la risoluzione del modello in termini di distanza media tra un punto 3D e l'altro (espressa nell'unità di misura della baseline);
- *Importazione e collimazione di GCP*: anche se la generazione dei modelli non richiede alcun punto di controllo, se disponibili, è possibile avvalersene per incrementare la qualità geometrica del modello e facilitarne la registrazione;
- *Definizione delle aree di interesse*: per ogni posizione è possibile definire porzioni di immagini che contribuiranno alla generazione del modello. Per ciascuna AOI saranno specificati parametri quali la risoluzione (step) e la riduzione del rumore. Un valore di **step** basso produrrà nuvole di punti definite ma molto dense e "pesanti" da gestire in termini di dimensione dei file generati⁵³. Accanto a questo valore, se la posizione è stata rettificata, apparirà il relativo valore GSD, che può essere usato come riferimento per definire il fattore Alpha della triangolazione moltiplicandolo per 10. Il valore di "Noise reduction" descrive quanto ogni singolo punto 3D è influenzato da quelli circostanti nella

⁵² Nel caso l'acquisizione fosse avvenuta con la strumentazione Zscan Ter, utile ad esempio quando il soggetto è in movimento.

⁵³ Solitamente non è necessario generare modelli 3D molto densi, dato che la comprensibilità del modello è in ogni caso garantita dal dettaglio fornito dalla texture. In genere si imposta un valore di step pari a 10: sarà cioè ricostruito un punto 3D ogni 10 pixel.

valutazione del "rumore", cioè dei punti "sporchi", con errata elevazione. Ad un valore basso corrisponde un confronto con un intorno stretto di punti 3D, viceversa se il valore è alto. Si deduce che se la superficie acquisita è "movimentata" è preferibile considerare un "Noise reduction" basso per favorire la modellazione dei dislivelli e degli interstizi. Se invece la superficie è levigata, conviene mantenere un valore alto per privilegiare la precisione e l'uniformità. Se l'oggetto rappresentato in foto poi, presenta una superficie sufficientemente piatta è possibile orientare ogni area e di conseguenza il modello generato sulla base del piano di riferimento (UCS) interpolato su tale superficie. Se occorre selezionare il soggetto intero o alcune sue parti in modo indipendente dal resto della scena, ci si può servire dei Matte Color⁵⁴;

- *Generazione del modello*: prima di elaborare le immagini, *ZScan* chiederà di specificare se e come triangolare una superficie sulle nuvole generate. Tramite il fattore Alpha è possibile poi intervenire sulla densità dei triangoli: solo i punti tra loro più vicini della soglia Alpha costituiranno un triangolo. Un fattore troppo basso determina una superficie triangolata con piccoli triangoli e molti buchi; viceversa un valore troppo alto porterà a molti triangoli scorretti ma pochi buchi sulla superficie. Un valore ottimale può essere ottenuto moltiplicando per 10 il valore dello step in unità di disegno (GSD). Il check "Full Disparity Estimation" amplia l'area di indagine durante l'analisi della superficie e prende in considerazione anche punti aggettanti o rientranti rispetto all'UCS. Il check "Sparse Point Clearing" costituisce una sorta di filtro sui punti sporchi, privilegiando le geometrie coerenti. Il tempo impiegato per generare ogni singola nuvola può variare in funzione dei valori di step; della dimensione e del numero di AOI; delle qualità cromatiche della superficie modellata; del valore di "Noise reduction"; della presenza o meno del calcolo di triangolazione e dell'attivazione del "Full Disparity Estimation".

Quando un modello è stato generato, dalla relativa posizione è possibile visualizzarlo e gestirlo all'interno di *ZScan* o *Scan View*⁵⁵. Si potrà salvare in formato *.vtp o ASCII, cambiarne le proprietà di rappresentazione (per punti, rete o superficie), scegliere il tipo di visualizzazione (stereoscopica, monoscopica o anaglifica). Un modulo aggiuntivo particolarmente interessante e che si è rivelato molto utile in diversi casi applicativi sperimentati, è *ZBlock*.

Z-Block

È un modulo di estensione che consente di rimontare i modelli 3D generati da *ZScan*. Il risultato è un modello 3D complessivo, all'interno del quale ogni singola nuvola di punti è collocata nella giusta posizione spaziale. Tutto il lavoro è eseguito automaticamente in un processo batch. È possibile inserire opzionalmente nel calcolo punti di controllo acquisiti con tecnologie differenti. La mancata registrazione automatica dei modelli può essere dovuta alle particolari condizioni ambientali o del soggetto (non vi sono sufficienti elementi superficiali che possano essere individuati automaticamente o questi non sono visibili) oppure alle modalità di ripresa. In quest'ultimo caso uno step di rototraslazione attorno al soggetto troppo ampio rende difficile il riconoscimento di elementi osservati da punti di vista troppo differenti (questo effetto è più evidente per le rotazioni a 360° attorno ad un oggetto).

Per realizzare riprese funzionali al Block nel caso di traslazione lineare tra una tripletta e l'altra occorre mantenere una sovrapposizione di almeno il 50% tra le foto centrali delle triplette adiacenti; nel caso di rotazioni attorno ad un oggetto bisogna privilegiare la ripresa frontale, riducendo al minimo le superfici osservate solamente di scorcio. Si eseguono quindi rototraslazioni comprese tra 10° e 25° in funzione del soggetto e dell'ottica utilizzata, in modo tale da rendere le immagini simili, favorire l'individuazione di punti a comune tra le diverse posizioni e la ricostruzione di superfici osservate frontalmente.

Quanto detto finora a proposito di *ZScan* è stato assimilato grazie ai numerosi esempi pratici che di volta in volta hanno presentato situazioni diverse, con questioni e problematiche specifiche, creando un'interessante casistica, sebbene non esaustiva. Ciascuna esperienza viene di seguito esposta in sintesi, riportando gli aspetti principali e soprattutto rimarcando l'utilità avuta per la mia ricerca. Sono brevemente segnalati anche i parametri settati per ogni elaborazione; dove non compaiono è perché ci si è attenuti ai loro valori standard. Nei casi di più tentativi di processamento, sono riportati solo i parametri che hanno portato ad un risultato soddisfacente.

⁵⁴ Utilizzando uno sfondo di colore uniforme e non appartenente al soggetto ricostruito, è possibile impostare il software in modo tale da escludere automaticamente lo sfondo dalla ricostruzione.

⁵⁵ Visualizzatore esterno gratuito di *ZScan*. Consente di prendere delle misure del modello, scarlarlo ed esportarlo in formato ASCII personalizzato. Dispone di una propria documentazione.

Prove operative

Pareti edifici

Per la prima prova pratica è stato scelto un soggetto “standard”, con caratteristiche cioè adeguate ad evidenziare le funzionalità principali del software, senza connotazioni particolari. Si tratta di alcune pareti di edifici, non eccessivamente omogenee nel colore né riflettenti, che sono state rilevate con baseline e distanza di presa diverse e secondo vari parametri di ricostruzione, per meglio apprezzare la differenza di risultati.

PARETE n°1:

Luogo: zona Pratacci, Arezzo
Distanza di presa: 2,5 m
Baseline: 5
Triplette: 2
Step: 10

PARETE n°2:

Luogo: zona Pratacci, Arezzo
Distanza di presa: 2 m
Baseline: 4
Triplette: 2
Step: 10

PARETE n°3:

Luogo: zona Pratacci, Arezzo
Distanza di presa: 3 m
Baseline: 6
Triplette: 3
Step: 10

PARETE n°4 (marmo):

Luogo: zona Pratacci, Arezzo
Distanza di presa: 3 m
Baseline: 5
Triplette: 2
Step: 2

Mura settentrionali di Arezzo

Il rilievo di una porzione di contrafforte è stato utile per sperimentare la sovrapposizione verticale delle immagini e la ricostruzione di due pareti confluenti in un angolo. A livello di elaborazione poi, è stato testato l’uso del “Noise reduction” e del fattore Alpha. Non utilizzandolo, infatti, all’applicazione della texture nella zona della parete laterale prossima all’angolo, il risultato è stato un effetto “spalmato”. È emersa inoltre l’importanza di definire accuratamente le AOI, selezionando solo la parte frontale di ciascuna tripletta.

Luogo: mura settentrionali, Arezzo
Distanza di presa: 6 m
Baseline: 9
Triplette: 12

Step: 10
Noise reduction: “medium”
Alpha: 0.05 .m

Pavimento

Il soggetto è stato scelto per provare l’acquisizione di un piano e la definizione di un UCS. In questo caso la baseline varia secondo l’altezza e la barra va inclinata fino a posizionarsi in maniera perpendicolare rispetto alla superficie da rilevare. Per il resto, la procedura è la medesima delle acquisizioni frontali.

Luogo: zona Pratacci, Arezzo
Distanza di presa: 1,60 m
Baseline: 4
Triplette: 6

Step: 10
Noise reduction: “medium”
Alpha: 0.05 .m

Sito archeologico di Colle di Pionta (AR)

Le acquisizioni hanno interessato tre soggetti: una discarica di pietre, una lastra marmorea decontestualizzata, allettata su tavole di legno poggiate a terra e una zona con fossa e un muretto.

Il primo caso si è rivelato inadeguato alle elaborazioni, perché caratterizzato da una geometria troppo sparsa e discontinua per cui il software non riesce a trovare un piano di riferimento; probabilmente sarebbe stato necessario acquisire più triplette da posizioni più ravvicinate, spostandosi al massimo di 20° tra una posizione e la successiva (Fig. 5).

Gli altri due sono stati degli esempi molto utili per la metodologia di acquisizione a terra e la definizione dell’area da riprendere, che dovrebbe comprendere tutto l’oggetto, comprese le parti più esterne. Le elaborazioni della lastra hanno inoltre consentito di comprendere l’utilizzo della funzione di equalizzazione e dei diversi parametri di ricostruzione (Fig. 6). Per il muro sono stati verificati problemi legati all’esposizione, superati escludendo le zone più critiche.



Fig. 5: Pionta. Vista generale della discarica

DISCARICA
 Luogo: Arezzo
 Distanza di presa: 2 m
 Baseline: 5
 Triplette: 6

LASTRA
 Luogo: Arezzo
 Distanza di presa: 1 m
 Baseline: 2
 Triplette: 7

FOSSA CON MURETTO
 Luogo: Arezzo
 Distanza di presa: 1 m
 Baseline: 3
 Triplette: 7



Fig. 6: Pionta. Particolare della lastra.

Parco del Pionta (AR)

Sono state realizzate due acquisizioni che hanno fornito risultati molto buoni. Si tratta di una parete in muratura con un tratto curvo (Fig. 7) e un pavimento in pietra. La scelta di quest'ultimo soggetto, costituito da pietre di colore bianco e nero, di piccolissime dimensioni, unite a formare motivi geometrici, è stata dettata dalla somiglianza ad un ipotetico mosaico (Fig. 8).

PARETE CURVA
 Luogo: Arezzo
 Distanza di presa: 3,5 m
 Baseline: 8
 Triplette: 5
 Step: 10
 Alpha: 0.05cm



Fig. 7: Parete curva. Modello tridimensionale generato.



Fig. 8: Tratto pavimentale. Ricostruzione tridimensionale.

PAVIMENTO

Luogo: Arezzo

Distanza di presa: 1 m

Baseline: 2

Triplette: 6

Pieve di Sant'Eugenia, Bagnoro (AR)

Il sito ha offerto la possibilità di confrontarsi con diverse situazioni.

Il rilievo di una base di torre campanaria, posta di fronte alla facciata principale dell'edificio religioso, ha permesso di cimentarsi nuovamente con l'acquisizione a terra, questa volta di un oggetto curvo, e con le problematiche connesse alla messa a fuoco. Essendo le immagini fuori fuoco, infatti, non è stato possibile poi procedere alla ricostruzione dei modelli.

Per sperimentare invece una ripresa di un oggetto a 360° e provare diverse distanze di presa è stata scelta un'ara quadrangolare con un piccolo basamento a gradini (Fig. 9). Se ne è dedotto che come linea guida, di certo conviene (laddove possibile) mantenere una distanza minima dal soggetto di interesse, in quanto riprese troppo lontane comportano una risoluzione dell'immagine molto bassa. L'esempio ha inoltre fornito l'occasione, al momento del processamento, di fare considerazioni sull'utilizzo dell'opzione "Sparse Point Clearing" e la scelta dello step di risoluzione. Si è deciso poi, vista la sostanziale uniformità della superficie esaminata, di definire un UCS, che ha infatti portato ad un buon risultato, andando però in conflitto con il comando di Block. Ciò significa che in base alle esigenze, per ogni caso va valutato se utilizzare un piano di riferimento locale e unire i modelli ricostruiti in *ZMap* o meno.

Nella parte posteriore infine, è stata rilevata una parete composta da tre absidi, uno maggiore centrale e due minori laterali: l'esempio è stato utilizzato per verificare i criteri di sovrapposizione verticale, il calcolo della baseline a grandi distanze e in fase di elaborazione, l'utilizzo del Block per un cospicuo numero di immagini. Una tripletta non è stata rettificata, probabilmente per un errore dell'operatore al momento della ripresa, sbagliando la baseline. Una volta creati tutti i modelli non è stato possibile, in un primo momento, procedere all'unione degli stessi, essenzialmente per due motivi: innanzitutto avendo diviso l'elaborazione tra parte inferiore e superiore, per velocizzare i tempi, sono stati impostati anche step differenti per le due parti, il che può essere un fattore critico; in secondo luogo il Block veniva lanciato senza rigenerare i modelli della parte bassa che continuava quindi ad avere come sistema di riferimento un punto diverso rispetto a quello della parte alta. Il secondo tentativo invece è andato a buon fine, utilizzando per tutte le triplette lo stesso passo e rigenerando tutti i modelli in modo che tutti avessero un unico centro di riferimento.

ARA

Luogo: Bagnoro, Arezzo

Distanza di presa: 2 m

Baseline: 5

Triplette: 33

Step: 10

Alpha: 0.05cm

ABSIDI

Luogo: Bagnoro, Arezzo

Distanza di presa: 8 m

Baseline: 11

Triplette: 49

Step: 10



Fig. 9: Ara rilevata con baseline diversa.

Pieve di San Paolo, San Polo (AR)

Un ultimo caso è stato quello della pieve di San Paolo. È stata rilevata una parete absidata (Fig. 10) e il basamento di un monumento (Fig. 11). Nel primo caso il risultato è stato ottimale, operando anche una cernita delle triplete a causa della ridondanza delle immagini.

Nel secondo caso invece si è testato di nuovo lo strumento per l'acquisizione di un oggetto a 360°, spostandosi di circa 10° da una posizione all'altra, cercando di avere sempre un'inquadratura frontale e l'esito delle operazioni è stato molto positivo.

ABSIDE

Luogo: San Polo, Arezzo.

Distanza di presa: 5 m.

Baseline: 7

Triplette: 20

Step: 20



Fig. 10: Ricostruzione tridimensionale della parete absidale.

BASAMENTO

Luogo: San Polo, Arezzo.

Distanza di presa: 1,5 m.

Baseline: 2

Triplette: 36

Step: 10



Fig. 11: Basamento. Risultato della generazione dei modelli 3D.

Fotogrammetria sperimentale: ZScan Evo

Metodologia

Sulla base delle conoscenze acquisite, si è proceduto alla sperimentazione del nuovo software *ZSscan Evo*. Si tratta di una soluzione innovativa per la modellazione 3D che, attraverso processi completamente automatici, consente di creare nuvole di punti a partire da blocchi di immagini. I modelli ottenuti si prestano a tutte le elaborazioni più comuni in campo fotogrammetrico: DEM, ortofoto, ortomosaici, profili, curve di livello, georeferenziazione etc. Numerosi sono i settori applicativi, primi tra tutti l'Archeologia, l'Architettura e i Beni Culturali. Dopo una prima fase di approccio allo strumento per comprenderne la filosofia e i procedimenti, numerose sperimentazioni hanno consentito di approfondirne l'utilizzo, contribuendo in questo modo all'attività di debugging dei software che compongono il pacchetto.

La metodologia seguita è stata quella di testare continuamente il prodotto con lo scopo di individuarne le caratteristiche principali, verificarne la facilità d'utilizzo, precisarne la destinazione d'uso, i settori applicativi e i limiti per poi comunicare i risultati ai tecnici al fine di apportare modifiche e migliorie prima del lancio sul mercato.

Il software, progettato nei laboratori Menci, è stato così immediatamente sottoposto a molteplici indagini, con soggetti particolarmente indicati e altri meno, in modo da poter identificare con chiarezza la destinazione d'uso e non incorrere nel rischio di consigliarne l'utilizzo per casi inadeguati.

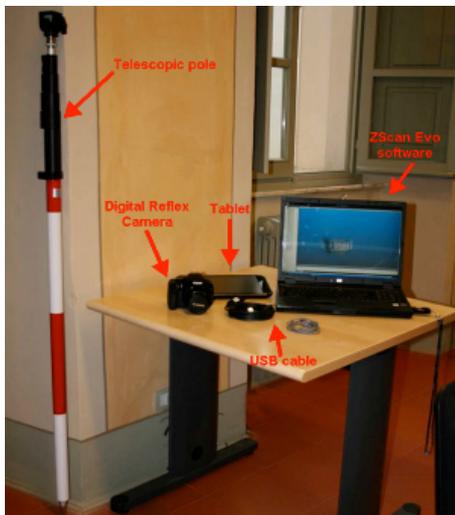


Fig. 12: Kit ZScan Evo.

Strumentazione

Il kit *ZSscan Evo* si compone di: una fotocamera digitale calibrata (presso i laboratori Menci Software), un tablet, un cavo usb con prolunga e un'asta topografica con testa tilt regolabile. A questa si aggiunge anche un portatoplet da agganciare all'asta (Fig. 12).

Il pacchetto software prevede invece l'utilizzo di quattro soluzioni (*Evo Capture*, *Evo Check*, *U-Map* e *Afterwork*) che necessitano di chiave hardware con licenza per l'utilizzo.

Procedure

Segue la descrizione dei procedimenti software dall'acquisizione sul campo ai dati elaborati.⁵⁶

Evo Capture

È un software da utilizzare sul campo associato al tablet (Fig. 13). Consente di visualizzare il *live view* della fotocamera e di memorizzare una serie di scatti a blocco, verificando in tempo reale i requisiti minimi per l'utilizzo delle immagini acquisite.

Per iniziare l'acquisizione, occorre innanzitutto porsi nella parte più esterna dell'area di interesse in modo che anche gli estremi siano ripresi da almeno tre punti di vista, e verificare che la camera sia connessa al tablet⁵⁷. L'inquadratura deve



Fig. 13: Interfaccia di *Evo Capture*.

⁵⁶ Per la parte relativa alla procedura operativa, si rimanda alla sezione dedicata al tutorial *ZScan Evo*. È durante la stesura di questo infatti, che sono state riunite tutte le indicazioni emerse dai vari casi applicativi, qui riportate in Appendice (p. 48).

essere il più frontale/zenitale possibile e occupare almeno i 2/3 della finestra di visualizzazione⁵⁸. Si procede quindi con la sessione di scatti, realizzati con un semplice click nel *live view*, fino a rilevare l'intero soggetto, avendo cura di spostarsi sempre della stessa distanza e mantenendo una percentuale di sovrapposizione tra le immagini dell'80% in orizzontale e del 50% in verticale. Ci si può avvalere dello strumento "Link to Last Image" per essere sicuri che le immagini siano abbastanza sovrapposte.

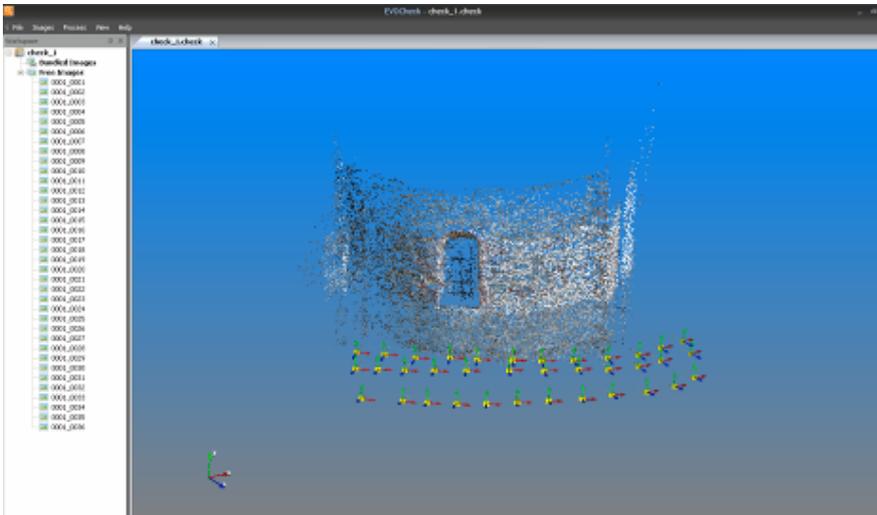


Fig. 14: Interfaccia di *Evo Check*.

automatica, sono: **Finding Features**, la correlazione automatica di **Matching Image** e la compensazione a stelle proiettive (**Bundle Adjustment**). Terminato il processo è possibile visualizzare la nuvola di punti con tutti i centri di presa (Fig. 14); le "Bunded Images", correttamente processate e che quindi hanno contribuito alla costruzione della nuvola e le "Free Images" che invece non sono state legate. Con i comandi da tastiera e mouse è possibile cambiare la visualizzazione, ruotando e zoomando la nuvola di punti.

Evo Check

È un software installato sul notebook o PC da campo, da utilizzare per la verifica preliminare della nuvola di punti ottenuta. Garantisce in tempi rapidi il corretto legame delle immagini catturate prima di lasciare la zona di rilievo.

Una volta acquisite, infatti, le immagini vengono importate in questo software e processate, avendo preliminarmente definito il certificato di calibrazione. Più nello specifico le operazioni, eseguite in maniera completamente

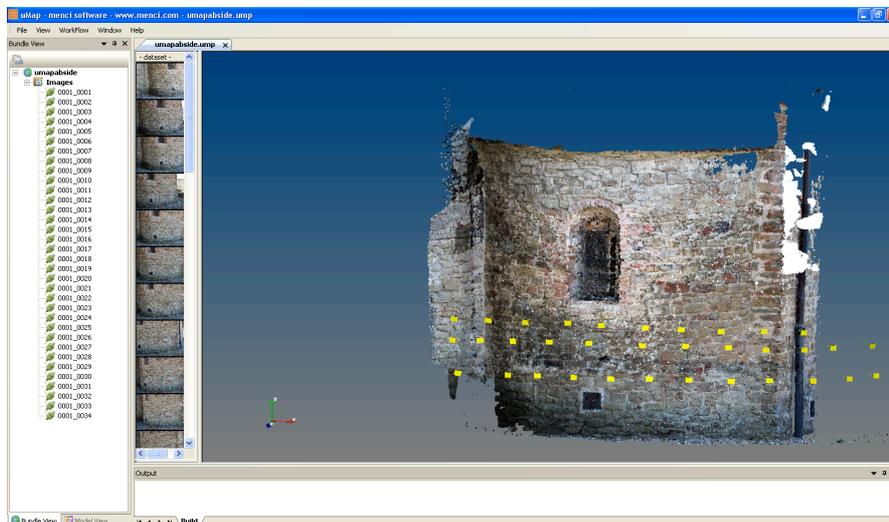


Fig. 15: Interfaccia di *U-Map*.

la funzione di **Reconstruction** (Fig. 15). Questa può essere applicata a tutte le immagini o ad una selezione di esse, nel caso vi sia molta sovrapposizione, per evitare ridondanze e tempi lunghi di esecuzione. I valori di ricostruzione (accuracy level e step) sono parametrizzabili.

Ne risultano modelli che non richiedono moduli aggiuntivi di accorpamento, come invece avveniva per *ZScan*. È inoltre possibile inserire GCP e generare la **mesh**⁵⁹ di alcuni modelli selezionati o di tutti. Una

U-Map

È il software per il processamento e la ricostruzione di nuvole di punti RGB a densità parametrizzabile. Consente la visione complessiva dei modelli 3D reciprocamente orientati. Per ogni modello viene prodotta una texture RGB ad alta definizione.

Il work flow di *U-Map* è il medesimo di *Evo Check*, sebbene con criteri più stringenti che consentono di

restituire punti meno sporchi e soprattutto con l'aggiunta

⁵⁷ L'operazione è completamente automatica.

⁵⁸ In caso contrario si può provvedere spostando e/o inclinando l'asta e/o la camera.

⁵⁹ Una *mesh* è una superficie frammentata di tasselli triangolari connessi mediante i bordi. La generazione ottimale della *mesh* è un passo fondamentale per la corretta elaborazione della superficie. (MENCI – CABRUCCI 2001).

volta creati, i modelli *.vtp possono essere ulteriormente elaborati in *ZMap* secondo le funzionalità già descritte (DEM, profili, ortofoto, ortomosaici).

Afterwork

Si tratta di un software di post produzione, che rielabora e semplifica (dove possibile) i modelli 3D prodotti da *U-Map*. È in grado di riconoscere ed eliminare automaticamente le zone di sovrapposizione tra i modelli, attraverso l'opzione di "Mesh simplification" e ne rende omogenee e bilanciate le texture. Dopo aver selezionato i modelli *.vtp si può infatti scegliere un'immagine che rappresenti colorimetricamente le altre. Altre opzioni parametrizzabili sono: la "Mesh denoising" per ridurre i fattori di rumore e disturbo, e la "Resample texture". È inoltre possibile esportare il risultato in un unico modello 3D *.obj comprensivo di texture RGB, ridistribuibile insieme a visualizzatori open source.

Prove operative

Fontana, Villa Guillichini (AR)

Si tratta di una parete con una fontana centrale che delimita il giardino all'italiana della Villa Guillichini. Già questa prima esperienza è servita per annotare punti forti e deboli dello strumento. Il maggior ostacolo è la scarsa visibilità dello schermo del tablet, fortemente riflettente; anche la necessità di due operatori (uno per la camera e l'altro per il tablet) non facilita le operazioni. Lo stesso soggetto è stato rilevato prima con un obiettivo da 1.24 mm e poi da 1.28 mm per valutarne eventuali differenze.

Luogo: località Tregozzano, Arezzo

Distanza di presa: 3 m

Immagini: 26

Point cloud: 2.090.180

Pieve di San Paolo, San Polo (AR)

È stato utilizzato uno dei soggetti già rilevati con tecnologia *ZScan* con l'intento di apprezzarne somiglianze e differenze. Si tratta del basamento del monumento davanti la facciata principale della chiesa. È stato acquisito a 360° con l'80% di sovrapposizione tra uno scatto e il successivo.

Non è stato però possibile procedere con la sperimentazione perché dopo un certo numero di scatti, pressappoco sempre lo stesso, la camera risultava non connessa, interrompendo la sessione. Si trattava evidentemente di un bug del programma che è stato tempestivamente sistemato.

È stata poi sperimentata una ripresa a terra, del marciapiede laterale della chiesa, ma pur seguendo tutte le indicazioni opportune, il software andava in blocco.

Pavimento, Villa Guillichini (AR)

Memori delle precedenti problematiche riscontrate, questo esempio è servito per verificare se il problema delle riprese a terra dipendesse dall'esposizione. È stata così rilevata una parte di pavimento in ombra, non incorrendo in nessun tipo di problema, mentre per un tratto caratterizzato da ombra/luce il software è andato in blocco.

Pieve di Santa Maria, Chiassa (AR)

Il rilievo ha interessato l'abside, una parte di campanile e un tratto di marciapiede nella parte posteriore dell'edificio.

Nel primo caso non sono stati riscontrati problemi di acquisizione; è stato anzi un ottimo esempio di combinazione di soggetti aggettanti e rientranti. In questi casi la distanza di presa non costituisce un problema, nel senso che si può procedere con il rilievo, purché il cambiamento sia graduale e mai netto. L'importante è seguirne sempre la geometria e rispettare i criteri di sovrapposizione.

Anche l'acquisizione del campanile ha dato un buon risultato. Per il marciapiede invece sono stati riscontrati gli stessi ostacoli dei casi di rilievo a terra precedenti: si è così deciso di scattare senza attivare l'opzione "Link to Last Image", ma al momento del processamento non è stato possibile proseguire, probabilmente a causa della poca sovrapposizione tra le immagini scattate.

ABSIDE

Luogo: località Chiassa, Arezzo

Distanza di presa: 3 m

Immagini: 33

Modelli ricostruiti: 17

Point cloud: 1.829.185

CAMPANILE

Luogo: località Chiassa, Arezzo

Distanza di presa: 4 m

Immagini: 36

Chiesa di Santa Maria Assunta, Giovi (AR)

È stata rilevata la facciata secondaria della chiesa, provvedendo ad alzare e abbassare l'asta per mantenere costante la linea di presa. La sessione è stata abbastanza lunga, ma non è stato possibile portare a termine l'acquisizione per problemi di carica della batteria del tablet.

Muri, Villa Guillichini (AR)

Sono stati rilevati due muri, uno sul lato della strada, accanto all'accesso secondario della villa e un altro interno, nella parte posteriore.

Nel primo caso la distanza di presa è stata probabilmente eccessiva (c'era la strada di mezzo e utilizzando l'asta, un avvicinamento avrebbe comportato una riduzione della visibilità della base del muro). Questo ha comportato degli scatti in cui l'oggetto da rilevare occupava solo una piccola parte dell'intero fotogramma e quindi in fase di elaborazione, si è riusciti a ricostruire ben poco.

Nel secondo caso invece si è cercato di mantenere sempre la stessa distanza e il risultato è stato abbastanza soddisfacente.

MURO ESTERNO

Luogo: località Tregozzano, Arezzo

Distanza di presa: 4 m

Immagini: 28

MURO INTERNO

Luogo: località Tregozzano, Arezzo

Distanza di presa: 2 m

Immagini: 22

Point Cloud: 6.399

Base in pietra, Villa Guillichini (AR)

All'interno del giardino all'italiana è stata rilevata una base in pietra di forma circolare, con funzione decorativa. È stata utilizzata una pellicola antiriflesso per il tablet che ha notevolmente migliorato la visibilità. La ricostruzione del modello è stata però molto parziale, probabilmente a causa di repentini cambiamenti di esposizione, nonostante le immagini fossero fin troppo sovrapposte, per rendere graduale il passaggio luce/ombra.

Luogo: Località Tregozzano, Arezzo

Distanza di presa: 1,50 m

Immagini: 21

Modelli ricostruiti: 16

Point Cloud: 8.601

Fortezza, Arezzo

Due sono stati i soggetti acquisiti. Innanzitutto una parete in pietra, con angolo: durante la sessione ci sono stati problemi di *link image* solo al momento di acquisizione della parte angolare, sicuramente dovuti al cambiamento di esposizione. Alcune delle immagini scattate sono infatti risultate sopraesposte e quindi non ricostruibili (Fig. 16). Nel secondo caso invece è stato rilevato un basamento a terra di forma rettangolare, e il risultato è stato soddisfacente.

PARETE CON ANGOLO

Luogo: Arezzo.

Distanza di presa: 1,50 m

Immagini: 63

Modelli ricostruiti: 34

Point Cloud: 18.329

BASAMENTO

Luogo: Arezzo.

Distanza di presa: 1.80 m

Immagini: 41

Point Cloud: 24.177

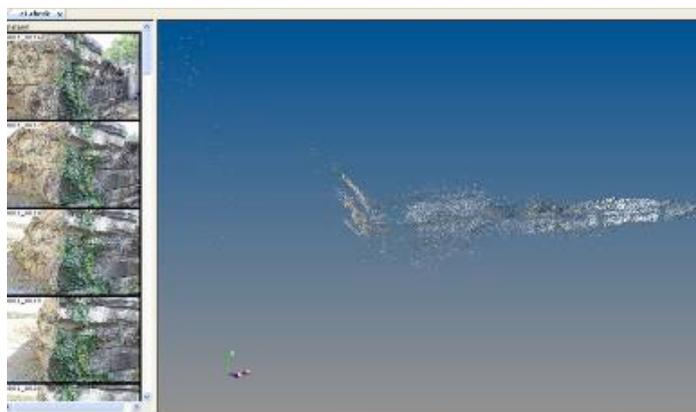


Fig. 16: Nuvola di punti ricostruita con *Evo Check*.

In seguito sono stati approfonditi altri aspetti, fondamentali per l'utilizzo ottimale del prodotto. Innanzitutto sono stati sperimentati i software dedicati al processamento e post-processing dei dati una volta rientrati dalla fase di acquisizione (*U-Map* e *Afterwork*), le successive elaborazioni in *ZMap* e altri applicativi come *Site Manager*, per avere una visione d'insieme delle potenzialità della soluzione proposta. Sono stati poi effettuati rilievi con obiettivi e camere diverse, per valutarne la possibilità di impiego in associazione ad *Evo*. Da qui è infine scaturita una digressione sulle focali, proprio per approfondire la conoscenza teorica in materia.

Muro esterno, Villa Guillichini, Arezzo

Si tratta del muro esterno, con abside, del giardino all'italiana della villa. È un buon esempio per spiegare come sia necessario seguire sempre la geometria dell'oggetto di interesse, avendo cura di avere sempre una visione frontale dell'oggetto, anche se questo significa andare avanti e poi retrocedere quando ci si trova nella parte angolare. Altre considerazioni hanno riguardato l'importanza di decidere preventivamente la distanza di presa, eventualmente inclinando anche la camera, in modo che il soggetto occupi sempre almeno i 2/3 del fotogramma. Anche in questo caso l'esposizione ha causato qualche problema. Tuttavia il risultato della ricostruzione è soddisfacente.

Luogo: località Tregozzano, Arezzo

Distanza di presa: 3 m

Immagini: 26

Modelli ricostruiti: 19

Point Cloud: 16.965

Pavimento, Villa Guillichini, Arezzo

Il soggetto è stato acquisito in due strisciate, tenendo l'asta leggermente inclinata in modo da non riprenderla nelle foto. I modelli ricostruiti sono di buona qualità (Fig. 17).

Luogo: località Tregozzano, Arezzo

Distanza di presa: 1.50 m

Immagini: 17

Modelli ricostruiti: 14

Point Cloud: 48.851

Anfiteatro, Arezzo

È stato rilevato un basamento in due strisciate, tentando di mantenere sempre la stessa distanza tra uno scatto e l'altro. Il risultato delle elaborazioni è stato molto soddisfacente (Fig. 17).

Sempre all'interno dell'anfiteatro è stata acquisita una volta, caso applicativo fino a questo punto mai considerato. Dopo qualche esitazione sulla distanza di presa e il criterio di avanzamento per gli scatti, si è proceduto seguendo l'andamento della parete, cercando di mantenere sempre una visione frontale. Anche in questo caso il risultato è stato buono (Fig. 18).

BASAMENTO

Luogo: Arezzo

Distanza di presa: 1 m

Immagini: 35

Modelli ricostruiti: 28

Point Cloud: 1.460.567



Fig. 17: Vista frontale del modello 3D del basamento.



VOLTA
 Luogo: Arezzo
 Distanza di presa: 1.60 m
 Immagini: 20
 Modelli ricostruiti: 18
 Point Cloud: 926.336

Fig. 18: Vista frontale della volta ricostruita.

Pieve di Santa Maria, Chiassa (AR)

Sono state utilizzate le acquisizioni dell'abside per le fasi di post-processing. Una volta ricostruiti in *U-Map*, i modelli sono stati importati in *ZMap*, puliti e triangolati (con passo pari a 0,1). È stato generato ed editato il DEM, le curve di livello e i profili, le ortofoto e l'ortomosaico (Fig. 19). I modelli sono stati georiferiti applicando l'opzione di rototraslazione "similarity" che mantiene la geometria del modello.⁶⁰

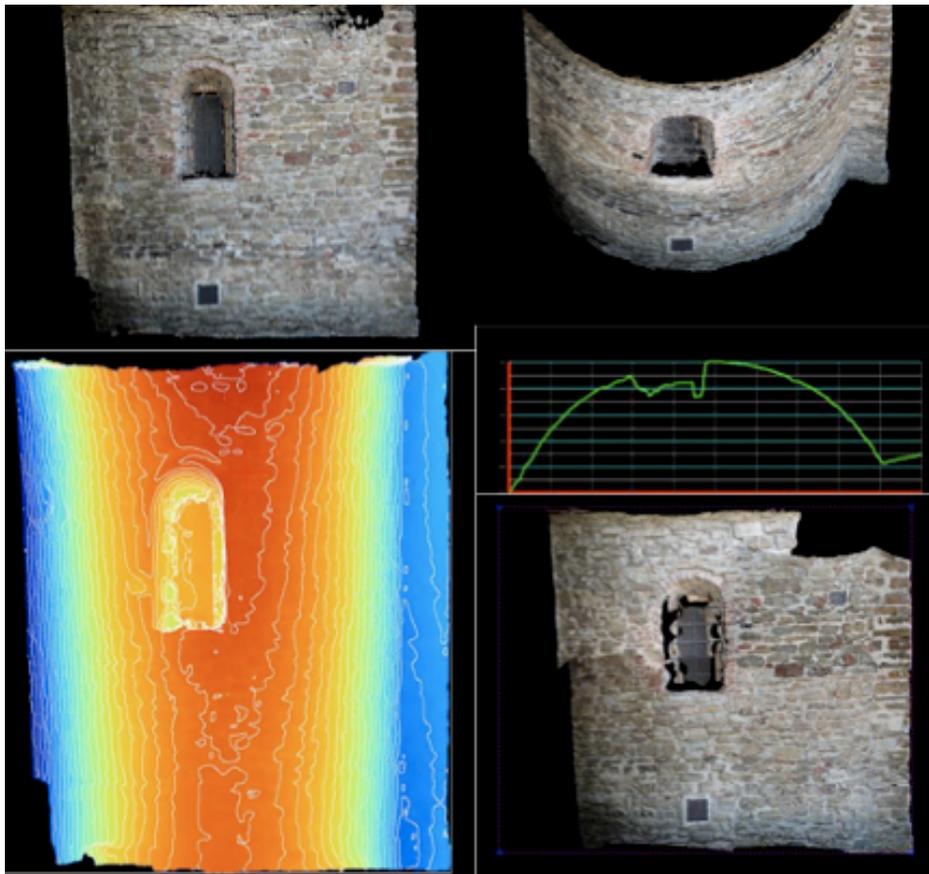


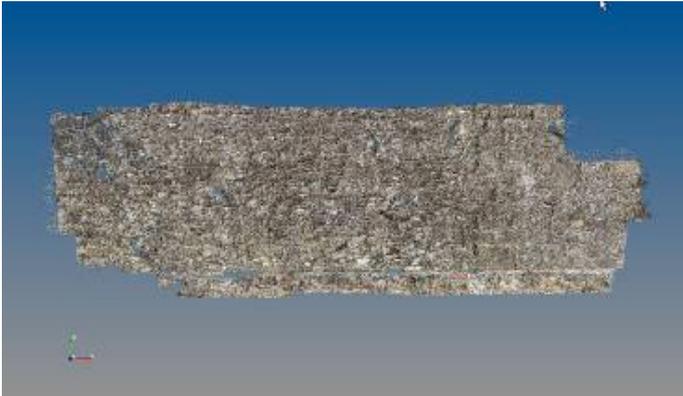
Fig. 19: Elaborazioni dell'abside. In alto da sinistra: ricostruzione tridimensionale e vista dall'alto; curve di livello con base cromaltimetrica, profilo e ortofotomosaico.

Mura settentrionali di Arezzo

Durante questa prova operativa si è cercato di tener conto di tutte le operazioni consigliate, preliminari alla fase di acquisizione vera e propria aiutandoci con la tabella "Covering Area": scelta della distanza di presa, dell'esposizione e messa a fuoco della camera, preparazione della strumentazione, con tanto di fettuccia a

⁶⁰ Altre opzioni di trasformazioni sono: "Affine" (che però deforma il modello, in quanto le scale x, y, z risultano completamente diverse tra loro) e "Rigida" che produce la rototraslazione ma non agisce sulla scala.

terra per mantenere sempre la stessa distanza di spostamento. Sono stati collocati anche 2 target agli estremi dell'area ripresa e misurati in vista del loro utilizzo in fase di messa in scala del modello tridimensionale. I risultati sono stati molto soddisfacenti (Fig. 20).



Luogo: Arezzo
 Distanza di presa: 6 m
 Immagini: 33
 Modelli Ricostruiti: 22
 Point Cloud: 475.406

Fig. 20: Vista frontale della ricostruzione 3D del tratto di mura cittadine.

Pieve di San Paolo, San Polo (AR)

È stata rilevata una parte della facciata principale della chiesa, sperimentando il portatabled, che si è rivelato estremamente pratico, consentendo di procedere alle acquisizioni anche da soli.

Luogo: San Polo, Arezzo
 Distanza di presa: 3 m
 Immagini: 12

Modelli Ricostruiti: 9
 Point Cloud: 257.525

Sono state in seguito effettuate delle prove con oggetti di piccole dimensioni, utilizzando un obiettivo da 60 mm, che consente la messa a fuoco a distanza ravvicinata, con un diaframma piuttosto chiuso (f16 e f18) e aiutandoci con un cavalletto per evitare l'effetto mosso.

Frammento in pietra

L'oggetto è stato rilevato, procedendo per rotazioni minime e facendo attenzione a non spostarlo mai. E' stato posizionato uno sfondo neutro per evitare fattori di disturbo. La modalità di scatto è stata impostata in automatico, in modo che la pressione del dito sul pulsante di scatto non provocasse effetti di micro mosso.

Distanza di presa: 30 cm
 Immagini: 16

Modelli ricostruiti: 10
 Point Cloud: 242.267

Frammento di lastra in marmo

Il risultato della ricostruzione è un po' rumoroso, ma sicuramente promettente (Fig. 21).

Distanza di presa: 30 cm
 Immagini: 13
 Modelli ricostruiti: 11
 Point Cloud: 909.213



Fig. 21: Frammento di lastra ricostruito. Vista frontale.

Duomo, Arezzo

Il contesto è stato utilizzato per sperimentazione micro e macro. Partendo dalla facciata laterale (Fig. 22), è stata poi acquisita un'iscrizione collocata sulla parte sinistra della stessa (Fig. 23). In entrambi i casi sono stati ottenuti buoni risultati.

FACCIATA

Luogo: Arezzo

Distanza di presa: 8 m

Immagini: 22

Modelli Ricostruiti: 21

Point Cloud: 1.853.122



Fig. 22: Duomo di Arezzo. Da sinistra: distanza di presa per il rilievo e vista frontale della facciata ricostruita.



Fig. 23: Distanza di presa per l'acquisizione dell'iscrizione.

ISCRIZIONE

Luogo: Arezzo

Distanza di presa: 30 cm

Immagini: 94

Fontana, Villa Guillichini, (AR)

Il soggetto, già precedentemente rilevato, è stato acquisito nuovamente con una macchina fotografica Sony con touch screen, per valutarne i risultati (Fig. 24).

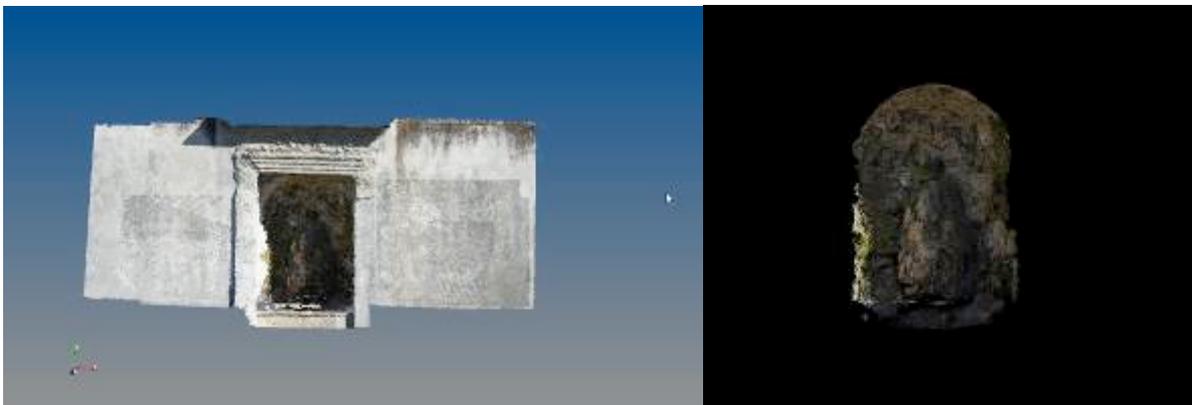


Fig. 24: Vista frontale tridimensionale della fontana e particolare.

Site Manager

Per concludere questa fase di approfondimento è stato analizzato il software *Site Manager*. Si tratta di uno strumento attualmente in uso, per la consegna dei dati elaborati al cliente. È un ambiente grafico di visualizzazione, rapido e intuitivo, da utilizzare per presentazioni dei dati 3D ma anche per la loro archiviazione e gestione.

Consente inoltre di arricchire il risultato finale integrando i dati provenienti dalle singole immagini originali e dal relativo modello 3D generato. La possibilità di fondere insieme le informazioni contenute in modelli 3D, link a risorse web, immagini, ortofoto, vettoriali cad e media di vario tipo rende il dato completo e chiaro per il fruitore finale.

È destinato alla gestione di dati riguardanti: cartografia, restauro, beni culturali, archeologia, documentazione, divulgazione culturale, analisi dissesti geologici. *Site Manager* ha natura modulare e offre caratteristiche diverse in funzione delle necessità dell'utente finale:

- generazione dei data stream gestiti da *Site Manager* (*.zstp) da nuvole di punti in formato binario *.vtp o ASCII testuale;
- esecuzione di misure 2D/3D sui modelli;
- selezione del tipo di rappresentazione dei modelli 3D (RGB, elevazione, intensità) e variazione della dimensione del pixel a schermo;
- possibilità di collegare il modello 3D con link a risorse web, altri modelli, testi, media, immagini, ortofoto e vettoriali CAD che ne arricchiscono la capacità descrittiva;
- visualizzazione, filtraggio e selezione delle immagini orientate relative al dato 3D, per un rapido abbinamento modello-immagine;
- visualizzazione di istogrammi (rappresentazioni grafiche continue di una distribuzione in classi), note e orientamenti delle immagini incluse nel progetto;
- visualizzazione di texture raster ad alta definizione in sovrapposizione al modello 3D nuvola di punti;
- possibilità di esaminare ortofoto e vettoriali relativi al progetto. I vettoriali possono essere proiettati e visualizzati contestualmente al modello 3D;
- gestione intuitiva dei layout delle finestre.

Conclusione di questa fase di sperimentazioni è stata la stesura dei tutorial dei software della soluzione *ZScan Evo*.

Nello specifico mi sono occupata della redazione dei testi in file *.doc poi confluiti in un apposito programma per crearne l'interfaccia. La struttura seguita è stata la seguente:

- *Zscan Evo*: presentazione, informazioni per gli scatti, operazioni preliminari;
- *Evo Capture*: avvio, procedura di acquisizione;
- *Evo Check*: avvio, work flow;
- *U-Map*: avvio, work flow;
- *Afterwork*: procedura;
- Post processing;
- Comandi;
- Credits;

Per la redazione sono stati utilizzati sia i tutorial di software in commercio, in modo da mantenere un'impostazione coerente con gli altri prodotti dell'azienda, sia, soprattutto, le informazioni ricavate dalle varie esperienze.

L'utilità del mio coinvolgimento in questa fase risiede nella originalità del punto di vista offerto, molto vicino a quello dell'utente più che a quello dello sviluppatore. Seguendo un'impostazione puramente tecnica si corre infatti il rischio di dare per scontato informazioni preziose a chi invece si avvicina allo strumento per la prima volta. È sicuramente un valore aggiunto quindi, fornire una visione più user-friendly delle procedure, in modo da realizzare un vero e proprio prontuario, piuttosto che un elenco di comandi da eseguire.

Per lo stesso motivo si è scelto di riportare in appendice, solo la sezione riguardante le informazioni per gli scatti e le operazioni preliminari, che bene rendono l'idea del tipo di lavoro svolto.

Un caso applicativo: il sito archeologico di San Genesio

Dopo aver acquisito sufficiente consapevolezza dello strumento e delle sue potenzialità, il progetto ha previsto un'attività di rilievo in un sito archeologico, per verificare l'utilità e l'applicabilità della soluzione *ZScan Evo* in tale settore, per evidenziarne pregi e difetti rispetto ad altre metodologie di rilievo. Il sito target scelto per la sperimentazione è quello di San Genesio, (Fig. 25) nel comune di San Miniato (PI)⁶¹.

Un po' di storia

La ricerca archeologica è stata intrapresa nel 2001 da un'equipe diretta dal professor Francovich e dal professor Federico Cantini, per conto del Dipartimento di Archeologia e Storia delle Arti dell'Università di Siena, del Museo Archeologico e della Ceramica di Montelupo Fiorentino e del Comune di San Miniato, in

⁶¹ Per approfondimenti sul sito, sulla strategia d'indagine e la sequenza insediativa si vedano: CIAMPOLTRINI 1995; CANTINI 2001; CANTINI 2005; CANTINI 2005 (b); CANTINI 2006; CANTINI – SALVESTRINI 2010; CANTINI c.s. Altre informazioni sono reperibili all'indirizzo web: <http://www.paesaggimedievali.it/luoghi/genesio/index.htm>

accordo con la Soprintendenza Archeologica della Toscana. Tuttora in corso, sono state successivamente coinvolte nelle indagini anche altre Università come quelle di Pisa e Lecce.

Le fonti scritte attestano dal VII secolo l'esistenza di una pieve nata all'incrocio delle principali vie di comunicazione dell'epoca⁶². Lo scavo ha consentito di chiarire le dinamiche ed i processi che portarono alla sua formazione definendone le forme assunte dalla nascita all'abbandono, le implicazioni economiche e sociali e in termini di storia dell'insediamento.



Fig. 25: Viste panoramiche dell'area di scavo.

La frequentazione dell'area è stata così retrodatata al IV-III secolo a. C, quando è attestata una piccola capanna circolare con materiali etruschi.

Per l'età repubblicana non sono stati rinvenuti edifici, ma numerosi reperti fanno presupporre la continuità insediativa. I primi resti di strutture in muratura iniziano a comparire con la media età imperiale: potrebbe trattarsi della *pars rustica* di una villa, attestata da ricognizione nel campo limitrofo, o una *mansio*.

Tra la seconda metà del VI e gli inizi del VII secolo, dopo l'abbandono del nucleo insediativo romano, si colloca una grande necropoli con tombe a cappuccina, fosse terragne semplici e fosse delimitate da embrici alla testa e ai piedi del defunto.

Successivamente viene realizzata una struttura muraria a pianta quadrangolare, interpretata inizialmente come mausoleo e in seguito come torre, inserita in un circuito murario con aggere esterno. Sempre della prima metà del VII secolo sono alcune strutture produttive (una fornace da ceramica e un forno per il ferro), poi sostituite da fasi agricole.

Nella seconda metà dello stesso secolo la chiesa di Lucca sfrutta l'area per impiantarvi una grande chiesa con pianta a "T" e relativo cimitero e nel periodo seguente la conformazione sarà quella con tre navate e tre absidi, per una lunghezza di 35 metri, con area cimiteriale e fossato a recingere l'intera area ecclesiastica.

Nella prima metà dell'XI secolo la chiesa viene ampliata di una campata in facciata, si ricostruiscono le fondazioni dei sostegni delle arcate che scandiscono le navate e si realizza una cripta ad oratorio. Nello stesso periodo vengono costruiti intorno un chiostro, un pozzo centrale e la canonica. Questo nuovo complesso religioso ha intorno a sé un borgo fatto di case con pareti in terra e copertura in coppi. Nel 1248 poi il borgo fu incendiato e raso al suolo dagli abitanti del castello di San Miniato, estromettendo Lucca dal controllo di questa importante area del Valdarno.

La ricostruzione della diacronia insediativa è stata completata da vari tipi di analisi realizzate nel corso degli anni e riguardanti l'archeozoologia, la paleobotanica, l'antropologia e la paleopatologia, la geoarcheologia e diverse indagini archeometriche.

Prima di passare alla descrizione dell'attività di rilievo vera e propria si ritiene opportuno soffermarsi inoltre sulla gestione dei dati di scavo, in modo da poter poi confrontare i risultati ottenuti dalle diverse metodologie di rilievo.

San Genesisio ha fornito sin dall'inizio una grande quantità di dati, raccolti in tipi di documentazione molto differenti. È stata così elaborata una soluzione che permettesse di relazionare e interrogare tutte le informazioni disponibili, in uno spazio dotato di coordinate geografiche. Il software Autodesk Map 3D ha consentito la creazione di una piattaforma GIS tridimensionale dello scavo e del territorio circostante; alle

⁶² Il sito viene attestato per la prima volta nell'anno 715 d.C. Quando «ad ecclesie Sancti Genesisii, in uico qui dicitur Uualari», i vescovi di Fiesole, Pisa, Firenze e Lucca, con un messo del re Liutprando si riuniscono in assemblea per dirimere la controversia tra i vescovi di Siena ed Arezzo per il controllo di alcune chiese e monasteri della diocesi aretina. Almeno a partire dal 763 l'ecclesia doveva aver poi assunto la funzione di pieve, come attestato in altri documenti.

rappresentazioni grafiche delle entità topografiche e archeologiche è stato associato un database. I rilievi delle singole unità stratigrafiche sono stati realizzati con stazione totale, strumento che consentendo la registrazione tridimensionale di punti nello spazio, permette di rilevare con estrema esattezza la stratigrafia. Le entità archeologiche sono quindi oggetto di misure, dal perimetro all'andamento della superficie e il volume. Per la caratterizzazione di piani di vita, murature e crolli sono state scattate fotografie, il più possibile zenitali, che poi sono state raddrizzate⁶³ e posizionate sul rilievo informatizzato, per essere vettorializzate. I vantaggi di questa metodologia risiedono innanzitutto nella velocità (la rimozione degli strati e l'informatizzazione dei rilievi avviene in tempi brevi); la precisione (lo scarto di errore è minimo rispetto ad un rilievo manuale); la quantità dei dati rilevabili; la corretta e completa gestione di tutte le informazioni e la loro analisi incrociata.

Per quanto riguarda la campagna di scavo 2011, le indagini hanno messo in luce un sistema di canalizzazione, già evidenziato dalle indagini magnetometriche, che sembra seguire uno schema che riprende quello di un asse di centuriazione. Due sono state le aree scavate, entrambe rilevate con metodologia *ZScan Evo*.



Fig. 26: Vista generale dell'area 35000.

L'area 35000 (Fig. 26) si trova a Nord-Est dell'area di scavo. È stato indagato un sistema di canalizzazione (US 35071) con andamento Sud-Nord composto da lastre di pietra (US 35062) che convogliavano l'acqua all'interno del fossato (Est-Ovest) che cingeva tutta l'area ecclesiastica. La struttura viene poi parzialmente spoliata. La cronologia è ancora incerta in quanto i materiali sono ancora in fase di studio.

L'area 39000 si trova nella porzione Sud-Est dell'area di scavo (Fig. 27). La stratigrafia si compone di 3 periodi il primo dei quali è rappresentato dalla costruzione di una canaletta in pietra (Est-Ovest) che dalla cripta convogliava l'acqua in eccesso verso un fossato (Nord-Sud).

Viene successivamente ricavato un altro canale con direzione Est-Ovest composto da una canaletta in muratura in corrispondenza della zona di sbocco nel fossato Nord-Sud; contemporanea sembra essere la costruzione di un pilastro di forma rettangolare (US 39052), sulla sponda occidentale del fossato, ancora di incerta interpretazione e di altre due canalette, una in mattoni e una in ardesia (US 39035), che con un andamento Sud-Nord convogliavano l'acqua nel canale Est-Ovest. Al momento l'area sembra essere abbandonata contemporaneamente alla distruzione del borgo (1248) e all'abbandono dell'area ecclesiastica.

Vengono di seguito riportati i momenti essenziali dell'esperienza con la descrizione dettagliata delle diverse fasi di lavoro, dall'acquisizione sul campo alle elaborazioni in ufficio.

La progettazione del lavoro è stata senza dubbio fondamentale: fattori di natura diversa (conformazione del terreno, dimensioni dell'area ecc.) influenzano infatti la scelta della strategia da applicare e i parametri da impostare.

Dopo aver avuto cura di apprestare tutta la strumentazione all'utilizzo, controllando lo stato di carica del tablet e della camera, mi sono recata sul luogo dell'attività.

Per ciascuna delle due aree sono state innanzitutto scattate delle foto generali, per contestualizzare il rilievo e avere una visione d'insieme dell'ambiente indagato. Sono state poi utilizzate 9 mire per ogni area e misurate tutte le distanze, compresa la diagonale e i vari dislivelli (Tab. 3 e Tab. 5), determinando con la tabella "Covering Area" le impostazioni delle riprese (distanza di presa, strisciate e scatti da effettuare). Una fettuccia metrica a terra ha



Fig. 27: Vista generale dell'area 39000.

⁶³ Le foto vengono raddrizzate con un software specifico, Archis, indicando due linee di fuga orizzontali e due verticali e un rapporto noto tra due lunghezze misurate sul campo.

consentito di rispettare sempre la stessa distanza tra uno scatto e l'altro. Camera e asta sono state inclinate in modo da avere inquadrature zenitali.

Area 39000

Valutando l'esposizione della camera, si è preferito aspettare una situazione in cui le ombre fossero maggiormente verticali, procedendo al rilievo nelle ore centrali della giornata.

L'acquisizione è iniziata in senso Est-Ovest, con una prima strisciata all'esterno dell'area di scavo, per poi procedere gradualmente verso l'interno.

Sono state riscontrate delle difficoltà logistiche: tenendo l'asta abbastanza alta è stato necessario utilizzare la prolunga del cavo USB che collega la camera al tablet, ma più volte si è distaccato, comportando la fine automatica della sessione in atto. Il disguido, puramente tecnico, non ha però compromesso in nessun modo la ricostruzione dei modelli (è bastato infatti importare sul software più sessioni nello stesso progetto, lanciando poi i processi per tutte le immagini). Altro ostacolo è stato costituito all'inizio, dal cambio repentino di quota tra la sezione all'esterno e all'interno. Il dislivello qui, infatti, è di circa 1,10 m e nonostante l'asta sia stata alzata per mantenere costante la distanza di presa, con il "Link to Last Image" attivo non è stato possibile continuare a scattare. La soluzione è stata quella di tenere una sovrapposizione verticale maggiore tra una strisciata e l'altra in modo da proseguire con l'acquisizione: questo ha comportato sicuramente un maggior numero di foto scattate, ma al momento dell'elaborazione è stato sufficiente scartare quelle ridondanti. Un'altra possibilità sarebbe stata quella di disattivare la funzione di *link image*, assicurandosi che fossero rispettati i criteri di sovrapposizione.

I punti delle mire sono stati rilevati anche a stazione totale in modo da poterle utilizzare come GCP per la georeferenziazione.

Subito dopo l'acquisizione, le immagini sono state importate su *Evo Check*. L'elaborazione ha richiesto tempi abbastanza lunghi (circa 3 ore) ma visto il numero di immagini, comunque non eccessivo. Ad una prima valutazione il risultato sembra molto soddisfacente, la nuvola di punti molto densa, anche se con diversi punti sporchi (Fig. 28).

DATI	
Misure: Sezione Nord: 6,69 m Sezione Est: 6,74 m Sezione Sud: 7,74 m Sezione Ovest: 5,33 m	Distanza di presa: 3,50 m Immagini: 110 Tempi di acquisizione: 40 minuti circa Point Cloud: 2.423.167

Tab 3: Dati relativi all'area 39000.



Fig. 28: Area 39000. Risultato dell'elaborazione con *Evo Check*.

Una volta rientrati in ufficio, le immagini sono state processate in *U-Map*. La ricostruzione ha fornito un ottimo risultato (Fig. 29), ricomponendo senza problemi anche le parti marginali dell'area (in seguito ritagliate).

A questo punto, sperimentate le funzionalità dei due software con il totale delle immagini (obiettivo primario della presente ricerca) si è deciso di operare una selezione per le elaborazioni successive, in modo da velocizzare i tempi.



Fig. 29: Area 39000. Risultato del processo di ricostruzione su U-Map.

I modelli *.vtp sono quindi stati visualizzati su *Scan View* e ne sono stati estrapolati 24, numero comunque sufficiente alla copertura dell'intera area; sono stati importati su *ZMap* per l'eliminazione dei punti sporchi e il ritaglio delle parti esterne al perimetro dell'area di scavo.

Vista la complessità geometrica dell'area, l'UCS è stato definito valutando la zona con minori salti di quota, in modo che tutte le variazioni fossero poi avvertite rispetto a quel piano, rendendo veritiero il modello di rappresentazione della superficie. Se la superficie considerata fosse stata piana invece, avremmo potuto utilizzare anche l'opzione di creazione del piano di riferimento partendo dalla vista corrente.

Il work flow ha previsto le seguenti operazioni, con rispettivi parametri:

PROCESSO	PARAMETRI	OSSERVAZIONI
TRIANGOLAZIONE	Step: 0.04 m Alpha: 0.4 m	
SCALA (Fig. 31)	1: 0 0 0 0 0 2: 0 0 5.33 0 0 0	È stata effettuata una misura di prova per la sezione Ovest che corrisponde esattamente a quella misurata manualmente.
GEOREFERENZIAZIONE (Fig 32)	6 GCP da stazione totale	
DEM (Fig. 33)	Step: 0.04 m	Per i singoli modelli poi riuniti. Si percepiscono molto bene le variazioni di quota.
EDITING DEM		Ottimo risultato
PROFILI (Fig. 33)	Quattro sezioni NESO Canaletta	
CURVE DI LIVELLO (Fig. 33)	Step: 0.004 m	
ORTOFOTO (Fig. 34)	Pixel size: 0.004 m	
ORTOMOSAICO (Fig. 35)		Aggiunta del cartiglio per indicarne la misurabilità.

Tab 4: Work flow area 39000.



Fig. 30: Area 39000. Vista dall'alto e frontale del modello 3D.

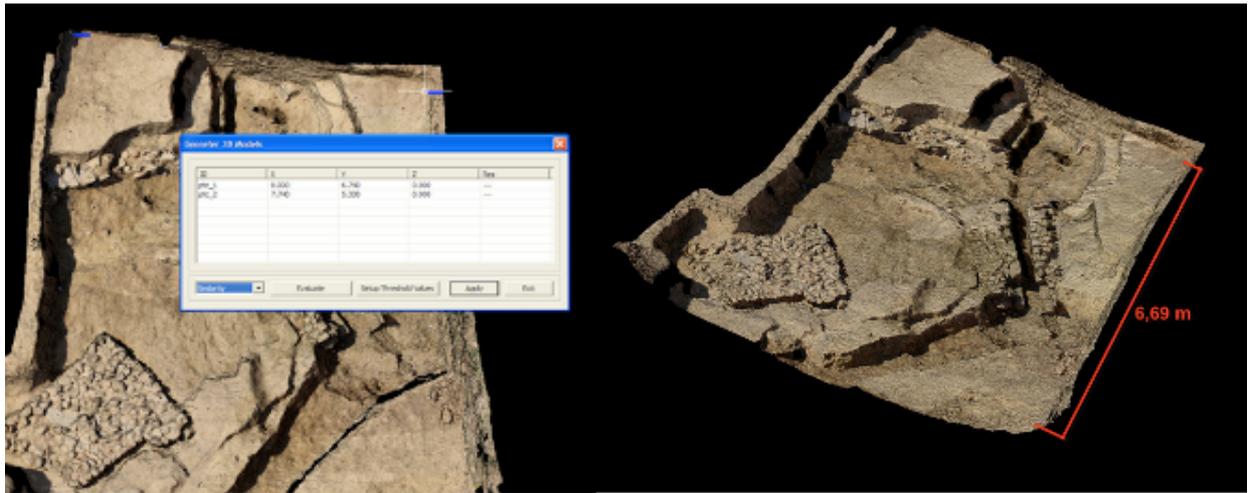


Fig. 31: Area 39000. Messa in scala del modello.

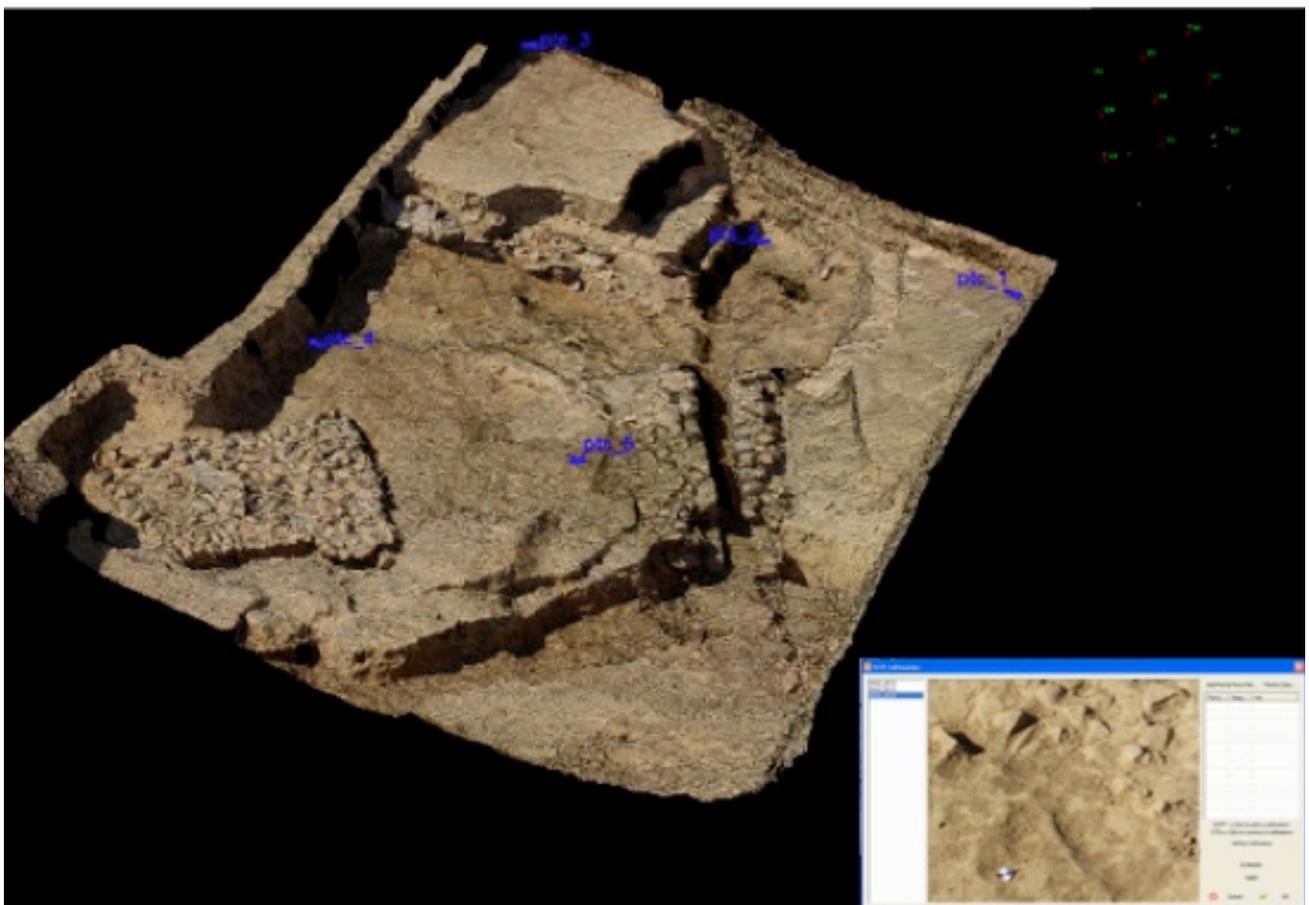


Fig. 32: Area 39000. Georeferenziazione.

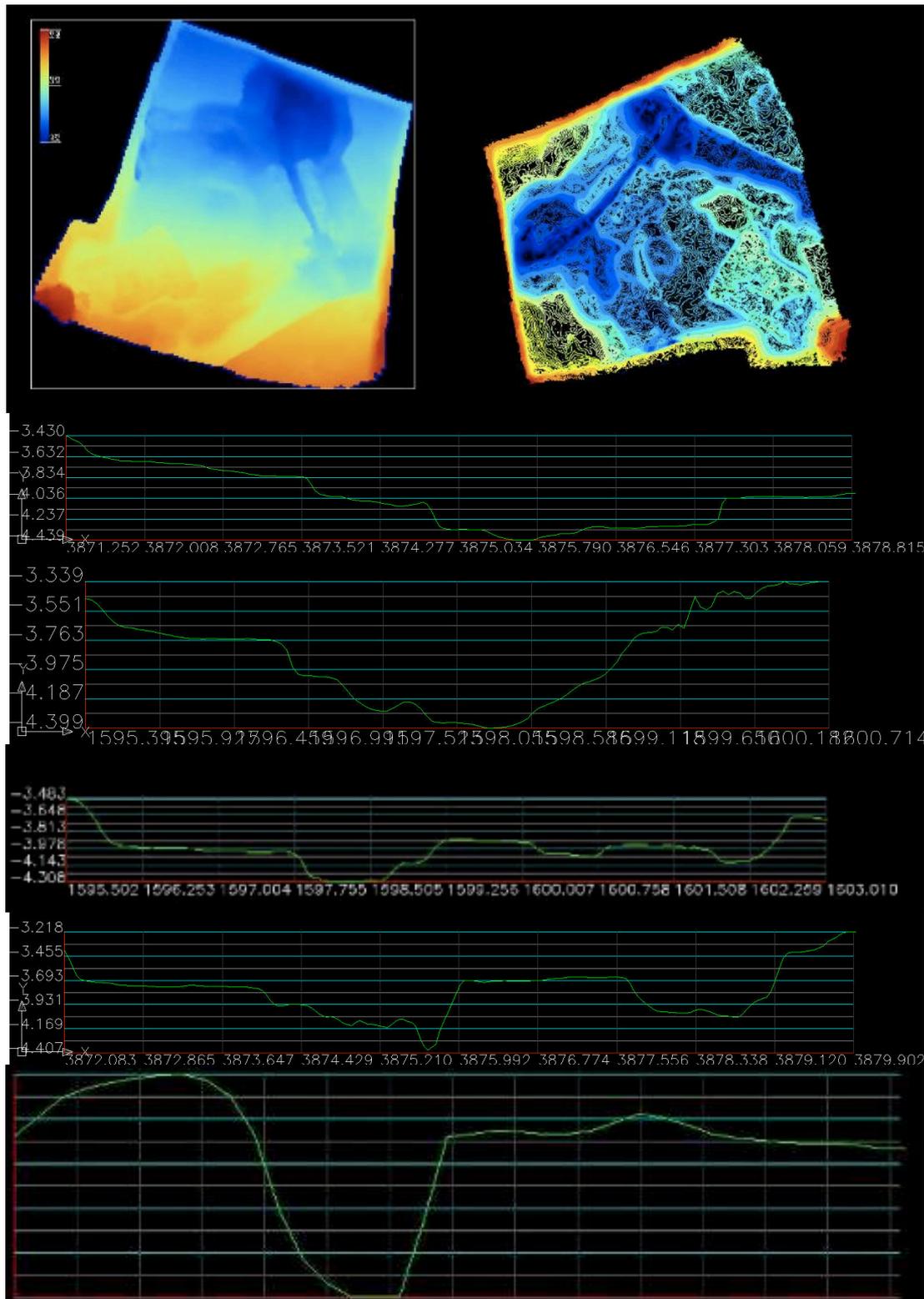


Fig. 33: Area 39000. In alto a sinistra: DEM editato; curve di livello, profilo Nord, profilo Est, profilo Sud, profilo Ovest, profilo canaletta.



Fig. 34: Area 39000. Ortofoto.



Fig. 35: Area 39000. Ortofotomosaico.

Area 35000

Al momento dell'acquisizione l'area risultava chiusa e documentata. Questo ha senza dubbio favorito l'attività, in quanto si è potuto operare senza restrizioni tempistiche.

Non ci sono stati problemi di esposizione e messa a fuoco, visto le diverse condizioni meteorologiche. La questione cavi è stata preventivamente risolta, tenendoli stretti con nastro adesivo.

Sono state realizzate 10 strisciate composte mediamente da 11 immagini. L'elaborazione con *Evo Check* (della durata di 3 ore circa come nel caso precedente) ha fornito un ottimo risultato e già da questa analisi preliminare si nota come la nuvola ricostruita sia molto densa e con pochi punti sporchi (Fig. 36).

DATI	
Misure: Sezione Nord: 4.45 m Sezione Est: 8.84 m Sezione Sud: 5.76 m Sezione Ovest: 8,58 m Diagonale N-S in senso E-O: 10,37 m	Distanza di presa: 3 m Immagini: 114 Tempi di acquisizione: 45 minuti circa Point Cloud: 3.297.546

Tab 5: Dati relativi all'area 35000.

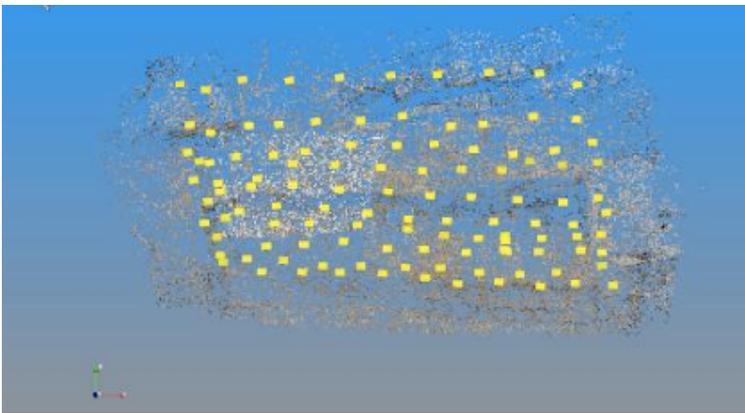


Fig. 36: Area 35000. Risultato dell'elaborazione con *Evo Check*.

sovrapposizione e soprattutto assicurandomi che l'intera area fosse coperta. Sono stati ripuliti 35 modelli, ritagliando le parti esterne all'area .

Diversamente dall'area precedentemente rilevata, già per la procedura *U-Map* è stata effettuata una cernita delle immagini, in modo da velocizzare i tempi.

Sono state selezionate 66 foto: il risultato è stato buono, sebbene con qualche buco, riconducibile alle parti in ombra (Fig. 37). Per evitarlo, sarebbe stato necessario acquisire queste parti da altre angolazioni per poi processarle contemporaneamente alle altre.

Dopo aver visionato i modelli su *Scan View* ho proceduto ad un'ulteriore selezione, mantenendo comunque un'adeguata

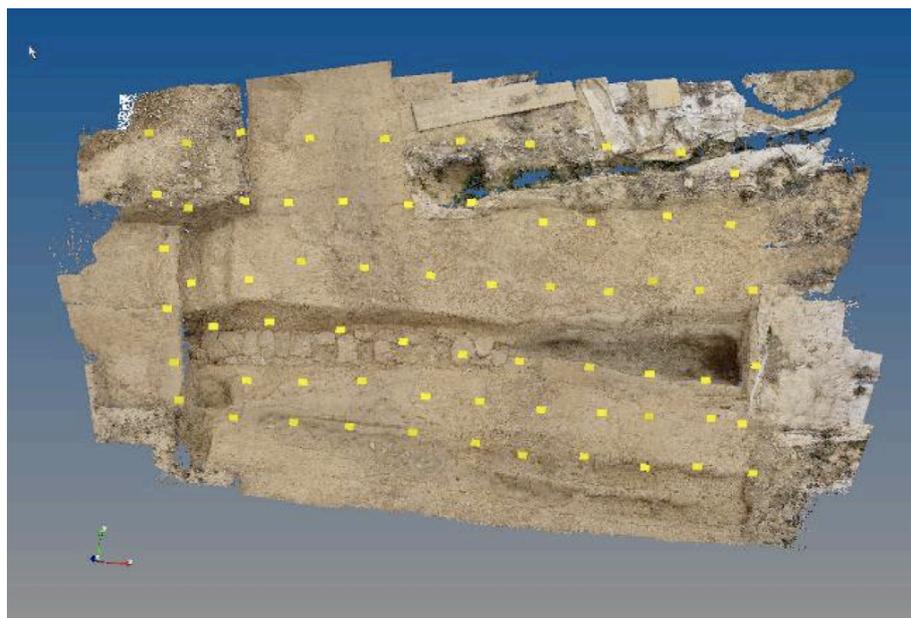


Fig. 37: Area 35000. Risultato del processo di ricostruzione su *U-Map*.

Anche in questo caso l'UCS è stato definito dall'utente. Come nella sperimentazione precedente, il percorso operativo ha previsto le seguenti operazioni:

PROCESSO	PARAMETRI	OSSERVAZIONI
TRIANGOLAZIONE	Step: 0.01 m Alpha: 0.1 m	Il problema di <i>ZMap</i> è la gestione contemporanea di più modelli (più di 25), perdendo così la visione d'insieme. Ovviamente l'utilizzo di operazioni Batch consente di velocizzare i tempi lavorando su gruppi di modelli, invece che singolarmente.
SCALA (Fig. 38)	1: 0 0 0 0 0 2: 0 0 8.84 0 0 0	È stata effettuata una misura di prova per la sezione Est che corrisponde esattamente a quella misurata manualmente.
DEM (Fig. 39)	Step: 0.01	Per i singoli modelli poi riuniti.
EDITING DEM		Ottimo risultato
PROFILI (Fig. 39)	Quattro sezioni NESO Canaletta	
CURVE DI LIVELLO (Fig. 39)	Quota min: -0.76 cm Quota max: 0,65 cm Step: 0.05 m Tolleranza: 0.00001 m	
ORTOFOTO (Fig. 40)	Pixel size: 0.001 m	
ORTOMOSAICO (Fig. 41)		Aggiunta del cartiglio per indicarne la misurabilità.

Tab 6: Work flow area 35000.



Fig. 38: Area 35000. Vista dall'altro del modello ricostruito e scalato.

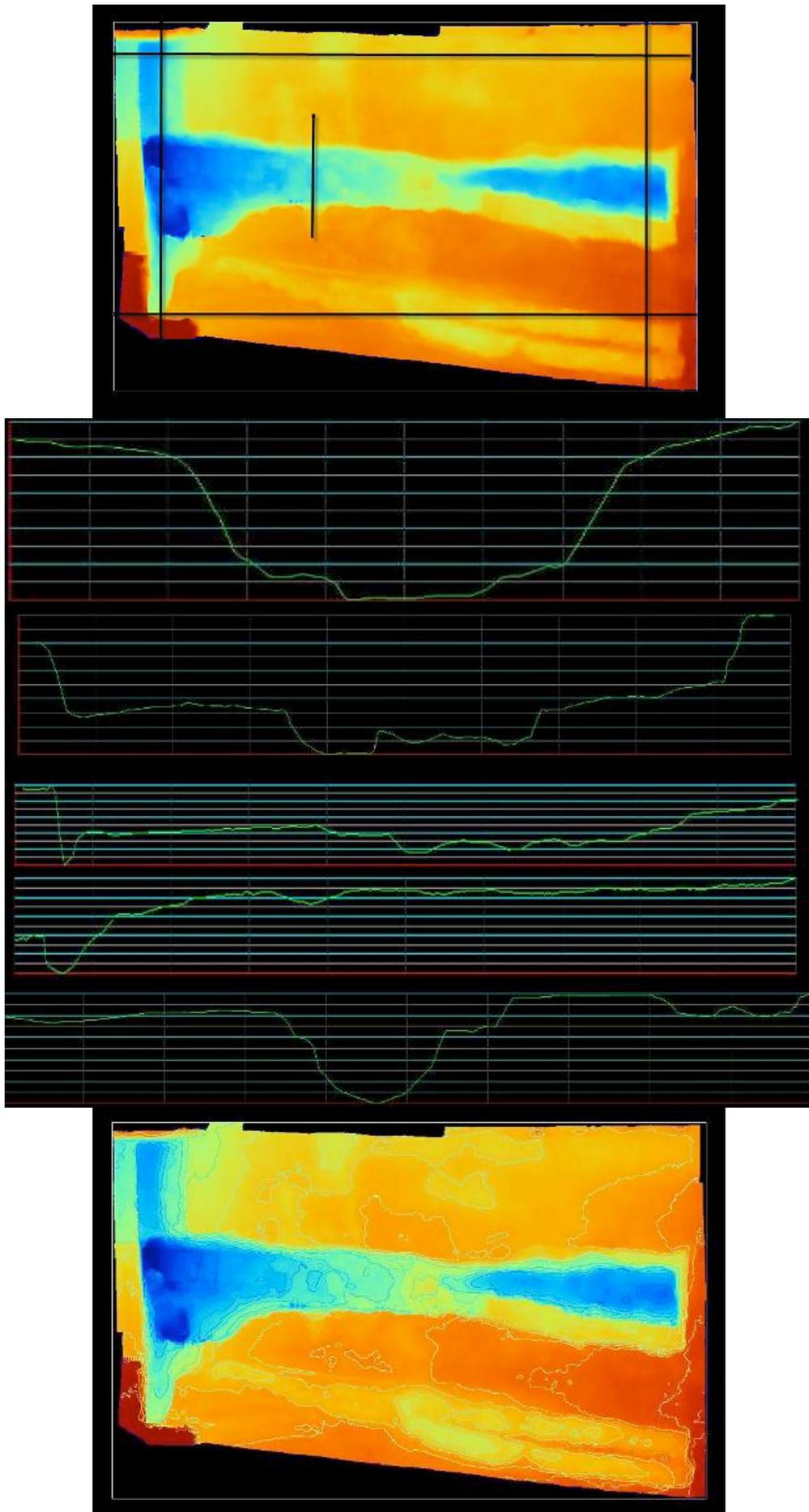


Fig. 39: Area 35000. Dall'alto: DEM editato, profilo della canaletta, profilo Nord, profilo Est, profilo Sud, profilo Ovest e curve di livello.



Fig. 40: Area 35000. Ortofoto.

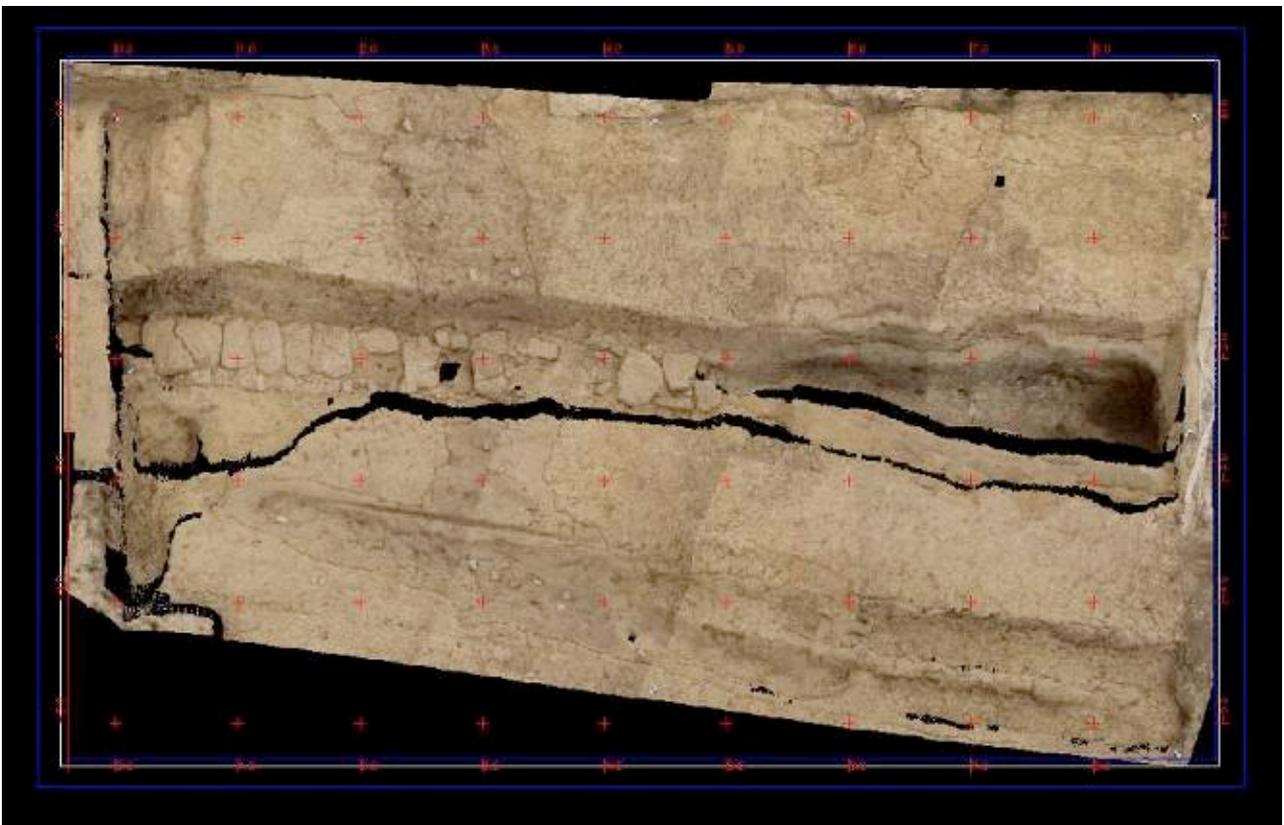


Fig. 41: Area 35000. Ortofotomosaico con cartiglio.

RISULTATI E DISCUSSIONE

I principali risultati conseguiti hanno ovviamente riguardato la sperimentazione della soluzione *ZScan Evo*. Tuttavia sono d'obbligo anche alcune considerazioni sugli esiti delle fasi preliminari.

In sintesi, le varie attività svolte hanno consentito:

- l'inserimento del progetto di ricerca all'interno di un dibattito scientifico attivo e in continuo sviluppo;
- un approccio ai processi fotogrammetrici tradizionali;
- la comprensione delle diverse elaborazioni consentite sui modelli 3D;
- il conseguimento di competenze specifiche nell'uso della soluzione *ZScan* e la costruzione di una base critica da cui muovere per capire le potenzialità dello strumento da testare;
- un approccio a *ZScan Evo*, con l'individuazione delle funzionalità principali della soluzione, i maggiori settori applicativi e una valutazione preliminare di analogie e differenze con il predecessore;
- la conoscenza approfondita dello strumento e del pacchetto software di cui si compone;
- la determinazione di pregi e difetti del prodotto;
- l'individuazione di bug e lacune del sistema e quindi la loro correzione;
- la verifica dell'applicabilità della soluzione a contesti archeologici.

La ricerca bibliografica ha permesso di contestualizzare l'attività di ricerca qui riportata, creando i presupposti teorici per la sperimentazione di una nuova soluzione in campo fotogrammetrico e nello specifico nella costruzione di modelli tridimensionali.

L'analisi di dataset esemplificativi in ambiente *ZMap* è stata propedeutica alle attività successive e fondamentale per acquisire dimestichezza con il software, in modo da utilizzarlo per gestire i modelli 3D ottenuti dalle elaborazioni con *Evo*. Le procedure sono completamente automatiche, c'è un'ampia possibilità di operazioni e assicura la gestione di vari tipi di dati.

Le successive esperienze operative con *ZScan* hanno portato ad ottimi risultati in termini di competenze maturate: sono stati sperimentate tutte le fasi del processo di ricostruzione tridimensionale, dall'acquisizione sul campo al processamento delle immagini e la composizione dei modelli 3D ottenuti. La varietà di soggetti rilevati ha consentito di creare una casistica abbastanza ampia, la cui analisi ha consentito di individuare pregi e limiti dello strumento. Sicuramente tra i vantaggi vanno annoverate la semplicità di utilizzo, la robustezza dei componenti, la facilità dell'operatività sul campo e del trasporto e maneggevolezza. Il prodotto non necessita di punti di controllo o misurazioni preliminari e può essere applicato in numerosi settori. Soggetti particolarmente elevati e con geometria sparsa richiedono invece soluzioni diverse.

Per quanto riguarda *ZScan Evo*, la fase di testing ha previsto molteplici sessioni di rilievo e da subito sono emerse somiglianze e diversità con il software precedente, evidenziate anche dal confronto dei risultati delle due tecnologie applicate allo stesso soggetto.

Sulla base dei principi del predecessore, *Evo* ne rappresenta a tutti gli effetti l'evoluzione, svincolandosi dalla barra e basando la ricostruzione dei modelli non più su triplette ma su blocchi di immagini digitali. Anche i tempi di acquisizione sono notevolmente ridotti. A differenza di *ZScan* poi, *U-Map* restituisce modelli completi, che non necessitano di moduli aggiuntivi per il rimontaggio automatico. A livello pratico, infine, sembra più maneggevole e facile da utilizzare.

Una volta progettato il lavoro, tenendo conto di tutti gli accorgimenti preliminari⁶⁴ alla fase di acquisizione, infatti, le procedure operative è molto semplice dal punto di vista dell'utilizzo della strumentazione sia hardware che software. E questo rientra appieno nella logica dei prodotti Menci Software: non richiedere nuovi specialismi, infatti, favorisce chi già conosce l'azienda e al tempo stesso agevola chi si accosta per la prima volta a queste soluzioni.

Altro punto forte di *Evo* risiede nella possibilità di parametrizzare la densità della nuvola di punti: in base alle esigenze si può quindi decidere lo step di ricostruzione. Inoltre la tabella "Covering Area" è di grande aiuto per la definizione immediata del pixel size e delle conseguenti impostazioni.

Le debolezze emerse durante le prove pratiche hanno riguardato essenzialmente la strumentazione e quasi mai la parte software, eccetto i casi iniziali e alcuni piccoli accorgimenti successivi. Grazie al continuo dialogo con i tecnici ogni ostacolo è stato facilmente sormontato in tempi brevi. La ridotta visibilità del tablet è stata risolta applicando una pellicola antiriflesso e l'aggancio del porta tablet all'asta ha svincolato dalla necessità della presenza di due operatori (uno per il tablet e l'altro per la camera/asta).

⁶⁴ Si veda la relativa sezione in Appendice (p. 48).

Dal punto di vista software le difficoltà incontrate sono scaturite essenzialmente da un'incompleta valutazione di tutti gli accorgimenti iniziali, preliminari alla fase di acquisizione quali cambi repentini di esposizione, di distanza ecc, più che da tare nella programmazione. I pochi bug rilevati sono tutti riconducibili alla gestione di un alto numero di immagini, mentre per il resto si è trattato di migliorie soprattutto a livello di interfaccia, che vanno dall'aggiunta dei comandi "Back", del contatore degli scatti e dell'ingrandimento delle anteprime, ai comandi di visualizzazione di centri di presa, finestra di output e miniature delle immagini non legate.

In generale i risultati delle elaborazioni sono stati sempre accettabili; va da sé che secondo i parametri impostati, l'esito del processo sia assai differente. Sono quindi le esigenze dell'utente e le peculiarità dell'oggetto rilevato a determinare le caratteristiche e la qualità del prodotto ottenuto.

La sperimentazione sul campo infine, ha offerto una preziosa occasione per:

- individuare ulteriori lacune a livello logistico e provvedere poi a colmarle, come ad esempio il collegamento del cavo USB;
- valutare in maniera positiva le funzionalità del prodotto di fronte ad un cospicuo numero di immagini da elaborare. Si è visto infatti come i tempi di processamento siano assolutamente rapidi una volta selezionati i modelli da ricostruire e tutto sommato contenuti per le elaborazioni del totale delle immagini acquisite.
- Procedere ad una revisione del tutorial;
- confermare l'applicabilità di *Evo* in campo archeologico e la possibilità di integrazione con altre metodologie di rilievo, come dimostrato dall'utilizzo di punti presi con stazione totale per il georiferimento dei modelli.

I risultati di questa attività di rilievo, coadiuvati dal confronto con gli archeologi, hanno offerto inoltre alcuni spunti di riflessione sull'utilizzo delle tecniche fotogrammetriche in questo campo e più nello specifico sui vantaggi dell'applicazione della metodologia *ZScan Evo* per il rilievo archeologico.

La documentazione grafica infatti, costituisce un momento essenziale dell'indagine archeologica: piante composite (in particolar modo quella di fine scavo che fotografa quanto è visibile sul terreno alla fine dei lavori), piante tematiche e di fase che indicano rispettivamente la tipologia degli oggetti riportati in pianta o la cronologia delle varie parti del complesso archeologico messo in luce, piante ricostruttive, prospetti, sezioni e quant'altro, sono determinanti per qualsiasi tipo di analisi e ipotesi interpretativa.

Per quanto riguarda le fotografie invece, non c'è dubbio che esse costituiscano una forma di archivio completa e dettagliata, delle successive condizioni in cui lo scavo si è venuto a trovare. Possono essere utilizzate anche a distanza di tempo come strumento per nuove interpretazioni, per verifiche ed integrazioni.⁶⁵

Appare quindi evidente come l'utilizzo di tecniche fotogrammetriche e di rilievo tridimensionale in questo settore sia pienamente auspicabile. Oltre a consentire l'archiviazione e l'elaborazione di un'enorme quantità di dati, queste soluzioni hanno un valore aggiunto nella possibilità di trasmissione e comunicazione su vasta scala delle informazioni raccolte, raggiungendo dimensioni e contesti culturali diversi e non esclusivamente tra addetti ai lavori.

Se paragonate alla tecnologia laser scanner poi non si può non considerarne il vantaggio economico e in termini di tempi impiegati. Ciò nonostante, a seconda delle peculiarità dei casi, non è assolutamente da escludere un'integrazione delle due tecniche.

Passando ora all'esempio di San Genesio, è stato già detto della metodologia in uso per il rilievo e la gestione dei dati. Si tratta di una soluzione di certo vantaggiosa rispetto alle tecniche tradizionali, segno anche di una vivacità culturale, pronta ad accogliere e sfruttare gli strumenti che il progresso tecnologico offre.

La soluzione *ZScan Evo* rappresenta un nuovo passo in avanti. L'idea vincente è, infatti, la realizzazione di una nuvola di punti continua, misurabile, che si presta a molteplici operazioni, a partire da immagini digitali, il tutto con poco dispendio in termini economici e di energie. È proprio nel risultato che si ottiene che sta la differenza con le altre tecniche: probabilmente alcune possono essere ancora più sbrigative, ma il prodotto finale è nettamente diverso in termini metrici e geometrici.

Un confronto tra i risultati prodotti con i due metodi sarebbe stato estremamente interessante, ma i tempi non hanno consentito di procedere alla comparazione.

Un ultimo punto di discussione attiene l'utilità di un software come *Site Manager* nel settore archeologico. Dall'esperienza maturata se ne evincono le potenzialità nella gestione completa della documentazione grafica e per la divulgazione dei risultati raggiunti.

⁶⁵ BONORA 2003.

ZScan Evo consente quindi un'acquisizione morfologica 3D, geometrica e fotografica. Sarebbe quindi riduttivo confinarlo alla sola fase di restituzione grafica e di visualizzazione tridimensionale, troppo spesso pensata solo per raccogliere consensi.

Evo è uno strumento di conoscenza, da utilizzare quotidianamente e non in maniera sporadica, inserito nella metodologia di rilievo magari integrato con altre tecniche.

CONCLUSIONI

Lo sviluppo continuo della tecnologia nel campo della fotogrammetria ha consentito oggi, di raggiungere risultati fino a qualche decennio fa impensabili. L'esperienza qui riportata si colloca quindi in un panorama in continua evoluzione, in cui trovano spazio sperimentazioni sempre più innovative.

Il progetto è stato sicuramente utile dal punto di vista formativo, non solo in termini di ampliamento delle conoscenze, ma anche di accrescimento personale, in quanto esperienza "lavorativa".

La suddivisione delle attività in varie fasi ha consentito di seguire un percorso lineare e chiaro.

Dal punto di vista delle procedure impiegate e sviluppate, la strutturazione in fase di studio teorico e successive applicazioni si è rivelata vincente.

Soprattutto nella sperimentazione di *ZScan Evo* sono stati fondamentali i diversi casi applicativi presentati, poiché ciascuno di essi ha contribuito a creare prima e rafforzare dopo, un ricco bagaglio di competenze. Una conoscenza approfondita dello strumento, infatti, non può prescindere dal suo utilizzo continuo e in situazioni disparate, ognuna con le proprie peculiarità.

Dei risultati ottenuti nelle singole prove operative si è già parlato. Così come sono stati già discussi gli esiti delle varie attività svolte. Ricapitolando in breve⁶⁶:

- lo step 1 ha permesso di creare da un lato una base teorica sia sulla fotogrammetria in generale che nelle sue applicazioni in campo archeologico e dei beni culturali in particolare, senza la quale il progetto non avrebbe avuto riferimenti scientifici; dall'altro ha consentito di entrare nell'ottica dell'azienda ospitante, capire di cosa si occupa, quali sono i settori applicativi e la tipologia di soluzioni e servizi proposti;
- con lo step 2 è stato possibile avvicinarsi a due dei prodotti di punta dell'azienda, *ZMap* e *ZScan* la cui conoscenza è stata indispensabile per le fasi successive;
- la terza tappa del percorso è stata quella di sperimentazione vera e propria. La soluzione *Evo* è stata testata su diversi soggetti; ne è stata valutata l'efficacia; i software che la compongono sono stati analizzati e ulteriormente perfezionati; infine è stato realizzato il tutorial;
- gli step 4 e 5 hanno previsto la verifica delle competenze acquisite nel momento precedente attraverso la sperimentazione dello strumento su un sito in corso di scavo, determinandone anche l'applicabilità in campo archeologico.

Le ultime due attività hanno infine previsto la stesura del presente elaborato e in parallelo la programmazione di un'attività seminariale, presso l'Università degli Studi di Pisa, afferente al Laboratorio di Archeologia Medievale, in cui presentare questo nuovo metodo per il rilievo tridimensionale in archeologia, con l'esposizione dei risultati relativi all'esperienza di rilievo sul sito di San Genesio.

Si può concludere affermando quindi che gli obiettivi posti sono stati raggiunti, tutti e in modo soddisfacente.

⁶⁶ Sul percorso formativo seguito si veda la tabella presentata nell'Introduzione.

APPENDICI

Appendice A: Informazioni sull'accuratezza

Baseline	100 mm	200 mm	300 mm	500 mm	750 mm	1000 mm	2000 mm	3000 mm	5000 mm	7500 mm	10000 mm
Baseline 20 mm	0.04	0.16	0.37								
Baseline 50 mm			0.15	0.41	0.92	1.64					
Baseline 100 mm				0.20	0.46	0.82	3.27				
Baseline 150 mm					0.31	0.55	2.18	4.91			
Baseline 200 mm						0.41	1.64	3.68			
Baseline 300 mm							1.09	2.46	6.82		
Baseline 400 mm							0.82	1.84	5.12	11.51	
Baseline 500 mm								1.47	4.09	9.21	16.37
Baseline 600 mm								1.23	3.41	7.67	13.64
Baseline 700 mm									2.92	6.58	11.69
Baseline 800 mm									2.56	5.76	10.23
Baseline 900 mm									2.27	5.12	9.10

Nelle colonne sono riportate le distanze di riferimento tra la camera e l'oggetto fotografato.

Le righe descrivono l'accuratezza in profondità, dipendente sia dalla distanza tra camera e oggetto che dalla baseline utilizzata per realizzare la tripletta di scatti. Ad esempio osservando la figura si vede che con 100 mm di baseline si può ottenere un'accuratezza di 0.2 mm su un oggetto a 500 mm dalla camera.

La tabella però non è statica e contiene valori basati sul particolare certificato della camera utilizzato nel progetto. È un utile strumento per valutare la larghezza idonea della base, dunque la distanza di presa, per ottenere determinate precisioni sul modello.

I valori di accuratezza riportati sono quindi puramente teorici e dipendono dalle condizioni di ripresa. Hanno una funzione indicativa e non vincolante circa i risultati finali ottenibili.

Appendice B: Focali-Glossario

La camera in dotazione con il pacchetto *Evo* è una CANON EOS600D, ad ottica fissa e con lunghezza focale di 20 mm⁶⁷. Nel corso delle sperimentazioni sono stati utilizzati anche altri obiettivi da 24 e 28 mm e uno macro da 60 mm, per valutarne i risultati. Si può facilmente intuire come la scelta dell'obiettivo sia di volta in volta determinata dalle esigenze dell'utente, in quanto ciascun tipo di ottica determina nella ripresa delle differenze oggettive, sia in termini di inquadratura che di condizionamenti operativi.⁶⁸ È sembrato quindi opportuno procedere ad una breve digressione su tali argomenti, qui presentata in forma di glossario, in modo da poter comprendere meglio le differenze dei singoli esiti.

Angolo di campo: è l'angolo misurato al vertice di un triangolo isoscele posto sull'asse dal piano focale dell'obiettivo con alla base la dimensione dell'immagine formata sulla diagonale del materiale sensibile. Varia in funzione della lunghezza focale: è più ampio quando questa è corta e viceversa. Se ci sposta dall'infinito, distanziando l'obiettivo dal piano focale, l'angolo di campo diminuisce.

Apertura o luminosità: è correlata al diametro del gruppo di raggi di luce che lo attraversa e determina la luminosità dell'immagine formata sul piano focale. L'apertura massima di un obiettivo è uguale alla lunghezza focale diviso il diametro della pupilla d'ingresso (la lente più esterna) dell'obiettivo. Minore è l'apertura massima, più luminoso sarà l'obiettivo, riuscendo quindi a far passare più luce ed impressionare la pellicola in minor tempo.

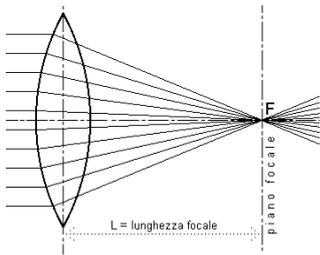
⁶⁷ Come visto, ciò non esclude che possano essere utilizzati anche altri tipi di camera e di obiettivi.

⁶⁸ Alcune indicazioni bibliografiche per approfondimenti in materia sono: MARINUCCI 1989; MARANGONI – GEDDO 1996. Sulla fotografia in archeologia si vedano: DORREL 1989; GABRIELLI 1994. Sull'utilizzo di obiettivi in applicazioni Menci Software si vedano: MENCI – CECCARONI 2003 (per la parte generale sulle focali); FABRIS *et al.* 2008; FABRIS *et al.* 2010; LO BRUTTO-SPERA 2010.

Diaframma: sostanzialmente è un foro a diametro variabile posto all'interno degli obiettivi che determina la profondità di campo e regola la luminosità dell'immagine che si forma sul piano focale; insieme ai tempi di scatto determina la quantità totale della luce che raggiunge la pellicola. Un diaframma grande lascia passare più luce di uno piccolo (che richiede quindi tempi di esposizione più lunghi e quindi maggior rischio di mosso) e viceversa, ma la luminosità dell'immagine dipende anche dalla lunghezza focale. Occorre dunque mettere in relazione le due variabili attraverso un rapporto. Il numero del diaframma indica quante volte il diametro di quel foro sta nella lunghezza focale dell'obiettivo.



Esposizione: è il tempo durante il quale l'elemento sensibile resta esposto alla luce che passa attraverso il sistema ottico. L'esposizione si misura in EV (valore di esposizione) ed è determinata con l'ausilio dell'esposimetro (interno o esterno). È definita dal rapporto tra intensità luminosa (diaframma) e tempo; in particolare, fissata una data esposizione, diaframma e tempo sono inversamente proporzionali, ossia sono l'uno il reciproco dell'altro. L'esposizione può essere automatica, programmata, a priorità di tempi o diaframma, manuale.



Lunghezza focale: è la distanza in mm tra la lente e il piano focale, quando l'oggetto da mettere a fuoco è all'infinito (quando i raggi ottici sono paralleli all'asse del sistema).

Dalla lunghezza focale e dalle dimensioni della superficie sensibile dipende l'angolo di campo dell'obiettivo. A parità di dimensioni del sensore, più la focale è lunga, più è stretto il campo inquadrato. Un obiettivo a lunghezza focale fissa ha un angolo inquadrato non variabile; è meno versatile del corrispondente zoom che include la stessa lunghezza ma in genere la qualità ottica è superiore;

l'apertura permette di scattare in condizioni di minore quantità di luce; è possibile avere una profondità di campo molto corta. Lo zoom invece ha focali variabili fra due estremi, si ha quindi la possibilità di allargare o stringere l'angolo di ripresa in maniera continua a seconda delle esigenze dello scatto. Nonostante la rapidità operativa ed economica, ha qualità minore.

Messa a fuoco: meccanicamente parlando, consiste nella regolazione della distanza del gruppo lenti dell'obiettivo dalla pellicola in modo che su quest'ultima sia proiettata un'immagine nitida dell'elemento prescelto. Alcuni obiettivi macro, capaci di mettere a fuoco a distanze molto ridotte, utilizzano più gruppi interni indipendenti per garantire la massima definizione anche a distanze ridotte e sulle parti più esterne del fotogramma. L'operazione è svolta agendo su un'apposta ghiera posta sul barilotto dell'obiettivo. La messa a fuoco può essere di tipo manuale o automatico, utilizzando un motore posto all'interno della fotocamera o dell'obiettivo stesso. Tutti gli obiettivi sono caratterizzati da una minima distanza di messa a fuoco, al di sotto della quale non è possibile ottenere fotografie nitide senza l'aggiunta di accessori, così come oltre un certo limite, la distanza del soggetto dalla fotocamera non influisce più in modo apprezzabile sulla nitidezza finale e con la ghiera dell'obiettivo portata a fondo corsa (ossia fissa sul limite detto "infinito") non è più necessario mettere a fuoco.

Obiettivo fotografico: è la parte ottica della fotocamera che forma l'immagine sulla pellicola. È costituito da uno o più gruppi di lenti e dal loro numero, forma e dimensione dipende la resa ottica. Un obiettivo può essere a focale fissa o a zoom. In tabella sono riportati i diversi tipi di obiettivo.

	Angolo visivo	Lunghezza focale	Effetto	Distanza minima messa a fuoco	Profondità di campo
GRANDANGOLARE	Più di 45 gradi (fino a 180°)	Meno di 50 mm (28,24,20 mm)	mmVede ampi panorami e rimpicciolisce gli oggetti perché porta ad esagerare la proporzione dei soggetti in primo piano. Esalta la sensazione di spazio e profondità.	Meno di mezzo metro	Grande. E' facile mettere a fuoco
NORMALE	45 gradi (simile all'occhio umano)	50 mm (approssimata alla diagonale del fotogramma)	Vede come l'occhio umano del	Mezzo metro circa	Media
TELEOBBIETTIVO	Meno di 45 gradi	Più di 50 mm	Vede panorami stretti e ingrandisce gli oggetti	Più di mezzo metro	Piccola. E' difficile mettere a fuoco

Profondità di campo: è l'ampiezza del campo focale, la zona di nitidezza che precede e segue il soggetto focalizzato. A parità di distanza di ripresa e di diaframma, la profondità di campo è inversamente proporzionale alla lunghezza focale (aumenta con i grandangolari, diminuisce con i teleobiettivi). Inoltre, è direttamente proporzionale alla distanza di messa a fuoco. In ogni caso, più piccolo è il foro del diaframma, maggiore sarà la profondità di campo. Andranno quindi valutate le caratteristiche del soggetto, dello sfondo, della distanza, della lunghezza focale e del tipo di effetto che si vuole ottenere.

Rapporto focale: è il rapporto esistente tra la lunghezza focale di un obiettivo ed il diametro di apertura dell'ottica. È espresso graficamente con f/ seguito da un numero e determina alcune caratteristiche tipiche dell'ottica. Valori come f/2 o f/2.8, con basso rapporto focale, indicano un obiettivo fotografico particolarmente luminoso, adatto a tempi di esposizione bassi. Viceversa, un alto rapporto focale, come ad esempio f/12 o superiori, determina un obiettivo poco luminoso.

Nei sistemi ottici dotati di un diaframma regolabile, che consente di variare il rapporto focale, è possibile ricercare un compromesso tra qualità dell'immagine (in particolare la sua risoluzione) e luminosità dell'ottica.

Appendice C: Covering Area

		ZSCANEVO			
		CANON D600			
focal length	28,000				
sensor pixel size (mm)	0,0043000				
sensor pixel width	5.184				
sensor pixel height	3.456				
Object distances (mm)	GSD (mm)	Horz covering (mm)	Vert covering (mm)	Covering Area (m²)	
500,00	0,08	398,06	265,37	0,11	
1.000,00	0,15	796,11	530,74	0,42	
1.500,00	0,23	1.194,17	796,11	0,95	
2.000,00	0,31	1.592,23	1.061,49	1,69	
2.500,00	0,38	1.990,29	1.326,86	2,64	
3.000,00	0,46	2.388,34	1.592,23	3,80	
3.500,00	0,54	2.786,40	1.857,60	5,18	
4.000,00	0,61	3.184,46	2.122,97	6,76	
4.500,00	0,69	3.582,51	2.388,34	8,56	
5.000,00	0,77	3.980,57	2.653,71	10,56	
5.500,00	0,84	4.378,63	2.919,09	12,78	
6.000,00	0,92	4.776,69	3.184,46	15,21	
6.500,00	1,00	5.174,74	3.449,83	17,85	
7.000,00	1,08	5.572,80	3.715,20	20,70	
7.500,00	1,15	5.970,86	3.980,57	23,77	
8.000,00	1,23	6.368,91	4.245,94	27,04	
8.500,00	1,31	6.766,97	4.511,31	30,53	
9.000,00	1,38	7.165,03	4.776,69	34,23	
9.500,00	1,46	7.563,09	5.042,06	38,13	
10.000,00	1,54	7.961,14	5.307,43	42,25	
10.500,00	1,61	8.359,20	5.572,80	46,58	
11.000,00	1,69	8.757,26	5.838,17	51,13	
11.500,00	1,77	9.155,31	6.103,54	55,88	
12.000,00	1,84	9.553,37	6.368,91	60,84	
12.500,00	1,92	9.951,43	6.634,29	66,02	
13.000,00	2,00	10.349,49	6.899,66	71,41	
13.500,00	2,07	10.747,54	7.165,03	77,01	
14.000,00	2,15	11.145,60	7.430,40	82,82	
14.500,00	2,23	11.543,66	7.695,77	88,84	
15.000,00	2,30	11.941,71	7.961,14	95,07	
15.500,00	2,38	12.339,77	8.226,51	101,51	
16.000,00	2,46	12.737,83	8.491,89	108,17	
16.500,00	2,53	13.135,89	8.757,26	115,03	
17.000,00	2,61	13.533,94	9.022,63	122,11	
17.500,00	2,69	13.932,00	9.288,00	129,40	
18.000,00	2,76	14.330,06	9.553,37	136,90	
18.500,00	2,84	14.728,11	9.818,74	144,61	
19.000,00	2,92	15.126,17	10.084,11	152,53	
19.500,00	2,99	15.524,23	10.349,49	160,67	
20.000,00	3,07	15.922,29	10.614,86	169,01	

La tabella è impostata per le caratteristiche della camera CANON EOS 600D, di cui in alto sono riportate le caratteristiche principali (lunghezza focale, pixel size). Nelle colonne sono riportati la distanza di presa dagli oggetti da rilevare, il GSD (Ground Sample Distance), la copertura dell'area in orizzontale e verticale e in metri quadrati.

Appendice D: dal Tutorial di ZScan Evo, Informazioni di base e operazioni preliminari

Soggetti consentiti

In generale si prestano all'utilizzo di *ZScan Evo* sia soggetti in elevato, da acquisire frontalmente che a terra, con la possibilità di combinarli tra loro. Tra la casistica compatibile, si annoverano inoltre spazi chiusi, soffitti e volte. Difficoltà possono riscontrarsi con soggetti che presentano geometrie particolarmente complesse, di cui è problematico seguirne l'andamento o con soggetti caratterizzati da omogeneità cromatica.

Distanza di presa

È fondamentale scegliere la distanza da cui scattare le immagini. La distanza ottimale varia in funzione dell'ottica utilizzata, del livello di dettaglio da ottenere e dalle dimensioni dell'oggetto di interesse. Una stima del dettaglio ottenibile alle diverse distanze è reperibile consultando la tabella "Covering Area". 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.

Nell'acquisizione non è strettamente necessario mantenere sempre la stessa distanza di presa: se ci si trova in una situazione in cui alcuni dei soggetti da rilevare sono più aggettanti rispetto ad altri e non si ha libertà di movimento per garantire che la distanza rimanga la stessa, si può tranquillamente procedere, seguendo la geometria dell'oggetto e soprattutto controllando che ci sia la giusta sovrapposizione tra uno scatto e l'altro. Solo il cambiamento netto di distanza può causare difficoltà, se invece questo è graduale, non sussistono problemi. Ricordarsi che al di sotto di 1,5 m non occorre il supporto dell'asta topografica, né del tablet.

Risoluzione Pixel

Nel momento dell'acquisizione, a seconda di specifiche esigenze di ricostruzione, si può stabilire il pixel size, attraverso la tabella "Covering Area" che mostra come il valore cambi in base alla distanza. Una risoluzione molto alta, comporta la creazione di una nuvola di punti molto densa, che esigerà tempi di elaborazione più lunghi e maggiore spazio occupato.

Luce

Si consiglia di evitare forti variazioni di luce sia in intensità che direzione tra uno scatto e l'altro. Sono preferibili luci diffuse e non dirette. Un cambio repentino di esposizione infatti potrebbe incidere sull'efficacia del *link image*. Al tempo stesso sovraesposizioni e sottoesposizioni comprometterebbero il risultato della ricostruzione del modello 3D. In generale le luci perpendicolari alle superficie appiattiscono le ombre e generano potenziali riflessi: per mettere in risalto la rugosità di una superficie è opportuno illuminarla con luce laterale radente.

Messa a fuoco

Per ottimizzare la messa a fuoco di tutti gli elementi della superficie ripresa è opportuno impostare sulla macchina la priorità di diaframma (A) con numero "f" alto. Più il diaframma sarà chiuso infatti (con valori da 10 in su), più estesa sarà la profondità di campo (la zona correttamente a fuoco che precede e segue il soggetto focalizzato) e maggiore sarà quindi la zona di nitidezza. La nitidezza dell'immagine dipende inoltre dalla distanza del soggetto: a parità di lunghezza focale e diaframma utilizzati, la profondità di campo diminuisce al diminuire della distanza del soggetto (e viceversa).

Nella maggior parte dei casi quindi converrà lavorare con una messa a fuoco ad infinito salvo che non vi sia l'esigenza di una ripresa ravvicinata dell'oggetto di interesse. In questo caso procedere con la messa a fuoco automatica e una volta fissata, spostarla su manuale.

Modalità di scatto

La modalità di scatto prevede l'esecuzione di un singolo scatto per ogni posizione. Sono sempre preferibili scatti frontali all'oggetto da rilevare e per le riprese dall'alto sono da prediligere le viste zenitali (ottenibili dall'inclinazione della camera di circa 45° e/o dall'inclinazione dell'asta topografica). Quando necessario portarsi alla quota della superficie ripresa evitando riprese troppo angolate.

Area dell'oggetto sul fotogramma

Generalmente si dovrebbe tendere ad una sovrapposizione (area in comune) tra uno scatto e l'altro pari all'80% circa se si procede in orizzontale, mentre del 50% circa se si procede in verticale. Per garantire un buon risultato, è opportuno che lo stesso punto sia visibile da almeno tre immagini. Inoltre è corretto cercare di spostarsi della stessa distanza tra uno scatto e l'altro.

Altri consigli fondamentali riguardano le operazioni preliminari alla fase di acquisizione.

Il giorno precedente l'acquisizione sul campo, per evitare eventuali possibili disguidi e rallentamenti, se non addirittura incorrere nell'impossibilità di procedere alle attività, è necessario accertarsi:

- dello stato di alimentazione del tablet;
- dello stato di alimentazione della camera;
- dello stato di alimentazione del notebook o PC da campo;
- della presenza di tutti gli strumenti, in particolare dei cavi usb e delle chiavi hardware.

Una volta controllata la strumentazione si consiglia di predisporre tutto in borse o custodie apposite, in modo da facilitarne il trasporto. Prima di procedere all'acquisizione vera e propria, è necessario predisporre la strumentazione in maniera ottimale, secondo le esigenze. Si tratta di una fase che può risultare ovvia e scontata, ma che in realtà è fondamentale per la riuscita del lavoro. Salvo casi particolari, due sono sostanzialmente le situazioni in cui si può trovare: acquisizioni frontali o a terra.

Nel primo caso, ad esempio una facciata, occorre innanzitutto definire l'oggetto da rilevare e il contesto in cui si inserisce, preoccupandosi anche di fare alcuni scatti generali, per avere una visione d'insieme. Si procede quindi con il posizionamento di mire/target e la misurazione dell'area di interesse. Fondamentale è poi la scelta della soluzione più appropriata, in merito a fattori quali: la distanza di presa; l'area del fotogramma e l'esposizione, la messa a fuoco etc. Occorre poi decidere se utilizzare o meno l'asta topografica: in genere bisogna far sì che il soggetto occupi i 2/3 dell'immagine; se non è così ci si può avvicinare e si può fare a meno dell'asta che costituirebbe solo un intralcio.

Per essere certi di mantenere sempre la stessa distanza tra uno scatto e ci si può aiutare con una fettuccia metrica a terra.

Se invece ci si trova a dover acquisire un oggetto a terra, ad esempio un ambiente in uno scavo archeologico, oltre alle operazioni già viste per le acquisizioni frontali, occorre:

- in base alle esigenze valutare se è opportuno o meno utilizzare l'asta topografica (in genere se ne può fare a meno se la distanza di presa è inferiore a 1,5 m)
- inclinare o meno la camera, a seconda della luce, dell'area da riprendere e della libertà di movimento (anche per evitare di riprendere le proprie scarpe!)
- se il rilievo del soggetto di interesse richiede l'uso dell'asta, provvedere ad inclinare la stessa e la camera in modo da ottenere viste il più possibili zenitali.

Una volta fatte tutte le valutazioni opportune riguardanti l'oggetto di interesse, si può procedere quindi ad approntare la strumentazione:

- se si utilizza l'asta, avvitare ad essa la camera mediante la testa tilt regolabile, che dispone di un'apposita rotella;
- connettere la camera al cavo usb e alla prolunga e collegarlo al tablet;
- accendere il tablet;
- avviare *Evo Capture*.

In casi particolari (per praticità o per esigenze specifiche) si può anche procedere all'acquisizione delle immagini, senza il supporto del tablet e quindi del software *Evo Capture*. In questo caso si raccomanda di scattare prestando molta attenzione tra uno scatto e l'altro tenendo a mente il principio di sovrapposizione.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Si riportano di seguito non solo i riferimenti ai lavori citati nel testo ma anche una breve rassegna degli studi più indicativi inerenti le tematiche affrontate nel progetto. In ultimo l'elenco dei siti web consultati.

- ACCARDO 2007** = Accardo G., *I mille volti dell'arte del restauro*, in "Geomedia", speciale 2007, pp. 6-12.
- AGOSTINI sd** = Agostini S., *Fotogrammetria architettonica: programmi e metodi*. Scaricabile all'indirizzo: http://www.interstudio.net/pdf/fotogrammetria_architettonica.pdf
- ALVISI 1989** = Alvisi G., *La fotografia aerea nell'indagine archeologica*, Roma.
- AMICI 2009** = Amici C.M., *Selinunte, Tempio C: analisi tecnica per la ricostruzione*, in "Palladio", 44, Roma, pp. 1-29.
- AMICO et al. 2009** = Amico N., Angelini A., Franchi R., Gabrielli R., Landini B., Menci L., *The Ancient Drainage system of Petra: analysis and restoration for cultural heritage conservation methodologies applied to the conservation of the monumental palace tomb*, in Proceedings 4th International Congress on "Science and Technology for the safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin", Cairo, Egypt, December 2009, vol II, B, pp. 336-341.
- AMOROSO et al. 2009** = Amoroso A., Bianchini M., Di Gennaio F., Fraioli F., Merlo M., *Strutture semipogee nell'Ager Fidenatis*, in Suburbium, 2. Il suburbio di Roma dalla fine dell'età monarchica alla nascita del sistema delle ville (V-II secolo a.C.), Roma 2009, pp. 347-367.
- ANGELINI et al. 2007** = Angelini A., Colosi F., Gabrielli R., Fentress E., Filippine C., *Tecniche speditive per la ricostruzione tridimensionale dell'area archeologica di Villa Magna*, in "Archeologia e Calcolatori", 18, pp. 141-158.
- APPOLONIA et al. 2007** = Appolonia L., De Gattis G., Salonia P., *Il rilievo della cinta urbana di Augusta Praetoria*, in "Bollettino della Soprintendenza per i beni e le attività culturali della Valle d'Aosta", 4, 2007, pp. 21-29.
- AZZENA – TASCIO 1996** = Azzena G., Tascio M., *Il Sistema Informativo Territoriale per la Carta Archeologica d'Italia*, in Marchi M.L., Sabbatici G., (a cura di), *Venusia (Forma Italiae, 37)*, Firenze, pp. 281-297.
- BALLETTI – GUERRA 2006** = Balletti C., Guerra F., *Il rilievo per la rappresentazione 3D: la città romana di Grumentum*, in Atti del Convegno Nazionale SIFET "Le nuove frontiere della rappresentazione 3D", Castellaneta Marina, Taranto, 14-16 giugno 2006.
- BARCELO et al. 2000** = Barcelò J.A., Forte M., Saunders D.H., (a cura di), *Virtual Reality in Archaeology*, Oxford.
- BARTOLINI – SALZOTTI 2003-2004** = Bartolini G., Salzotti F., *Disegno e rilievo archeologico mediante strumentazione informatica*, dispense per il corso di Laurea in Conservazione, Gestione e Comunicazione dei beni archeologici Sede di Grosseto.
- BEZOARI et al. 1992** = Bezoari G., Monti C., Selvini A., *La fotogrammetria per l'architettura*, Napoli.
- BIANCHINI 2008** = Bianchini M., *Manuale di rilievo e di documentazione digitale in archeologia*, Roma.
- BIANCHINI 2010 (b)** = Bianchini M., *La volta della Grande Aula*, in UNGARO et al. 2010, pp. 44-58.
- BIANCHINI 2010** = Bianchini M., *La ricostruzione del corpo centrale*, in UNGARO et al. 2010, pp. 59-75.
- BITELLI 2002** = Bitelli G., *Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei Beni Culturali*, in Atti della 6° Conferenza Nazionale ASITA, Perugia (5-8 novembre), vol. 1, pp. 9-24.
- BITELLI et al. 2007** = Bitelli G., Girelli V.A., Remondino F., Vittuari L. 2007, *Tecniche digitali per il rilievo, la rappresentazione e la modellazione 3D in archeologia: il caso di Tilmen Höyük (Turchia)*, in Atti della 11° Conferenza Nazionale ASITA, Torino (6-9 novembre), pp. 427-432.
- BONINO et al. 2005** = Bonino R., Gasco G., Massa A., Rossi S., *Photogrammetric methods applied to the representation of curve facades: an experiment conducted into Palazzo Carignano in Turin*, in Proceedings of XX International Symposium CIPA, (Torino 26 Settembre-01 Ottobre).
- BONORA 2003** = Bonora V., *Studio per una metodologia di rilievo in campo archeologico con utilizzo di pallone frenato e fotogrammetria digitale*, in Atti delle Quarte Giornate Elime, Erice 2000, Pisa, pp. 71-80.
- BONORA et al. 2007** = Bonora V., Rinaudo F., Tucci G., *Il campanile di Giotto. Scansioni laser e ortofoto di precisione per il controllo e la manutenzione del rivestimento lapideo delle facciate*, in Atti della 11° Conferenza Nazionale ASITA, Torino, (6-9 novembre).
- BORRA 2000** = Borra D., *La modellazione virtuale per l'architettura antica. Un metodo verso l'isomorfismo percettivo*, in "Archeologia e Calcolatori", 11, pp. 259-272.

- CAIROLI GIULIANI 1976** = Cairoli Giuliani F., *Archeologia e documentazione grafica*, Roma
- CAIROLI GIULIANI 2008** = Cairoli Giuliani F., *Prefazione*, in BIANCHINI 2008.
- CAMIN 2009** = Camin L., *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.
- CAMPANA – FORTE 2001** = Campana S., Forte M., (a cura di), *Remote Sensing in Archaeology*, XI ciclo di lezioni sulla ricerca applicata in archeologia, (Certosa di Pontignano, Siena, 6-11 dicembre 1999), Firenze.
- CAMPANA – FRANCOVICH 2006** = Campana S., Francovich R., (a cura di), *Laser scanner e GPS. Paesaggi archeologici e tecnologie digitali*, Firenze.
- CAMPANA 2004** = Campana S. *Le immagini da satellite nell'indagine archeologica: stato dell'arte, casi di studio, prospettive*, in “Archeologia Aerea”. Studi di Aerotopografia Archeologica, 1, Roma, pp. 279-299.
- CAMPANA 2005** = Campana S., *Tecnologie GPS e Personal Data Assistant applicati all'archeologia dei paesaggi*, in “Archeologia e Calcolatori”, 16, pp. 199-224.
- CAMPANA 2006** = Campana S., *Archeologia dei paesaggi medievali della Toscana: problemi, strategie, prospettive*, in Maggioro F., Mancassola N., (a cura di), *Medioevo, paesaggi e metodi*, pp. 25-50.
- CANTINI 2001** = Cantini F., *S. Miniato (Pisa), loc. San Genesis, Notizie e lavori sul campo*, in “Archeologia Medievale”, XXVIII, p. 407.
- CANTINI 2005 (b)** = Cantini F., *Ad ecclesie Sancti Genesisii, in vico qui dicitur Uualari. Indagini archeologiche in località San Genesisio (San Miniato, Pisa). Campagne 2001-2004: dati preliminari*, in Francovich R., Valenti M. (a cura di), *Progetto Archeologia dei Paesaggi Medievali. Relazione Progetto (2000-2004)*, Siena, pp. 163-174.
- CANTINI 2005** = Cantini F., *Il Medioevo in Toscana. San Genesisio di Vico Uualari*, in “Archeologia Viva”, XXIV, n. 113, pp. 66-68.
- CANTINI 2006** = Cantini F., *La chiesa e il borgo di san Genesisio (San Miniato, Pisa): quinta campagna di scavo (giugno-agosto 2005)*, Notiziario della Soprintendenza Archeologica della Toscana, pp. 388-390.
- CANTINI c.s.** = Cantini F., c.s., “*Ecclesia illa cui vocabulum fuit Sancti Genesi*”: *genesio, crescita e distruzione di una grande pieve rurale del medio Valdarno. Risultati preliminari dello scavo archeologico (campagne 2001-2006)*, Atti del Convegno “Il Valdarno inferiore terra di confine nel basso Medioevo” (30 settembre – 2 ottobre 2005), Deputazione di Storia Patria per la Toscana, Fondazione Montanelli Bassi, Sezione Valdarno dell'Istituto Storico Lucchese.
- CANTINI SALVESTRINI 2010** = Cantini F., Salvestrini F. (a cura di), *Vico Wallari – San Genesisio. Ricerca storica e indagini archeologiche su una comunità del medio Valdarno inferiore fra alto e pieno Medioevo*, Firenze.
- CANTONE 2004-2005** = Cantone F., *Sistemi di gestione informatizzata integrata dei dati archeologici. Protocolli operativi, Qualità Management, processi di trasferimento tecnologico. Linee di intervento presso l'Heraion alla Foce del Sele e il sito di Cuma*, Tesi di dottorato Università degli Studi di Napoli Federico II, Dottorato Interpolo in Conservazione Integrata dei Beni Culturali ed Ambientali, XVII ciclo.
- CAPRIOLI et al. 2003** = Caprioli M., Minchilli M., Scognamiglio A., Strisciuglio G., *Architectural and natural heritage: virtual reality with Photogrammetry and Laser Scanning*, in Proceedings of XIX International Symposium CIPA, Antalya (30 settembre - 4 Ottobre 2003).
- CARLI et al. 2006** = Carli S., Cipriani E.L., Bresci D., Danese C., Iannotta P., Pranzino E., Rossi L., Wetzel L., *Tecniche di monitoraggio dell'evoluzione delle spiagge*, in “Segnali ambientali in Toscana 2006. Indicatori ambientali e quadri conoscitivi per la formazione del Piano Regionale di Azione Ambientale” a cura della Regione Toscana, pp.125-165, consultabile all'indirizzo:
- CARLINO 2007** = Carlino A., *Valle dei templi: dalla nascita dell'archeologia al laser scanner 3D*, in “Geomedia”, speciale 2007, pp. 24-26.
- CARMIGNANI et al. 2007 (b)** = Carmignani L., Gruppioni G., Salvi M.C., Salvini R., Bulgarelli M.G., Gallotti R., Kieffer G., Piperno M., *Melka Kunture: tecniche digitali per l'archeologia preistorica*, in “Geomedia”, speciale 2007, pp. 28-32.
- CARROZZINO et al. 2005** = Carrozzino M., Tecchia F., Bacinelli S., Cappelletti C., Bergamasco M. 2005, *Lowering the development time of multimodal interactive application: the real-life experience of the*

- XVR project*, in Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, ACE 2005 (Valencia, Spain, 2005), vol. 265, New York, ACM, pp. 270-273.
- 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 2005** = Ceccaroni F., *Generazione di ortofoto ad alta risoluzione su scansione laser: il sistema Z-Map di Menci Software*, in “Geomedia”, 1, pp.26-28.
- CERAUDO 1999** = Ceraudo G. *Introduzione all'aerofotogrammetria applicata all'archeologia*, Ponza.
- CHENE et al. 1999** = Chené A., Foliot P., Réveillac G., *La fotografia in archeologia*, Milano.
- CHEVALLIER 1969** = Chevallier R., *Photogrammétrie et archéologie*, Paris.
- CIAMPOLTRINI 1995** = Ciampoltrini G., *L'insediamento tra Era e Elsa dall'età dei metalli alla tarda antichità*, in *Le colline di S. Miniato (Pisa). La natura e la storia*, (Quaderni del Museo di Storia Naturale di Livorno. Vol. 14 – Supplemento n.1), pp. 59-77.
- CONOLLY – LANE 2006** = Conolly J., Lane M., *Geographical information systems in archaeology*, Cambridge.
- CUCARZI 1995** = Cucarzi M., *Sistemi informativi territoriali e prospezioni archeologiche: una convergenza necessaria*, in “Archeologia e Calcolatori”, 6, pp. 61-73.
- CUNDARI 1983** = Cundari C., *Fotogrammetria architettonica*, Roma.
- D'ANDRIA - SEMERARO** = D'Andria F., Semeraro G., *Applicazioni GIS alla ricerca archeologica. Modelli di formalizzazione dei dati*, in *I modelli nella ricerca archeologica, Il ruolo dell'informatica*, Atti del Convegno di Roma Accademia dei Lincei, (24-25 Novembre 2000), Roma, pp. 77-105.
- D'AMELIO et al. 2004** = D'Amelio S., Emmolo D., Lo Brutto M., Villa B., *Il rilievo delle superfici curve della cappella palatina di Palermo*, in Atti del Convegno eArCom04, tecnologie per comunicare l'architettura, Ancona, 2004, pp. 269-274.
- DE FELICE et al. 2007** = 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.
- DE TROIA et al. 2008** = De Troia V., Machetti P., Remoti E., Spinetti A., *Reperti archeologici in fibra organica e legno da ambienti umidi: problemi di documentazione e di gestione ai fini scientifici ed espositivi*, in “GRADUS”, pp. 27-41.
- DELLO IACOVO 2010** = Dello Iacovo L., *Tecnoartigiani della cultura*, NOVA, sole24ore, 24 marzo 2010.
- DOMINICI et al. 2000** = Dominaci D., Grassi S., Radicioni F., *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”, Ancona 23 giugno, pp. 33-42.
- DORREL 1989** = Dorrel P.G., *Photography in archeology and conservation*, Cambridge manual in archaeology, Cambridge University Press.
- DUBBINI – ZANUTTA 2002** = 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, Perugia (5-8 novembre), Vol. II, pp. 1091-1098.
- EMMOLO 2003-2004** = Emmolo D., *Nuovi Sensori Digitali Aviotrasportati*, Tesi di Dottorato in Scienze Geodetiche e Topografiche, XIX ciclo, Università degli Studi di Napoli “Parthenope”.
- FABRIS et al. 2008** = Fabris M., Achilli V., Boatto G., Bragagnolo D., Menin A., *Integrazione di metodologie di rilievo terrestre ad alta risoluzione per il rilievo di Fossili*, in Atti della 12° Conferenza Nazionale ASITA, L'Aquila (21-24 Ottobre), pp. 1097-1102.
- FABRIS et al. 2007** = Fabris M., Achilli V., Bragagnolo D., Menin A., Ongarato F., Salemi G., *Analisi di procedure per texture mapping. Test site: il cortile cinquecentesco del palazzo del Bo a Padova*, in Atti della 11° Conferenza Nazionale ASITA, Torino (6-9 novembre), pp. 1-6.
- FABRIS et al. 2007(b)** = 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, Torino (6-9 novembre), 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, Brescia (9-12 novembre), pp. 947-952.

- FAVIA et al. 2009** = Favia P., Giuliani R., Mangialardi N.M., Stoico F., *Indagine archeologica sul sito di Montecorvino nel Subappennino dauno: primi scavi della cattedrale e dell'area castrense*, in V Congresso Nazionale di Archeologia Medievale (Foggia-Manfredonia, 30 settembre-1 ottobre 2009), a cura di Giuliano Volpe e Pasquale Favia, Firenze, 2009, pp. 165-186.
- FONDELLI 1992** = Fondelli M., *Trattato di fotogrammetria urbana e architettonica*, Firenze.
- FORESTA 2008-2009** = Foresta F., *La produzione della cartografia numerica: dai fotogrammi aerei al file vector*, Tesi di Laurea in Informatica percorso Geomatica, Facoltà di Scienze e Tecnologie, Università degli Studi di Napoli "Parthenope".
- FORTE 2002** = Forte M., *I Sistemi Informativi Geografici in Archeologia*, Roma.
- FORTE 2008** = Forte M., (a cura di), *La Villa di Livia: un percorso di ricerca di archeologia virtuale*, Roma.
- FRANCOVICH – VALENTI 2000** = Francovich R., Valenti M., *La piattaforma GIS dello scavo ed il suo utilizzo*, in Brogiolo G.P., (a cura di), *II Congresso Nazionale di Archeologia Medievale*, (Brescia, settembre 2000), Firenze, pp.11-20.
- FRONZA et al. 2009** = Fronza V., Nardini A., Valenti M., *Informatica e Archeologia Medievale. L'esperienza senese*, Firenze.
- GABRIELLI 1994** = Gabrielli F., *Le tecniche fotografiche in archeologia*, Università degli Studi di Pisa, Scuola di specializzazione per archeologia, Pisa.
- GABRIELLI 2001** = Gabrielli R., *Introduzione all'uso del GPS in archeologia*, in S. Campana, M. Forte (a cura di), *Remote Sensing in Archaeology*, XI Ciclo di lezioni sulla ricerca applicata in archeologia, (Certosa di Pontignano, Siena 6-11 dicembre 1999, Firenze 2001), pp. 329-354.
- GABRIELLI et al. 2008** = Gabrielli R., Angelini A., Franchi R., Drap P., *Antica rete idrologica di Petra. Studio e restauro nell'ottica della conservazione dei beni architettonici*, in "Archeologia e Calcolatori" 19, pp. 323-341.
- GABRIELLI et al. 2008(b)** = Gabrielli R., Angelini A., Vannini G., Nucciotti M., Menci L., *Nuovo sistema di fotogrammetria digitale da pallone aerostatico: il caso di studio del castello di Shawbak*, in Atti della 12° Conferenza Nazionale ASITA, L'Aquila (21-24 ottobre), pp. 1167 – 1172.
- GALETTO – SPALLA 2000** = Galetto R., Spalla A., *Fotogrammetria in Lezioni di Topografia*, Pavia, pp.220- 288.
- GILLINGS et al. 1999** = Gillings M., Mattingly D., Van Dalen J., (a cura di), *Geographical Information Systems and Landscape Archaeology, The Archaeology of Mediterranean Landscape*, Oxford.
- GIORGI 2003** = Giorgi E., *Riflessioni sul valore del rilievo archeologico nella documentazione dei siti archeologici*, in "Ocnus", 11, pp. 107-133.
- GIUNTA et al. 2005** = Giunta G., Di Paola E., Morlin Visconti Castiglione B., Menci L., *Integrated 3D-database for diagnostics and documentation of Milan's cathedral facade*, in Proceedings of XX International Symposium CIPA, Torino (26 Settembre-01 Ottobre). **GOTTARELLI 1997** = Gottarelli A., (a cura di), *Sistemi informativi e reti geografiche: GIS-internet in archeologia*, Firenze.
- GUAITOLI 2001** = Guaitoli M., *I sistemi informativi territoriali in rapporto al patrimonio archeologico*, in Atti del quarantesimo convegno di studi sulla Magna Grecia, Taranto. http://www.rete.toscana.it/sett/pta/stato_ambiente/segnali_ambientali/2006/segnali_ambientali_2006_1_eggero.pdf
- KRAUS 1994** = Kraus K., *Fotogrammetria. Teoria e applicazioni*, Torino.
- LASAPONARA et al. 2007** = Lasaponara R., Masini N., Scardozzi G., *Immagini satellitari ad alta risoluzione e ricerca archeologica: applicazioni e casi di studio con riprese pancromatiche e multispettrali di QuickBird*, in "Archeologia e Calcolatori" 18, pp. 187-228.
- LO BRUTTO - SPERA 2010** = Lo Brutto M., Spera M.G., *Rilievo 3D di reperti archeologici con tecniche fotogrammetriche*, in Atti della 14° Conferenza Nazionale ASITA, Brescia (9-12 novembre), pp. 1177-1182.
- LO BRUTTO – SPERA 2011** = Lo Brutto M., Spera M.G., *Image-based and range-based 3D modelling of archaeological cultural heritage: the Telamon of the Temple of Olympian Zeus in Agrigento (Italy)* in Proceedings of the 4th ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2011: "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", Trento, Italy, 2-4 March 2011, a cura di Remondino F., El-Hakim S., XXXVIII-5/W16.

- LO BRUTTO 2009** = Lo Brutto M., *Tecniche per la misura e il monitoraggio della superficie del fondo di un modello fluviale*, in Atti del Convegno Nazionale SIFET “Dalle misure al modello digitale” (pp.57-58).
- LONG 2005** = Long B., *Fotografia digitale: il manuale*, Milano.
- MARANGONI – GEDDO 1996** = Marangoni R., Geddo M., *Le immagini digitali, formati e gestione*, Milano.
- MARCOLONGO et al. 2009** = Marcolongo A., Salonia P., Scolastico S., *Experimentation of a three-focal photogrammetric survey system as non invasive technique for analysis and monitoring of painting surfaces decay condition* in Lasers in the Conservation of Artworks VIII, Atti del Convegno Internazionale, London 2009, pp. 185-190.
- MARINUCCI 1989** = Marinucci M., *La fotocamera*, Bologna.
- MASCIONE 2006** = Mascione C., *Il rilievo strumentale in archeologia*, Roma.
- MEDRI 2003** = Medri M., *Manuale di rilievo archeologico*, Roma-Bari.
- MENCI – CABRUCCI 2005** = Menci L., Cabrucci A., *Fotogrammetria digitale e scansione laser, similitudini e differenze: la nostra esperienza*. in Atti della 5° Conferenza Nazionale ASITA, Rimini, (15-18 novembre), vol 2.
- MENCI – CECCARONI 2003** = Menci L., Ceccaroni F., *Fotogrammetria Digitale*, in Atti della 7° Conferenza Nazionale ASITA, Verona (28-31 ottobre).
- MENCI – CECCARONI 2008** = Menci L., Ceccaroni F., *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 – RINAUDO 2000** = Menci L., Rinaudo F., *CYCLOP: acquisizione e restituzione di riprese stereoscopiche senza punti di appoggio*, in Atti della 4° Conferenza Nazionale ASITA, Genova (3-6 Ottobre), Vol. 2, pp. 1087-1092.
- MENCI 2002** = Menci L., *Tecnologie innovative per la gestione di immagini raster tridimensionali ad altissima risoluzione*, in “Geomatica per l'ambiente, il territorio e il patrimonio culturale”, Atti della 6° Conferenza Nazionale ASITA, Perugia (5-8 Novembre).
- MENCI 2004** = Menci L., *ZMap: stazione digitale multisensore per una moderna produzione di dati cartografici* in “Geomedia“ Reports. 4, pp. 26-29.
- MENCI et al. 2001**= Menci L., Ceccaroni F., Salonia P., *Exploring 3D models in a stereoscopic way: a tool for knowledge, documentation and measurement of cultural heritage*.
- MENCI et al. 2002**= Menci L., Giunta G., Ceccaroni F., Di Paola E., Morlin Visconti Castiglione B., *Applicazioni avanzate della fotogrammetria digitale: l'uso della stereofotocarta come supporto per la mappatura tridimensionale di strutture portanti del Duomo di Milano*, in Atti della 6° Conferenza Nazionale ASITA, Perugia (5-8 Novembre), vol 2, 1521-32.
- 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 11° Conferenza Nazionale ASITA, Torino (6-9 novembre).
- MENCI et al. 2008** = Menci L., Moranti T., Vangi D., *Misura della deformazione di veicoli soggetti a incidenti stradali tramite la fotogrammetria*, in XXXVII Convegno Nazionale AIAS, Roma 2008.
- MIGLIARI 2001** = Migliari R., (a cura di), *Frontiere del rilievo. Dalla matita alle scansioni 3D*, Roma.
- NEX – RINAUDO 2008** = Nex F., Rinaudo F., *Multi-image matching: an “old and new” photogrammetric answer to LIDAR techniques*, in International Archives of the Photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information Sciences, Beijing XXXVII/B5, 2008, pp.621-626.
- NICCOLUCCI 2000** = Niccolucci F., (a cura di), *Virtual Archaeology*. Proceedings of the VAST Euroconference, (Arezzo, 24-25 Novembre 2000), Oxford.
- ORAZI 2000** = Orazi R., *Procedure standard per la registrazione degli interventi di restauro. Ipotesi di applicazione a Khor Rori, Oman*, in “Archeologia e Calcolatori”, 11, pp.199-218.
- PARENTI et al. 2010** = Parenti R., Vecchi A., Gilento P., *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 2005** = Peloso D., *Tecniche laser scanner per il rilievo dei beni culturali*, in “Archeologia e Calcolatori”, 16, pp. 177-197.
- PERIPIMENO – SALVADORI 2005** = Peripimeno M., Salvadori F., *Modellazione tridimensionale*, in R. Francovich e M. Valenti (a cura di), *Archeologia dei Paesaggi Medievali. Relazione Progetto (2000-2004)*, Siena, 2005, pp. 561-637.

- PERIPIMENO – SALZOTTI 2006** = Peripimeno M., Salzotti F., *La stratigrafia archeologica dal rilievo per mezzo di tecniche laser scanning alla gestione 3D in ambiente GIS* in Atti del 51° Convegno Nazionale SIFET, Castellaneta Marina, Taranto, 14-16 giugno 2006.
- PERIPIMENO 2009** = Peripimeno M., *Rilievo di monumenti e stratigrafie: l'uso del laser scanner*, in Fronza *et al.*, pp.111-130
- PESCI *et al.* 2009** = Pesci A., Loddo F., Casula G., Ceccaroni F., Bianchini D., Baldi P., Menci L., *An experiment for Zscan Efficiency in Surface Monitoring*, Rapporti tecnici INGV, anno 2009, 121.
- PICCARRETA – CERAUDO 2000** = Piccarreta F., Ceraudo G., *Manuale di aerofotografia archeologica: metodologia, tecniche e applicazioni*, Bari.
- PICCARRETA 1987** = Piccarreta F., *Manuale di fotografia aerea: uso archeologico*, Roma.
- PICCARRETA 1992** = Piccarreta F., *Fotogrammetria finalizzata all'archeologia: il contributo del calcolatore*, "Archeologia e Calcolatori", III – 1992, pp. 101-120.
- RAPANÀ 2010** = Rapanà M., *Verso nuove forme di documentazione archeologica. La modellazione tridimensionale tra applicazioni e limiti di utilizzo*, in "Archeomatica", I IV, pp. 14-18.
- REDI 2010-2011** = Redi F., *L'archeologia del costruito in situazioni critiche o di emergenza*, Prolusione, Cerimonia di Inaugurazione aa.2010-2011, Università degli Studi dell'Aquila.
- ROMEO 2002** = Romeo M., (a cura di), *Architettura digitale. Tecnologie ed applicazioni informatiche per l'architettura.*, edizione n 2, note a fine didattico nell'ambito dell'Università degli studi di Firenze, Facoltà di Architettura, Firenze 2002 scaricabile al sito www.gen-eng.florenze.it/ad
- SALONIA 2000** = Salonia P., *Tecnologie informatiche per la gestione delle conoscenze nella conservazione del costruito storico* in "Archeologia e Calcolatori" 11, pp. 219-240.
- SALONIA *et al.* 2005** = Salonia P., Negri A., Valdarnini L., Scolastico S., Bellucci V., *Quick photogrammetric systems applied to documentation of Cultural Heritage: the example of Aosta roman city wall*, in Proceedings of XX International Symposium CIPA, Torino (26 Settembre-01 Ottobre).
- SALONIA *et al.* 2007** = Salonia P., Bellocci V., Scolastico S., Marcolongo A., Leti Messina T., *3D survey technologies for reconstruction, analysis and diagnosis in the conservation process of cultural heritage*, in Proceedings of XXI International Symposium CIPA, Athens (1-6 Ottobre).
- SALONIA *et al.* 2008** = Salonia P., Leti Messina T., Marcolongo A., Pozzi A., Scolastico S., *A multimedia application for exploitation and virtual fruition of ancient archaeological artifacts: the experience of the 2nd Century roman Balteus of Aosta* in Proceedings of VSMM 2008: Digital Heritage: Our Hi-tech-STORY for the Future, Cypro.
- SALONIA *et al.* 2009** = Salonia P., Scolastico S., Marcolongo A., Leti Messina T., Pozzi A., *Three focal photogrammetry application for multi-scale and multi-level cultural heritage survey, documentation and 3D reconstruction*, in Proceedings of XXII International Symposium CIPA, Kyoto (11-15 ottobre).
- SALVADORI 2009** = Salvadori F., *Modellazione dei reperti* in FRONZA *et al.* 2009; pp. 131-148.
- SALVINI *et al.* 2007** = Salvini R., Firpo G., Carmignani L., Fantozzi P.L., Aiello E., Corniani M., Massa G., Bonciani F., Lapini M., Cocca P., *Studio della frana di Guadine (MS) attraverso fotogrammetria digitale terrestre, laser scanner e rilievi geologici*, in Atti della 11° Conferenza Nazionale ASITA, Torino, (6-9 novembre).
- SALZOTTI 2005** = Salzotti F., *L'esperienza dell'area di Archeologia medievale dell'Università di Siena nella produzione di cartografia archeologica mediante sistemi GIS e tecniche di rilevamento topografico* in Atti del 50° Convegno Nazionale SIFET, Mondello (PA), 29 giugno — 01 luglio 2005.
- SELVINI – GUZZETTI 2000** = Selvini A., Guzzetti F., *Fotogrammetria generale*, Torino.
- SELVINI 1994** = Selvini A., *Elementi di fotogrammetria*, Milano.
- TUCCI *et al.* 2004** = Tucci G., Bonora V., Costantino F., Ostini D., *Metodi di rilievo tridimensionale a confronto: affidabilità metrica e capacità descrittive* in Atti del Workshop "e-Arcom -Tecnologie per comunicare l'architettura", Ancona, 20-22 maggio 2004.
- UNGARO *et al.* 2010** = Ungaro L., Del Moro M.P., Vitti M., (a cura di), *I mercati di Traiano restituiti. Studi e restauri 2005-2007*, Roma.
- VALENTI 2000** = Valenti M., *La piattaforma GIS dello scavo nella sperimentazione dell'Insegnamento di Archeologia Medievale dell'Università di Siena. Filosofia di lavoro e provocazioni, modello dei dati e "soluzione GIS"*, in "Archeologia e Calcolatori", 11, 2000, pp. 93-104.
- VANNINI 2009** = Vannini G., (a cura di), *Da Petra a Shawbak, archeologia di una frontiera*, in "Archeologia Viva", 135, Maggio-Giugno, pp.18-31.

VISINTINI *et al.* 2006 = Visintini D., Fico B., Spangher A., *Modellazione 3D dell'ambiente urbano mediante integrazione di scansioni laser aeree e terrestri: l'esempio del castello di Gorizia*, 51° Convegno Nazionale SIFET, Castellaneta Marina, Taranto, 14-16 giugno 2006.

WISEMAN – EL BAZ 2007 = Wiseman J., El Baz F., (a cura di), *Remote Sensing in Archaeology*, Boston.

<http://fotografia.pastrugni.com/news/all.php>

http://it.wikipedia.org/wiki/Obiettivo_fotografico

[http://it.wikipedia.org/wiki/San_Genesio_\(sito_archeologico\)](http://it.wikipedia.org/wiki/San_Genesio_(sito_archeologico))

www.agea.info

www.chrysis.net

www.digitalsurvey.it

www.fotoespera.it

www.luccaromana.com

www.menci.com

www.nital.it

www.paesaggimedievali.it

www.rilievoarcheologico.it

www.rivistageomedia.it