

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

Anno Accademico 2010/2011

**LA MODELLAZIONE 3D APPLICATA AI BENI
ARCHEOLOGICI ATTRAVERSO LA
FOTOGRAMMETRIA**

Elaborato finale

Titolo Cognome e Nome del Candidato

Dr.ssa Maria Cristina Manzetti

Tutor Aziendale

Titolo Cognome e Nome del Tutor Aziendale

Dr.ssa Francesca Ceccaroni

Tutor Universitario

Titolo Cognome e Nome del Tutor Universitario

Dr. Riccardo Salvini

San Giovanni Valdarno (AR)

19 Dicembre 2011

Ringrazio il mio tutor il Dott. Riccardo Salvini per avermi fatto appassionare alla fotogrammetria per merito del suo interesse verso la materia.

Ringrazio tutta la ditta Menci Software di Arezzo, in particolare l'Ing. Luca Menci per avermi dato la possibilità di vivere un'esperienza tanto significativa, la Dott.ssa Francesca Ceccaroni per avermi assistito durante questo percorso, l'Ing. Claudio Tortorelli e l'Ing. Daniele Bianchini per la loro estrema pazienza e per le loro esaustive spiegazioni, la Dott.ssa Debora Caldarelli per il confronto continuo tra noi e la condivisione della maggior parte dei momenti formativi in azienda.

Ringrazio la ditta GeoRes di Roma per la sua disponibilità.

Ringrazio la mia famiglia che, nonostante la lontananza da essa durante questo periodo, l'ho sentita ancora più vicina.

INDICE

Abstract	p. 1
Introduzione	p. 3
1: La fotogrammetria	p. 4
2: Prodotti e metodi della Menci Software	p. 6
2.1.: Stereoscopia	p. 6
2.2.: Gestione immagini e dati	p. 7
2.3.: Ricostruzione e modellazione	p. 7
3: ZScan: sistema di produzione di nuvole di punti da immagine	p. 8
3.1.: Funzioni ed utilizzo	p. 8
3.2.: Estensioni ZScan	p. 10
3.3.: Test ZScan	p. 11
4: ZScanEVO: evoluzione di ZScan	p. 18
4.1.: Funzioni e applicazioni	p. 18
5: ZScanEVO, due casi di studio: Laurentina Vetus e catacomba di Santa Ciriaca	p. 23
5.1.: Sito archeologico della Laurentina Vetus	p. 23
5.1.1.: Rilievo dell'antico basolato stradale di epoca romana	p. 24
5.1.2.: Rilievo della parete rocciosa	p. 28
5.2.: Sito archeologico della catacomba di Santa Ciriaca	p. 30
5.2.1.: Rilievo di una parete in opera mista	p. 31

5.2.2.: Rilievo di una parete di loculi	p. 34
5.3.: Osservazioni conclusive	p. 37
6: Tecniche di rilievo archeologico	p. 38
6.1.: Stazione totale	p. 38
6.1.1.: Applicazioni stazione totale	p. 39
6.2.: GPS	p. 39
6.2.1.: Applicazioni GPS	p. 40
6.3.: Laser scanning	p. 41
6.3.1.: Applicazioni laser scanning	p. 41
6.4.: Osservazioni conclusive	p. 43
7: La geoarcheologia	p. 44
8: Conclusioni	p. 46
Bibliografia	p. 48

ABSTRACT

Nel mondo dell'archeologia, come in tutto il settore dei beni culturali, il rilievo riveste una fondamentale importanza. È per questo che con il passare degli anni uno dei primi obiettivi degli archeologi, e non solo il loro, è stato quello di perfezionarlo sempre di più, per ottenere un prodotto il più possibile fedele e che offra tanti spunti per lavorare sull'oggetto rilevato. Questo scopo è stato raggiunto recentemente con la fotogrammetria che essendo un sistema di misura da immagini restituisce, con gli opportuni accorgimenti, un rilievo preciso e fedele.

Ma negli ultimi anni la fotogrammetria ha reso ancora di più, permettendo la ricostruzione di modelli tridimensionali degli oggetti rilevati.

Questo studio si occupa proprio di quest'ultimo aspetto, che è stato sviluppato dalla ditta Menci Software di Arezzo, con opportuni sistemi di rilievo e rispettivi programmi di elaborazione. Quindi, affrontando preliminarmente uno studio dei prodotti della ditta stessa, in particolare di ZScan e ZScanEVO, ovvero quei sistemi che riproducono modelli 3D da immagini, si sono poi applicati direttamente sul campo, anche per verificarne l'efficacia e per sottolinearne tutti gli aspetti vantaggiosi. Nel sito archeologico della *Laurentina Vetus*, a Roma, è stato realizzato un rilievo di un tratto di basolato e di una parte di una parete rocciosa dovuta ad una remotissima colata lavica, quest'ultimo per dimostrare l'efficacia del prodotto anche in campo geologico; nella catacomba di Santa Ciriaca (sempre a Roma) si sono rilevate 2 pareti di loculi. Dopo i rilievi sul campo si è passati all'elaborazione dati con ottenimento oltre che del modello tridimensionale con mesh e texture, anche di DEM, profili, curve di livello, ortofoto e mosaici. Il tutto è stato svolto in tempi ragionevoli ed in modo semplice.

Come approfondimento dell'importanza del rilievo archeologico si è affrontato un breve studio sui diversi metodi, quali: stazione totale, GPS, laser scanning. Ed inoltre, per concludere, un capitolo è stato dedicato alla geoarcheologia per comprendere come sia di grande aiuto all'interpretazione archeologica il supporto della geologia.

ABSTRACT

In the world of archaeology, as in all sectors of the cultural heritage, the survey is of great importance. This is the reason why, with the slip by years, one of the first aims of archeologists, and not only theirs, is that of improve it more and more, to obtain a product as faithful as possible and giving some ideas to work with the surveyed object. Recently, this aim has been reached by photogrammetry, it being a measure's system by images gives back, with accurate devices, a survey accurate and truthful.

In the last years the photogrammetry got on even more, permitting the reconstruction of 3D models of detected objects.

This study treat this last aspect, that has been developed by Menci Software of Arezzo, with opportune survey's system and relative processing programs. So, approaching a preliminary study of the products of the same company, in particularly of ZScan and ZScanEVO, that is those systems that reproduce 3D models by images, then these have been applied in the field, also to verify their effectiveness and to underline all advantageous aspects. On the archaeological site of *Laurentina Vetus*, in Rome, it has been realized a survey of a stretch of road and of a part of a rock face due a very remote lava flow, the latter to demonstrate the effectiveness of the product in geology. In Santa Ciriaca's catacumba (always in Rome), two graves' walls have been surveyed. After these surveys there was processing's phase with getting of 3D models with mesh and texture, DEM, profiles, contours lines, orthophotos and mosaics. All this has been done in a reasonable time and in a simple way.

As close examination of importance of archeological survey a short study has been approached on the different methods, like: total station, GPS, laser scanning. And moreover, to conclude, a chapter has been dedicated to geoarcheology to understand as it's important the geology for the archeological interpretation.

Introduzione

Negli ultimi quindici anni l'evoluzione tecnologica del rilievo ha interessato anche l'archeologia, come tutto il settore dei beni culturali, apportando significative migliorie al prodotto finale, utilizzabile sia a scopo documentaristico, sia di valorizzazione che di divulgazione.

Fondamentale è stato l'apporto della fotogrammetria che oltre a restituire le dimensioni precise dell'oggetto o dell'area rilevata, a seconda se si tratti di fotogrammetria dei vicini o fotogrammetria aerea, ne rende possibile, attraverso la stereoscopia, la ricostruzione tridimensionale.

È quindi proprio lo sfruttamento dei principi fotogrammetrici l'oggetto principale di questo studio, realizzato con la ditta Menci Software di Arezzo.

Questa azienda, specializzata nella creazione di software di fotogrammetria da applicare ai beni culturali, e non solo, ha creato un sistema innovativo grazie al quale è possibile ottenere nuvole di punti attraverso i fotogrammi, sostituendo in tal modo il laser scanner che spesso risulta essere poco pratico ed ha costi e tempi di elaborazione elevati.

Si è stabilito, insieme alla Dott.ssa Francesca Ceccaroni della Menci Software, di approfondire nel mio progetto di stage l'applicazione di un loro nuovo prodotto per la fotogrammetria, ZScanEvo, ma di trattare anche le tecniche di rilievo archeologico in generale e di studiare la poco conosciuta disciplina della geoarcheologia.

Quindi, sono partita da uno studio preliminare della metodologia di lavoro e dei prodotti Menci Software, con approfondimento della strumentazione ZScan e della sua evoluzione ZScanEvo, applicando quest'ultima a due siti archeologici, proseguendo con uno studio comparato delle tecniche di rilievo archeologico quali stazione totale, GPS, laser scanner per evidenziarne vantaggi e svantaggi, per poi terminare con lo studio della geoarcheologia, in particolare per comprendere come la disciplina archeologica e quella geologica possano interagire al meglio tra loro.

Per quanto riguarda il lavoro di rilievo con ZScanEvo, realizzato con la collaborazione della ditta GeoRes di Roma, questo è stato svolto in due siti archeologici di Roma scoperti recentemente: la *Laurentina vetus* e la catacomba di Santa Ciriaca. L'obiettivo è stato innanzitutto quello di acquisire in modo corretto i dati, rielaborarli poi ottenendo un modello tridimensionale costituito dalla nuvola di punti ed infine ricavare da questo modello DEM, curve di livello, profili, ortofoto con mosaico, ovvero tutti quei prodotti utili allo studio dell'oggetto in questione. Si è così voluto sperimentare il nuovo prodotto Menci per verificarne l'efficienza.

1. La fotogrammetria

La tecnica fotogrammetrica si è diffusa tantissimo in campo archeologico, architettonico e urbanistico per eseguire rilievi, sarà per la sua grande precisione ma anche, molto importante, per il fatto che non è necessario un contatto diretto con l'oggetto da indagare e quindi questo non viene modificato.

Per ottenere dei buoni risultati è però importante considerare tutti i vari aspetti della fotografia e dell'oggetto che la realizza. Innanzitutto bisogna considerare il fatto che la fotografia è una ripresa verticale, o obliqua, prospettica di un oggetto o di una superficie in un dato momento. Essendo quindi un'immagine prospettica della realtà bisogna considerare la scala alla quale questa realtà viene rappresentata e la rispettiva variazione di scala nel caso la superficie o l'oggetto non sia completamente piano o comunque in caso la camera subisca degli spostamenti, e anche la differenza di scala presente tra il centro della foto e i bordi i quali risultano soggetti a deformazioni. Quindi per ricavare la scala del fotogramma e poter poi avere delle misure veritiere del soggetto inquadrato è necessario conoscere la lunghezza focale, il formato del negativo e l'angolo di apertura dell'obiettivo. Altri dati essenziali sono la distanza di presa e la grandezza di ciò che si è ripreso¹.

Altra caratteristica fondamentale delle fotografie da considerare sono le distorsioni. Ne esistono di due tipi: quelle delle lenti, difficilmente correggibili, e quelle inerenti la posizione del piano focale rispetto all'oggetto inquadrato, alle quali è possibile porre rimedio. Nel caso di rilievi dei quali si vogliono conoscere precisamente le misure, come in uno scavo archeologico, non conviene quindi usare grandangoli, per ridurre al minimo le deformazioni prospettiche. È anche fondamentale lavorare con una lunghezza focale superiore ai 50 mm per le fotocamere ottiche e superiore ai 15 mm per quelle digitali, per evitare distorsioni radiali² complicate da correggere.

In campo archeologico o architettonico è meglio lavorare con ampie profondità di campo, è quindi necessario che il diaframma sia piccolo e il tempo di esposizione lungo (è bene lavorare con il cavalletto in situazioni che lo richiedono). Nel caso di riprese inclinate di pareti o terreno è ancor più fondamentale che ci sia una grande profondità di campo.

1 La scala è uguale alla dimensione del piano focale diviso la dimensione dell'oggetto ripreso, uguale alla lunghezza focale diviso la distanza di presa.

2 Le distorsioni radiali corrispondono alla deformazioni delle linee rette reali quanto più l'oggetto ripreso è distante dal centro dell'inquadratura. Se la distanza focale è piccola aumenta l'angolo di ripresa e di conseguenza le deformazioni.

Le fotocamere digitali hanno al loro interno una matrice CCD formata da pixel, ognuno dei quali registra i colori reali, viene così elaborato il segnale ottico luminoso in formato digitale RGB.

Il rilievo architettonico ha come scopo l'interpretazione dell'oggetto, il monitoraggio dello stato di degrado, lo studio delle geometrie e la memorizzazione dell'oggetto rilevato.

Normalmente il procedimento più immediato per rilievi in ambito dei beni culturali è quello di realizzare dei fotopiani, ossia immagini realizzate con un'inclinazione e poi raddrizzate. A loro volta questi fotopiani vengono mosaicati, questo perché come detto prima non conviene lavorare con grandangoli e quindi nel caso di piante di scavo è meglio fare riprese di porzioni minori e poi riagganciarle, anche per una più agevolata gestione dei dati. Per realizzare un fotomosaico è importante che i diversi fotogrammi usati si sovrappongano, in parte, tra di loro. È utile creare un piano mentale delle foto da scattare e poi farlo in successione per evitare variazioni di luce che alterino la qualità cromatica. Vengono poi battuti 4 punti in modo poi da legare i fotogrammi tra di loro. Questi punti saranno poi scaricati sul computer e potranno essere visualizzati sia in formato di testo oppure in formato vettoriale. Tramite DigiCad vengono assegnati ai pixel le coordinate planari battute con la stazione, interpolando i pixel circostanti con quelli di coordinate noti si riesce a modificare l'immagine e a rimuoverne le distorsioni.

Il formato in cui trasformare le foto per poterle raddrizzare è PICT. Esportando poi l'immagine in CAD o GIS è possibile anche digitalizzare in formato vettoriale ogni singolo elemento ottenendo un rilievo metrico vettoriale, con GIS inoltre è possibile anche creare dei tematismi.

2. Prodotti e metodi della Menci Software

La ditta Menci Software è specializzata nell'elaborazione di metodi di misura da immagini, si occupa quindi di creare software di fotogrammetria sempre più semplificati, efficienti ed automatici. Di conseguenza il suo lavoro consiste anche nella calibrazione delle fotocamere, nella gestione dei dati e delle immagini, nella elaborazione di nuvole di punti, nella micro modellazione, nella restituzione grafica 2d, 2.5d e 3d.

I campi di applicazione dei prodotti Menci Software sono innumerevoli: dalla cartografia aerea al rilievo architettonico, dai beni culturali al restauro e all'archeologia, dalla ricostruzione di incidenti stradali alle perizie giudiziarie e alle misure industriali.

2.1. Stereoscopia

- StereoPro: nuovo sistema di stereo visione che supporta i normali monitor LCD e non richiede una scheda video stereo-ready, consente la visione stereo diretta, metodo passivo.
- ZGlif: strumento per la navigazione di modelli stereoscopici in anaglifo.
- StereoSpace: visualizzatore 3D di immagini stereoscopiche anche su comuni monitor grazie all'uso di ZGlif.
- StereoView: stazione fotogrammetrica che consente anche la creazione dell'orientamento interno dei fotogrammi automatico o semiautomatico, la creazione del loro orientamento assoluto, la creazione del modello e la restituzione stereoscopica delle coppie.
- Cyclop e SVCyclop³: sistema monocamera (con treppiedi e asta calibrata) e software con i quali si può lavorare direttamente in stereoscopia perché è mantenuto costante l'asse di presa.

Parte delle applicazioni di questi prodotti ha riguardato: un bassorilievo del Duomo di Milano⁴, le mura romane di Aosta⁵, l'arco trionfale di Augusto ad Aosta⁶ e la volta della Chiesa del Purgatorio ad Assisi⁷.

³ Menci - Rinaudo 2000.

⁴ Giunta - Di Paola - Mörlin Visconti Castiglione - Menci 2003.

⁵ Apollonia - De Gattis - Salonia 2007.

⁶ Salonia - Bellucci - Scolastico - Marcolongo - Leti Messina 2007.

⁷ Menci - Salonia 2007.

2.2. Gestione immagini e dati

- DarkLight: software i cui passaggi fondamentali sono 3: uso HDR, cioè la fusione di immagini esposte in modo diverso per ottenere un'immagine destinazione contenente le informazioni di luminosità e radianza appartenenti alle altre, rimappatura dei toni, conversione in immagini LDR (Low Dynamic Range).
- SiteManager: software per la gestione e la presentazione dei dati 3D tramite un ambiente grafico rapido ed intuitivo, permette di poter aggiungere alla visualizzazione 3D dei collegamenti a risorse web, immagini, ortofoto, vettoriali CAD.

2.3. Ricostruzione e modellazione

- DisPlan: software di ricostruzione 2D delle planimetrie stradali, opera in ambiente CAD con specifiche funzioni di inserimento veicoli, tracciamento di misure, rappresentazione di segnaletica, vegetazione e animali; si ottiene un disegno vettoriali preciso e descrittivo.
- Car Body Scanner: soluzione per la ricostruzione tridimensionale di porzioni di carrozzeria integre o danneggiate.
- Deformation⁸: software per la determinazione dei profili deformati dei veicoli e calcolo dell'energia deformante.
- ZMap Laser: software per la restituzione CAD e la produzione di ortofoto su nuvole di punti; offre funzioni avanzate per l'edit di superfici, la generazione di mosaici, la gestione e l'unione di modelli 3D, l'orientamento e il disegno su immagini.
- ZMap Plotter: soluzione stand-alone per la settorializzazione da modelli 3D stereoscopici.
- ZMap Flat: modulo che permette lo sviluppo di una superficie a singola curvatura in vista piana.

Con i prodotti della gamma ZMap⁹ è stato possibile realizzare interessanti lavori di ricostruzione tridimensionale, utili a scopo conservativo e di restauro, come nel caso del Castello del Valentino a Torino¹⁰, della facciata dei palazzi di Istanbul¹¹ ed il muro occidentale dell'agorà di Palmyra in Siria¹².

⁸ Menci – Morandi - Vangi 2008.

⁹ Menci 2004; Ceccaroni 2005.

¹⁰ Tucci - Bonora 2008.

¹¹ Dursun – Sagir – Büyüksalih – Buhur – Kersten - Jacobsen 2008.

¹² Fabris – Achilli – Bonardi – Bragagnolo – Favaretto – Frassine – Grassi – Menin - Targa 2010.

3. ZScan: sistema di produzione di nuvole di punti da immagine.

La Menci Software ha creato uno strumento innovativo che permette di ottenere la nuvola di punti per le ricostruzioni 3D direttamente dalle immagini fotografiche, senza quindi dover intervenire con il più scomodo e dispendioso laser scanner¹³.

3.1. Funzioni ed utilizzo

La strumentazione ZScan è composta da una fotocamera digitale reflex calibrata la quale viene impostata su di una barra in alluminio con slitta di precisione, agganciata ad un treppiede professionale ed il software di elaborazione¹⁴.

Per quanto possa sembrare scontato è fondamentale ricordare l'importanza di collocare con precisione il treppiede in relazione all'oggetto da rilevare per ottenere delle immagini qualitativamente ottimali, è quindi necessario considerare diversi fattori quali la distanza migliore alla quale posizionarsi (ZScan può lavorare da 1 a 20 mt di distanza) al fine di avere un buon compromesso tra porzione dell'oggetto inquadrato e dettaglio, se ci si trova su un terreno accidentato e quindi trovare una zona più pianeggiante possibile per non dover modificare di continuo l'altezza del treppiede, l'esposizione e la messa a fuoco della fotocamera per non far risultare le fotografie sfocate.

Una volta posizionato il treppiede con le suddette attenzioni vi si aggancia la barra con la slitta di precisione e su quest'ultima si imposta la fotocamera calibrata. La slitta di precisione è quella che consente di scattare da 3 posizioni diverse, il minimo indispensabile per questo strumento per poter ricostruire un modello tridimensionale. Sulla barra ci sono i numeri da 0 a 12 sia a destra sia a sinistra dello 0, ossia della posizione centrale, questi corrispondono alla *baseline*¹⁵ e la posizione della fotocamera viene decisa in base alla distanza (una *baseline* 2 corrisponde a 1 metro di distanza) e in modo che da tutte e tre le posizioni si inquadri sempre l'oggetto in questione. Stabilite queste condizioni si scatta quindi una prima foto da sinistra, una dal centro (sempre *baseline* 0) e una da destra: si ottiene così una tripletta di immagini, attraverso più triplette si realizzano modelli tridimensionali di oggetti complessi, a condizione che le immagini centrali di ciascuna si sovrappongano a quelle adiacenti di almeno il 50%, la sovrapposizione tra triplette è una condizione indispensabile.

¹³ Ceccaroni - Menci 2008; Ghezzi - Santarsiero 2009.

¹⁴ Menci - Nex - Rinaudo 2007.

¹⁵ La *baseline* dipende dalla relazione tra la distanza tra la camera ed il soggetto inquadrato e dalle dimensioni del soggetto, ricordando che in ogni caso lavorare con una base più ampia è una condizione di facilitazione e di conseguenza aumenta la precisione del rilievo.

Dopo aver acquisito il numero di fotogrammi sufficienti a ricoprire l'intero oggetto si procede all'elaborazione dei dati con il software ZScan.

L'interfaccia del software presenta 7 colonne le quali rappresentano i diversi passaggi per giungere ad una corretta elaborazione della nuvola di punti: I. aggiungere le posizioni, ovvero caricare le triplette interessate e selezionate; II. impostazione della *baseline*; III. avvio della rettifica; IV. inserimento dei GCP (*Ground Control Point*), non sempre necessari¹⁶; V. definizione dell'area di interesse (AOI) selezionando solo la parte frontale dell'oggetto inquadrato; VI. generazione automatica della tripletta. Per rendere possibile l'unione di più modelli in modo automatico è necessario lanciare il block.

È importante, durante le acquisizioni delle immagini, ricordare di fare attenzione, oltre alle caratteristiche di cui si è già parlato, anche ai riflessi e all'omogeneità della superficie. Quando un oggetto o una parete è una superficie riflettente il riflesso che vi compare viene visto in posizioni diverse dalla fotocamera quando la si sposta per scattare la tripletta ed il software non riesce per questo a ricostruire in modo corretto i punti tridimensionali. Inoltre, come si è accennato poco sopra, il software ha anche bisogno che la superficie ripresa non sia omogenea, ovvero che abbia delle caratteristiche distintive (anche semplicissime come una macchia, un chiodo, ecc.) per poter poi riconoscerle e quindi riuscire ad agganciare correttamente le foto tra loro.

La tecnica ZScan viene vista come più conveniente, sia come qualità, sia in termini di costo che di tempi, rispetto al laser scanner: innanzitutto la qualità cromatica è molto più dettagliata ed inoltre con il laser scanner per ottenere l'acquisizione di immagini orientate, necessarie per una successiva fase di segmentazione, richiede un numero maggiore di passaggi rispetto al metodo fotogrammetrico. Rispetto al laser scanner la strumentazione dello ZScan ha anche una maneggevolezza di molto maggiore. Inoltre la nuvola di punti prodotta dal laser scanner necessita sempre di una correzione da parte di un operatore, cosa non necessaria se la nuvola è ricavata dalle immagini.

¹⁶ In questo studio i GCP non sono mai stati utilizzati ma è possibile inserirli per incrementare la qualità geometrica del modello 3D e sono utili per registrare i vari modelli che condividono gli stessi punti, usati soprattutto per le ricostruzioni architettoniche. È importante che l'unità di misura dei GCP coincida con quella della baseline.

3.2. Estensioni ZScan

- MicroScan¹⁷: genera nuvole di punti 3D ad alta definizione su piccoli oggetti. È utilizzabile per misure metriche di precisione e analisi di microfratture nel tempo sui beni culturali.
- FlyScan: sistema aereo di scansione 3D, sfruttabile per la produzione di DTM.
- ScubaScan: effettua rilievi 3D in ambiente subacqueo.
- ZScan Ter: permette l'acquisizione sincronizzata di immagini sullo stesso oggetto e la seguente trasformazione in un modello 3D.
- ZScan Block: colloca ogni nuvola di punti nella sua reale posizione spaziale rispetto alle altre.

La gamma di prodotti ZScan ha permesso molti importanti lavori di rilievo, soprattutto in collaborazione con le Università, alcuni dei quali riguardano: il Castello di Shawbak in Giordania (Università di Firenze)¹⁸, il relitto di San Pietro in Bevagna a Taranto (Istituto Superiore per la Conservazione ed il restauro)¹⁹, la Chiesa di San Pietro a Coppito (AQ) (Università di Siena)²⁰, la statua di Ercole e Caco in Piazza della Signoria a Firenze (CNR-ICVBC)²¹, l'area dello stadio olimpico di Torino (Politecnico di Torino)²², l'anfiteatro di Lucca (IMT Alti Studi di Lucca, PERCRO Scuola Superiore S. Anna di Pisa, Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione Ministero per i Beni e le Attività Culturali)²³, il Palace Tomb di Petra in Giordania (ITABC-CNR, Istituto delle Scienze Umane, Ambientali e Naturali)²⁴, il telamone del tempio di Zeus Olimpo ad Agrigento (Università di Palermo)²⁵.

¹⁷ Tiano – Salvo - Ceccaroni 2008; Santarsiero - Ghezzi 2010; Salonia – Marcolongo - Scolastico 2010.

¹⁸ Vannini 2009.

¹⁹ Petriaggi – Davide - Ghezzi 2010.

²⁰ Parenti – Vecchi - Gilento 2010.

²¹ Tiano – Salvo – Ceccaroni 2008.

²² Nex - Rinaudo 2007.

²³ Camin – Carrozzino – Leonardi - Negri 2011.

²⁴ Gabrielli – Landini – Amico – Angelini – Franchi - Menci 2009.

²⁵ Lo Brutto – Spera 2011.

3.3. Test ZScan

Per apprendere appieno la funzionalità del principio generante ZScan, e per poi utilizzare al meglio il suo successore ZScanEvo, sono stati effettuati diversi test che verranno qui esposti, tutti realizzati con una fotocamera Canon 600 D calibrata, con obiettivo da 20 mm.

Innanzitutto, prima di iniziare ogni sessione di lavoro, sono state prese in considerazione le diverse problematiche; sul campo sono state le seguenti:

1. ricercare un soggetto che non sia troppo omogeneo nel colore e che non sia riflettente;
2. non inquadrare più soggetti su piani diversi, il software non predilige le geometrie sparse;
3. ciò che si vuole rilevare deve essere sempre visibile dalle tre posizioni della *baseline*;
4. scattare le foto da sinistra verso destra;
5. le foto centrali di due triplette consecutive devono sovrapporsi orizzontalmente per una porzione pari al 50% perché queste leghino tra loro e si possa creare il *block*, ossia la ricostruzione automatica di più modelli;
6. la sovrapposizione verticale delle triplette deve essere pari al 40%;
7. lavorare con il fuoco manuale, quindi mettere a fuoco con quello automatico e poi impostare il manuale²⁶;
8. nel girare attorno ad un oggetto fare spostamenti di circa 20°, considerando non solo la sovrapposizione ma anche la somiglianza tra le triplette che deve essere il maggiore possibile;
9. nelle riprese a terra non inclinare la fotocamera più di 25-30°.

Invece per quanto riguarda il lavoro in ufficio, e quindi con il software, è stato fondamentale conoscere le seguenti nozioni:

1. dopo aver aperto un nuovo progetto di lavoro e selezionato la cartella del PC dove collocarlo, è necessario selezionare il tipo di barra utilizzata (quella con una fotocamera e slitta o quella con 3 fotocamere) e inserire le informazioni inerenti la fotocamera (nome, modello, certificato di calibrazione);
2. l'opzione "*equalize position images*" riduce le differenze dovute all'esposizione tra uno scatto e l'altro di un'unica tripletta;
3. lo *step* di risoluzione si sceglie in base a quanto dettaglio dell'oggetto si vuole, ovviamente il grado di risoluzione è direttamente proporzionale ai tempi di elaborazione;
4. il GSD (*Ground Sample Distance*) è il valore di distanza media dei punti 3D sul modello;

²⁶ Con questo metodo si ottiene una migliore qualità dell'immagine rispetto al fuoco posto all'infinito. Inoltre solitamente si lavora in proprietà di diaframma (VT): questo rimane aperto per il tempo di esposizione, dall'apertura dipende la profondità di campo (fuoco posto all'infinito).

5. il “*noise reduction*” è il rumore di fondo che disturba la ricostruzione del modello, anche il suo valore si sceglie in base al grado di dettaglio desiderato;
6. l’alpha comporta una discrimina sulla dimensione dei triangoli usati nella triangolazione: non permette l’unione di certi triangoli se sono ad una certa distanza, superiore al valore assegnatogli, che per essere corretto dovrebbe corrispondere al multiplo di 10 del GSD;
7. lo “*sparse point cleaning*” funziona da filtro sui punti sporchi privilegiando le geometrie coerenti;
8. il “*full disparity estimation*” riproduce anche i punti aggettanti rispetto all’UCS²⁷;
9. quando si uniscono più *block* è necessario rigenerare tutte le triplette insieme;
10. il risultato finale si può visualizzare su ScanView (software di visualizzazione della Menci Software);
11. i singoli file del modello vengono salvati automaticamente nella cartella “polydata”.

La prima prova pratica di ZScan è stata molto semplice, si è scelto come soggetto una parete bianca contigua ad una rosa, per evitare i problemi di omogeneità già citati. Il cavalletto e tutta la strumentazione è stato posto a ca. 2,50 metri e quindi come base di presa si è optato per 5 (a 20 cm dal centro della barra la quale in totale è lunga 90 cm) e per scattare le foto è stato impostato il timer per eliminare anche i micromovimenti ed evitare che le immagini risultassero mosse.

Dopo aver caricato le triplette sul software ZScan e impostato la *baseline* utilizzata è stata avviata la rettifica che serve a correggere i micro disallineamenti ed è stata selezionata l’AOI, stabilendo il passo di risoluzione a 10 (più si abbassa lo *step* migliore è la risoluzione) visto che il soggetto considerato è semplice e non necessita un grande dettaglio, *medium* è stato il valore per il *noise reduction*. È stato anche necessario decidere l’unità di misura, che deve essere sempre la stessa nelle successive elaborazioni del modello, e si è optato per il metro, come consigliato in caso di rilievi architettonici. Lo *sparse point* ed il *full disparity* sono stati attivati. Il risultato finale visualizzato su ScanView è stato buono.

Dopo questa semplice prova ne sono state fatte altre della stessa tipologia su di un muro di cemento bianco con delle macchie grigie e su di una parete ricoperta da lastre marmoree con venature rosa ed i risultati sono sempre stati apprezzabili, anche se nel primo caso è stato necessario correggere la generazione con il software ZMap perché si erano formati diversi punti sporchi²⁸. Situazione diversa è stata quella in cui il soggetto è un cancello di ferro con una rete

²⁷ UCS, ovvero *User Coordinate System*, corrisponde al piano sul quale si sta lavorando e al quale bisogna sempre far riferimento per qualsiasi elaborazione.

²⁸ Per avviare questo tipo di processo su ZMap è necessario, dopo aver lanciato il programma, inserire il modello 3D in questione cliccando su “file > apri > inserisci modello 3D > polydata”, poi da “strumenti > modello 3D >

dello stesso materiale. La fotocamera è stata posizionata a circa 3 metri di distanza dal soggetto in questione e quindi la *baseline* era corrispondente al 6. La successiva elaborazione dati è risultata complicata ed in ogni caso non ha prodotto risultati accettabili visto che il ferro produceva dei riflessi ed inoltre anche la trama della rete metallica ha dato problemi perché il software non riesce a lavorare su motivi ripetitivi. Dei due esempi precedenti quello del cancello è stato anche lanciato il block, avendo realizzato per ognuno 3 triplete da dover unire. Per visualizzare il risultato bisogna andare nella cartella che contiene i dati, cliccare F3 e cercare il file utile attraverso la dicitura “*vtp”, se ne apre uno di quelli trovati con ScanView e dopo si selezionano i restanti e si trascinano nella finestra del software, oppure si va su “*open inside*”. Il blocco del modello 3D del muro è stato elaborato in maniera abbastanza corretta e precisa: forse sarebbe stata necessaria una maggiore distanza tra le triplete visto che la sovrapposizione è risultata essere di circa il 70% anziché il 50% ma è meglio superare la soglia stabilita piuttosto che il contrario.

Un test che ha avuto per soggetto qualcosa di ben più interessante è stato svolto alcuni giorni dopo alla cinta muraria della città di Arezzo: è stato effettuato il rilievo fotogrammetrico di una parte di un contrafforte delle mura, per un'altezza di circa 4 metri. Ad una distanza di circa 6 metri, con una *baseline* 9, sono state realizzate prima 4 triplete di immagini della base della cinta urbana, altre 4 al di sopra di queste ultime rispettando una sovrapposizione verticale di almeno il 40% ed ancora 4 triplete per inquadrare nel modo più corretto l'angolo del contrafforte per poter poi ricostruire entrambi le pareti con il *block*; il punto di partenza dal quale acquisire le immagini è stato indifferente, il software le riconosce e le ricollega in modo realistico. Subito dopo si è proceduto con l'elaborazione dei dati nel solito modo, scegliendo sempre 10 per lo *step* di risoluzione e “*high*” per il *noise reduction*. Il risultato ottenuto del modello non è stato ottimale: all'applicazione della *texture* la zona della parete laterale, prossima all'angolo, risultava spalmata; questo può essere dovuto a due fattori: le aree di interesse sono state selezionate poco accuratamente includendo in esse anche le parti delle pareti che si vedevano di scorcio e ancora, perché non era stato impostato il fattore Alpha. Inoltre si potevano notare delle zone dove mancavano alcuni punti, probabilmente a causa delle ombre dovute ad alcune erbacce fuoriuscenti dai punti di congiunzione di alcuni blocchi delle mura. Si è quindi proceduto ad una seconda elaborazione modificando le AOI, ossia selezionando solo ciò che era possibile vedere frontalmente e impostando l'Alpha a 0.05 cm, è stato anche modificato il *noise reduction* privilegiando *medium* per una maggiore rapidità. Il modello 3D ottenuto è palesemente migliore

rappresentazione punti RGB tutti” si ottiene la visualizzazione, con CTRL + shift si imposta il centro di presa e per cancellare i punti che non interessano si va su “strumenti > modello 3D > escludi selezione” ed una volta disegnata l'area da eliminare si va su “strumenti > modello 3D > salva modello come”.

del precedente, ma nelle zone d'ombra causate dalle erbacce sono rimasti dei buchi per colpa del fattore Alpha. Allora, si è provato a rimuovere l'Alpha e a generare il modello solo con la modifica dei ritagli: i buchi sono spariti ma il risultato complessivo non era accettabile quanto il precedente. Si è pensato poi di impostare dei valori Alpha diversi a seconda dei fotogrammi: nelle immagini raffiguranti l'angolo del contrafforte è stato reimpostato a 0,05 cm, invece nelle foto dove compaiono le erbacce è stato alzato a 0,08 cm in un primo momento e abbassato a 0,02 cm successivamente, ma anche in questi casi i risultati non sono stati soddisfacenti, anzi i buchi sono aumentati sia quantitativamente sia nelle dimensioni, dimostrazione che è essenziale impostare l'Alpha seguendo la regola del multiplo di 10 del suo GSD.

Nei giorni seguenti si è scelto come soggetto per un nuovo rilievo un pavimento formato da lastre marmoree, la procedura è la medesima delle riprese in elevato, cambia solo l'inclinazione della barra che deve posizionarsi in modo perpendicolare alla superficie da inquadrare. Sono state acquisite sei triplette da una distanza circa di 1,60 metri, usando quindi una *baseline* 4, spostando il cavalletto in avanti di volta in volta e mantenendo la sovrapposizione del 50%. Nell'elaborazione dati è stato stabilito uno *step* di 10 e un *noise reduction medium*, inoltre è stato impostato l'UCS ma quest'ultimo nella creazione del modello intero ha dato problemi perché va in conflitto con il *block*, perciò se si vuole applicare questa procedura non va impostato l'UCS. Quest'ultimo è consigliabile usarlo quando si hanno i GCP perché non c'è bisogno di avviare il *block* essendo la ricostruzione totale possibile da questi punti di riferimento. Per poter visualizzare il lavoro ultimato abbiamo eliminato l'UCS e generato di nuovo le triplette senza riavviare il block perché la traslazione rimane la stessa. Così facendo il risultato è stato buono.

Nuovi test sono stati realizzati in un sito archeologico abbandonato in località Pionta ad Arezzo, posto vicino ai resti del vecchio Duomo della città.

Il primo soggetto rilevato è stato quello di un piccolo butto formato da pietre accatastate l'una sull'altra. Questa geometria ha creato non pochi problemi nell'elaborazione del modello tridimensionale, probabilmente perché sono presenti diversi piani e lo strumento ZScan ha difficoltà a lavorare in questo tipo di condizione. Sono state registrate 6 triplette di immagini a circa 2 metri di distanza, eccetto per quella rilevante l'angolo del butto dove la camera era leggermente più lontana, quindi è stata usata una *baseline* 5 tranne nell'ultimo caso sottolineato in cui la *baseline* corrispondeva a 6. Dopo poco aver lanciato il *block* compare la finestra di avvertimento in cui si notifica che l'operazione non è eseguibile per le ultime 4 triplette. Si procede comunque con la generazione del modello per tutte le posizioni. Il risultato non è accettabile: sono presenti molti buchi e non rappresenta una riproduzione fedele, probabilmente sono state di ostacolo anche le numerose erbacce presenti davanti all'oggetto inquadrato. Inoltre la zona dell'angolo è quella di cui non si è riuscito a fare il *block*, evidentemente era necessario

uno spostamento di 20° per l'acquisizione di ogni tripletta, servivano molte più triplette quanto più vicine possibile. Anche nella parte di cui è riuscita la ricostruzione sono presenti degli errori perché ci sono due immagini identiche che vengono affiancate. Un accatastamento di pietre non ordinate non rappresenta un buon soggetto per il software ZScan: le geometrie sparse non le può ricostruire perché non trova un piano di riferimento.

L'altro oggetto scelto per il rilievo è una lastra marmorea larga circa 0,50 cm e lunga 1,10 metri, decontestualizzata, alletta su delle tavole di legno poggiate a terra. In questo caso sono state effettuate 7 triplette con *baseline 2* data la distanza della camera dalla lastra di nemmeno un metro. Si avvia il solito procedimento e analizzando i modelli generati si può notare che dove in corrispondenza della lastra ci sono dei leggere dislivelli vengono creati numerosi punti sporchi. Si è quindi proceduto alla pulizia dei modelli in questione ottenendo infine una buona ricostruzione tridimensionale. Però nel caso della penultima e dell'ultima tripletta la sovrapposizione non è buonissima: si nota una differenza di quota, forse perché l'ultima foto ha subito un ritaglio più piccolo e di conseguenza aveva meno elementi a cui agganciare la precedente, in casi simili è preferibile una sovrapposizione maggiore.

Sempre nella zona del parco del Pionta è stato rilevato un pavimento costituito da piccole pietre bianche e nere formanti motivi geometrici. La distanza di presa è di circa un metro, con *baseline 2* e le riprese sono state realizzate inclinando leggermente la camera e tenendo allungata di molto la gamba posteriore del treppiede per evitare di far rientrare nell'area inquadrata la parte inferiore delle due gambe anteriori dello stesso. Il risultato è stato ottimale.

Un'altra ottima ricostruzione è stata ottenuta dal rilievo di un muro con la superficie piana ed in parte curva. Ad una distanza di 3 metri e mezzo è stata usata una *baseline 8* e sono state acquisite 5 triplette.

Si è successivamente scelto il sito della pieve di Sant'Eugenia a Bagnoro, vicino ad Arezzo per un rilievo di dimensioni e complessità maggiori. Il soggetto è la parete posteriore della pieve, formata da 3 absidi, una maggiore centrale e due più piccole laterali. La distanza di presa corrisponde a circa 8 metri ed è stata impostata una *baseline 11*. Le acquisizioni sono state numerose perché si è fatta attenzione a coprire con la giusta sovrapposizione gli spigoli e le pareti curve delle absidi. Si è iniziato rilevando la parte inferiore della parete e poi, ripartendo dal punto iniziale, è stata ripresa la parte superiore della stessa, mantenendo una sovrapposizione tra le due maggiore del 50 % anche se sarebbe bastato il 40%. Per motivi di tempo causati dalla gestione dati del computer si è proceduto caricando in un primo momento solo le posizioni della parte inferiore della parete il cui modello è risultato ottimale. Invece nel rettificare le triplette della parte superiore, si è verificato un problema inerente la *baseline* con l'ultima, forse nell'acquisire la tripletta sono state usate due basi differenti per errore. Lo *step*

impostato è stato 20 e si è stabilito il fattore Alpha a 0,2. Il *block* tra le triplette della parte superiore e quelle della parte inferiore ha dato diversi problemi, in ScanView le due parti venivano visualizzate separatamente. È stato necessario cancellare il vecchio progetto ed aprirne uno nuovo per permettere al block di realizzarsi pienamente. Il risultato finale è stato di grande impatto.

Di fronte alla pieve c'è una piccola ara quadrangolare con un basamento a gradini la quale è stata oggetto di un altro rilievo. Le triplette sono state acquisite a distanze diverse: due lati a circa 3 metri, impostando una *baseline* a 8 e gli altri due lati a circa 2 metri con una *baseline* a 5. Queste ultime sono le riprese usate poi nella ricostruzione tridimensionale perché le altre sono troppo distanti: la risoluzione non sarebbe buona. Nella AOI si è selezionata la parte frontale del blocco e quella del basamento, si è impostata l'Alpha a 0.05 per non rischiare che la *texture* si spalmasse su alcuni punti nel caso ne fosse stato preso qualcuno di scorcio. Nel modello generato della terza tripletta non si vede nessun punto, si decide quindi di deflaggare lo “*sparse point*” e così si riesce ad avere il modello. È stato necessario non impostare lo “*sparse point*” anche sul modello della quarta tripletta perché erano presenti dei buchi abbastanza grandi nella ricostruzione del basamento ed in questo modo la situazione è leggermente migliorata. Anche nella quinta e sesta tripletta il basamento aveva numerosi buchi ma con lo stesso procedimento già applicato nelle due precedenti la situazione è peggiorata perché sono comparsi un numero spropositato di punti sporchi. Si è tentato anche di impostare lo *step* di risoluzione a 5 ma il risultato è stato anche peggiore (probabilmente si sarebbe dovuto alzare e non abbassare). In quasi tutte le triplette l'effetto sul basamento era sempre lo stesso, a causa dell'inclinazione dello stesso; per ricostruirlo sarebbero state necessarie altre triplette acquisite da sopra e non frontalmente. La superficie delle pareti dell'ara non risulta ottimale, si è impostato l'UCS su di una e la situazione migliora di molto anche se è meno fedele la rappresentazione e poi i modelli sarebbero dovuti essere riagganciati manualmente con Zmap. Probabilmente, per ottenere un risultato migliore, sarebbe bastato abbassare la risoluzione, impostando quindi uno *step* più alto.

Anche i rilievi alla pieve di San Paolo a San Polo, località vicino ad Arezzo, sono stati interessanti.

Come nel caso precedente anche qui si è scelto di riprendere una parte absidata della parete posteriore. Sono state realizzate prima tante triplette da ricoprire la parte inferiore della parete, poi tante da rilevare quella superiore: orizzontalmente si è mantenuta la sovrapposizione del 50%, come anche verticalmente ma in questo caso è stato necessario inclinare la fotocamera di circa 30°. Le fotografie sono state acquisite da una distanza di circa 6,50 metri, è stata quindi impostata una *baseline* 9. Durante l'elaborazione delle immagini, nel momento dell'aggiunta delle posizioni, si è notato che la prima tripletta risultava sfalsata perché la fotocamera era arrivata

allo scatto finale con la prima fotografia e aveva ricominciato da 001 con la seconda, per poterla inserire come posizione è stato quindi necessario rinominare la prima immagine con 000 in modo tale che risultassero in ordine. In due triplette della parte superiore, durante la rettifica, si verificava un errore, ricontrollando le fotografie si è notata una leggera rotazione da un'immagine all'altra della stessa tripletta: questo ha impedito l'utilizzo delle triplette in questione. Lo *step* è stato impostato a 20, il *noise reduction medium* e senza Alpha: il risultato è stato soddisfacente. Probabilmente sarebbe bastato anche un numero inferiore di triplette.

Tutte le applicazioni, le prove ed i test con ZScan sono stati fondamentali per capire ancora più a fondo i principi della fotogrammetria ed il suo utilizzo nell'ambito dei beni culturali, ma soprattutto sono stati propedeutici alla comprensione e allo sfruttamento delle potenzialità dell'evoluzione di questo sistema, ossia di ZScanEvo.

4. ZScanEVO: evoluzione di ZScan

Da pochissimo è in commercio anche la versione evolutiva di ZScan: ZSanEvo.

I principi sono gli stessi, quindi anche con questo sistema si ricostruiscono modelli 3D da immagini, più precisamente da blocchi di immagini, dai quali poi si ricavano i soliti prodotti quali DEM, profili, curve di livello, ortofoto, mosaici. Rimane essenziale la sovrapposizione tra le fotografie per poter ottenere un modello tridimensionale, ma tutto il sistema è più pratico, veloce ed efficiente. Inoltre è possibile scegliere la densità della nuvola di punti, impostare la dimensione del pixel calcolabile in base alla distanza di presa²⁹ e l'unione automatica delle nuvole di punti senza bisogno di fare il *block*.

Anche in questo caso sono stati realizzati diversi test su vari soggetti soprattutto per contribuire con piccoli suggerimenti pratici alla migliore funzionalità del prodotto, sempre con una fotocamera calibrata Canon 600 D con un obiettivo da 20 mm.

4.1. Funzioni e applicazioni

La strumentazione del sistema ZScanEVO è composta da: un tablet sul quale è installato il software EVOcapture, una fotocamera digitale calibrata, un cavo USB con prolunga, un'asta topografica con testa regolabile, un PC portatile sul quale è installato EVOcheck, software di elaborazione oltre a UMap.

La fotocamera è collegata tramite il cavo USB al tablet, il software EVOcapture permette di scattare le foto direttamente dal tablet: si avvia il collegamento tra quest'ultimo e la fotocamera con il pulsante apposito che compare sull'interfaccia del software, tramite il tablet è possibile ovviamente visualizzare ciò che la fotocamera sta inquadrando. Le foto scattate attraverso questo metodo vengono automaticamente salvate ed un'importante caratteristica è quella del controllo della sovrapposizione: il pulsante "link" gestisce il collegamento tra una foto e la sua successiva, se si vuole essere certi che la sovrapposizione sia sufficiente affinché sia possibile ricostruire il modello 3D basta impostare il link e con questa funzione nel momento in cui la sequenza delle immagini è errata le foto non vengono scattate e si può provare fino a quando non ci sia una corretta successione. Inoltre è facile trovare la giusta sovrapposizione perché le

²⁹ È possibile stabilire il GSD (grandezza del pixel sull'immagine) che si vuole avere sulla foto in base alla lunghezza focale, quindi al tipo di obiettivo usato, e alla distanza dalla quale è effettuata la ripresa. Se una fotocamera ha una risoluzione di 3000 pixel, inquadrando una zona di 3 x 3 metri, ogni pixel equivale a 1 mm. C'è anche modo di migliorare la risoluzione durante l'elaborazione dati impostando lo *step* desiderato ma conviene sempre effettuare una ripresa ottimale che corrisponde ad ottenere una nuvola di punti meno densa ma il più possibile rispondente alla realtà e quindi alla *texture* che verrà applicata al modello.

ultime 3 foto scattate rimangono visibili sull'interfaccia del tablet. Per poter scattare basta cliccare sull'immagine che compare sul tablet. Con questo strumento, non lavorando per triplette, è necessaria una sovrapposizione maggiore tra le immagini, circa dell'80%, per fare in modo che uno stesso punto di riferimento di un'immagine sia visto in almeno 3 di queste, nelle riprese orizzontali, in quelle verticali può andare bene anche una sovrapposizione del 60%.



Figura 1 strumentazione ZScanEVO

Per una maggiore praticità è stato proposto allo sviluppatore del software di inserire in EVOcapture la possibilità di tornare indietro nel caso non fosse soddisfacente l'ultima foto scattata, quella di ingrandire l'ultima immagine che serve da riferimento per controllare che la sovrapposizione con la successiva sia sufficiente, quella di scorrere le miniature fino alla prima per avere il riferimento di dove sono state iniziate le riprese e l'inserimento di un contatore per

poter sapere in automatico quante foto si stanno facendo. Una volta realizzate queste piccole modifiche il sistema è risultato più veloce e più facile da usare.

Per acquisire le immagini si procede per strisciate, avendo così sempre degli scatti consecutivi, in modo che l'ultima foto della prima strisciata coincida con la prima della seconda strisciata e così di seguito.

EVOcheck è un software di verifica sul campo della nuvola di punti: elabora i processi di *finding features*, *matching images* e *bundle adjustment* in modo completamente automatico e sommario per poter rendere il procedimento più veloce. Attraverso questa elaborazione si può controllare di avere i dati necessari ad una ricostruzione di un modello 3D. All'apertura del programma si clicca sulla pagina bianca per aprire un nuovo progetto, si va a ricercare la cartella dove sono le foto interessate, gli si dà il nome e si imposta il certificato di calibrazione. Si apre così la nuova finestra. Con tasto destro sul nome si clicca poi su “*Add images*” e si vanno quindi a ricercare le foto nella cartella che le contiene e si selezionano. Una volta che tutte le foto sono state caricate, di nuovo tasto destro e cliccare su “*run proces*”, aspettare che finisca il *matching* e l'*adjust* e poi compare la nuvola di punti. Per cambiare il centro di rotazione premere Ctrl+shift e cliccare dove si vuole. Cliccando sulla miniatura della foto è possibile ingrandirla ed inoltre le varie foto sono indicate sulla ricostruzione con dei quadratini gialli e si possono visualizzare con un doppio click.

UMap è il software che restituisce una *reconstruction* unica con *texture*, con le stesse funzioni di EVOcheck ma con risultati qualitativamente ottimizzati, inoltre la densità della nuvola di punti è parametrizzabile, è possibile triangolare il modello.

I primi test con EVO si sono eseguiti nel giardino all'italiana di Villa Guilichini a Tregozzano, località vicino ad Arezzo, prendendo come oggetto delle riprese una fontana. Strisciate di sole 4 immagini non sono risultate sufficienti alla ricostruzione del modello, si è ripetuta l'operazione con il doppio delle foto che si sono rivelate adeguate.

Altro oggetto di rilievo è stata la facciata della chiesa di San Paolo. Montando la camera fotografica sopra l'asta da 5 metri e posizionandosi a 3 metri di distanza, sono state fatte 31 foto divise in 5 strisciate: per riprendere la facciata nella sua totalità è stato necessario alzare l'asta al massimo, ma in realtà è meglio non andare oltre i 3 metri perché cominciano poi ad esserci oscillazioni troppo evidenti.

Si sono tentate delle riprese a terra, da circa un metro e mezzo di distanza, con la camera inclinata di 45°, dal secondo scatto risulta impossibile l'acquisizione di immagini: si è pensato ad un problema di esposizione dovuto al fatto che il soggetto era sia al sole che in ombra. Sicuramente non è dovuto ad una distanza troppo ravvicinata perché si sono fatte delle prove anche ad un metro e scattava. Si è proseguito con le riprese di un muretto, da 2,5 metri di

distanza, per controllare se in questo caso il tablet fosse in grado di scattare ed è andato tutto come doveva.

Altre riprese hanno interessato la Chiesa di Santa Maria a Chiassa, località vicino ad Arezzo.

Si è proceduto inizialmente creando una sessione di lavoro solo per la parete inferiore del campanile: ad una distanza di circa 5 metri sono state acquisite 18 immagini con 3 strisciate. Un'altra sessione è stata dedicata all'abside: si sono scattate 36 foto su tre strisciate ad una distanza di 2,50 metri. Ancora, sono state effettuate 10 foto a terra da una distanza di 1,60 circa. Queste serie di fotografie sono state tutte realizzate senza *link*! Si è tentato di riprendere a terra con il *link* ma, di nuovo, dopo la prima acquisizione non si riesce più a scattare. Era un problema di sistema che è stato poi risolto dagli sviluppatori del software. Un'ultima sessione ha riguardato quasi l'intera parete: dal campanile, includendo l'abside fino al muro perimetrale della chiesa, applicando anche in quest'ultimo caso il *link*. Le immagini, verificate su EvoCheck, hanno dato buoni risultati, eccetto per le riprese a terra le quali sono risultate troppo poco sovrapposte e quindi non si è generata la nuvola di punti.

Sono stati ripresi due muretti nei dintorni di villa Guilichini: il primo non ha avuto una buona riuscita su EVOcheck forse a causa della forte alternanza tra luce e ombra e della posizione della camera che non inquadrava solo il soggetto che si voleva ricostruire ma anche ciò che aveva intorno, su piani diversi; il secondo invece ha prodotto un risultato accettabile.

Si è tentata la ripresa a terra della base circolare che si trova nel giardino della villa a Tregozzano. La fotocamera è stata tenuta a meno di un metro di distanza. Controllando su EvoCheck si vede che il modello ha generato solo le prime 11 foto. Ricontrollandole si nota in effetti che la sovrapposizione tra la 11 e la 12 è sbagliata perché si è leggermente tornati indietro invece di andare avanti. Si è provato a caricare su EvoCheck solo le foto dalla 12 in poi ma comunque non viene generato il modello, si è pensato ad un problema di rotazione della camera, che probabilmente è stata cambiata per girare intorno all'oggetto. Dopo aver scattato nuovamente le foto facendo attenzione a mantenere sempre la stessa angolazione si è controllato il risultato ma è stato lo stesso del precedente. Probabilmente la causa è della vicinanza della camera al soggetto inquadrato, con ZScanEvo è bene scattare fotografie ad almeno un metro di distanza.

Le successive riprese si sono realizzate di fronte alla Fortezza ad Arezzo. Come soggetto è stato scelto un muro a grandi blocchi che fa angolo. Sono state effettuate 2 strisciate per un totale di 34 immagini però la maggior parte delle foto di un lato del muro sono risultate contro luce, anche se al momento dell'acquisizione non si notava osservandole dal software EvoCapture sul table, quindi è importante ricordare di fare sempre attenzione all'esposizione.

Altre 41 foto sono state scattate sempre nella stessa zona per il rilievo a terra di un altro muro con due angoli retti che formano una C. Visti i dislivelli di quota del muro si è proceduto partendo dalla posizione più in alto e come ci si abbassava si alzava l'asta di quanto bastava per avere una visuale uguale alla prima, del soggetto inquadrato. Quando si arrivava allo scalino era necessario fare un numero maggiore di foto altrimenti la camera non scattava essendo impostato il “*link to image*”. Sia su EvoCheck che su UMap le immagini vengono legate le une alle altre correttamente,

A villa Guilichini si è rilevato anche il muro esterno, di forma rettilinea ed in parte circolare, del giardino all'italiana. È stata effettuata una sola strisciata perché utilizzando l'asta, per poter prendere anche la base, è stato necessario mettersi ad una certa distanza che in realtà includeva il muro in tutta la sua elevazione. Il risultato è stato abbastanza soddisfacente.

Altri due soggetti sono stati selezionati nell'anfiteatro di Arezzo. Il primo è il resto di una parte della costruzione della cavea ed il secondo è il resto di un ambiente voltato.

Con il resto della cavea, a forma di L sono state effettuate delle riprese, in due strisciate, verso il basso a circa 1,50 metri di altezza. Il risultato su EvoCheck è abbastanza buono.

La ripresa dell'ambiente voltato è stata abbastanza complicata, ci si è preoccupati di riuscire a rispettare una giusta sovrapposizione e una giusta distanza anche della superficie curva superiore. Partendo dal centro dell'ambiente, a circa un metro dalla parete, si è inclinata leggermente la camera per poter rilevare anche la base della stessa. Poi si è raddrizzata e si è alzata l'asta fino ad arrivare ad inquadrare il punto in cui la parete inizia a curvare. Si è proseguito abbassando l'asta, avvicinandosi alla parete e inclinando un po' la camera fino ad arrivare a ruotarla di 90° e a quel punto ci si è spostati verso la parete opposta per riprendere il soffitto e allo stesso modo si è ripreso per l'altro lato della volta. EvoCheck non riesce a legare la prima foto e le ultime 4 ma comunque ricostruisce la curvatura. Su UMap invece è solo l'ultima immagine a non essere agganciata ma la ricostruzione della seconda metà del soggetto non è ottimale.

Dopo queste varie esercitazioni e dopo aver effettuato le modifiche per eliminare i problemi che si sono riscontrati si è proceduto con i rilievi a Roma, in collaborazione con la ditta GeoRes.

5. ZScanEVO, due casi di studio: *Laurentina Vetus* e catacomba di Santa Ciriaca

Insieme alla Dottoressa Ceccaroni è stato stabilito, per il mio progetto di studio, uno stage esterno di 4 giorni in collaborazione con la ditta GeoRes di Roma.

In questo periodo ho avuto l'opportunità di visitare importanti siti archeologici di Roma, scoperti da appena un anno o meno, dove ho potuto rilevare interessanti soggetti con il metodo ZScanEvo, potendo mettere così in evidenza le sue potenzialità e scoprendo i casi migliori a cui applicarlo.

5.1. Sito archeologico della *Laurentina Vetus*

Questo eccezionale sito archeologico è stato scoperto nel gennaio 2011 da alcuni archeologi della Soprintendenza di Roma mentre sorvegliavano i lavori per la costruzione di nuove abitazioni.

Il tracciato stradale basolato identificato con la *Laurentina Vetus*, datato forse al V secolo a.C., che si conserva per una lunghezza di circa 300 metri, ha una larghezza massima di 3,40 metri, è costeggiato da sporadiche sepolture risalenti almeno al II secolo d.C. e corre parallelo all'attuale via Pontina, in zona Torrino a Roma. Più ad ovest rispetto all'antica via romana è stata individuato un battuto stradale in fondo al quale si è trovata una grande cisterna. Tutto il sito si è venuto a formare su di una precedente colata lavica che ha portato con sé una grande quantità di minerali e rocce vulcaniche.



Figura 2 Tracciato basolato identificato con la *Laurentina Vetus*

Le notizie storiche a proposito di questa strada sono pressoché nulle se si esclude la citazione di Plinio³⁰ “*et Laurentina et Ostiensis eodem fuerunt*” e l’iscrizione³¹ in cui si ricordano “*manceps viarum Laurentinae et Ardeatinae*”, per questo è sempre stato complicato stabilire la sua localizzazione³² anche se è sempre stato noto il suo percorso nella zona dell’Acqua Acetosa Ostiense-Vallerano e che da Roma arrivava a *Laurentum*, città scomparsa, sita un tempo vicino l’antica *Lavinium*.

5.1.1. Rilievo dell’antico basolato stradale di epoca romana



Si è quindi proceduto al rilievo di un tratto del basolato di 3,42 x 2,92 metri con tutta la strumentazione ZScanEVO, in condizioni di ripresa ottimali. Gli scatti sono stati effettuati in posizione zenitale, ad una distanza di circa 2 metri, sono state realizzate 9 strisciate per un totale di 80 foto. Sul campo si è controllato che la modalità di ripresa fosse stata corretta attraverso EVOcheck che ha dato un risultato positivo. Quindi, una volta a casa, si è avviata l’elaborazione della nuvola di punti, completamente automatica, attraverso UMap, il quale ha impiegato circa 5 ore per i processi di *finding features*, *matching features*, *bundle* e *reconstruction*. Una volta ottenuto il modello si è potuto constatare che le immagini erano di molto in sovrannumero rispetto al necessario, sono quindi stati selezionati quei singoli modelli che riuscivano a rappresentare in modo completo il soggetto ripreso, per un totale di 27 modelli, per poter alleggerire il prodotto ottenuto e per rendere le operazioni successive più agevoli. In seguito è stata realizzata la pulizia

³⁰ Pl, Ep. II.17.2.

³¹ CIL VI.8469.

³² Platner-Ashby 1929.

della nuvola di punti con ZMap, da realizzare per ogni singolo modello, per eliminare quei punti sporchi che possono essere dovuti alle ombre o ad elementi ripresi di scorcio: il numero totale di punti del modello è arrivato a 2.826.686.



Figura 3 Nuvola di punti del basolato stradale della *Laurentina Vetus*

Sempre con ZMap si sono ottenuti tutti quei prodotti derivanti dalla nuvola di punti quali: modelli 3D triangolati e scalati, ortofoto che sono poi servite alla realizzazione del mosaico, DEM con curve di livello e profilo.



Figura 4 Nuvola di punti triangolata del basolato stradale della *Laurentina Vetus*

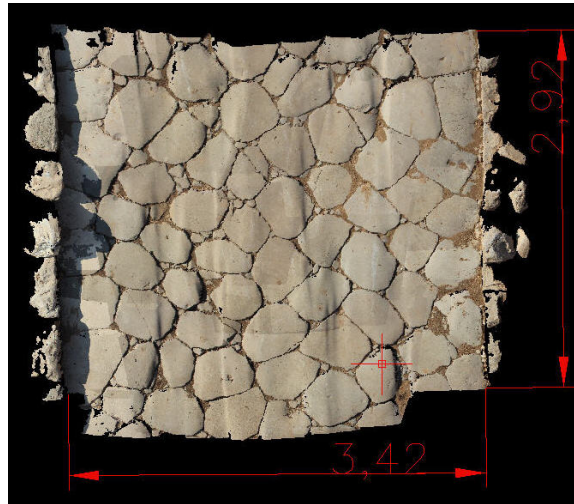


Figura 5 Nuvola di punti triangolata e scalata del basolato stradale della Larentina Vetus



Figura 6 Ortofotomosaico del basolato stradale della *Laurentina Vetus*

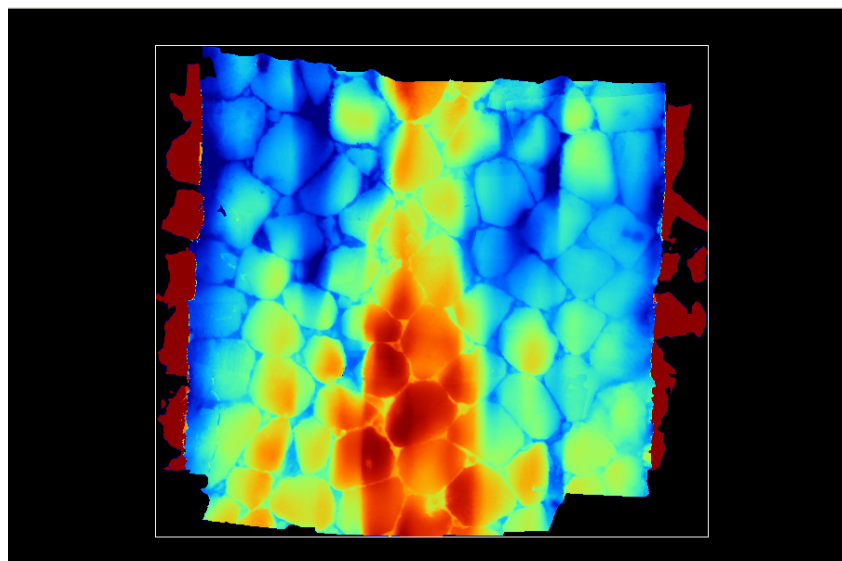


Figura 7 DEM del basolato stradale della *Laurentina Vetus*

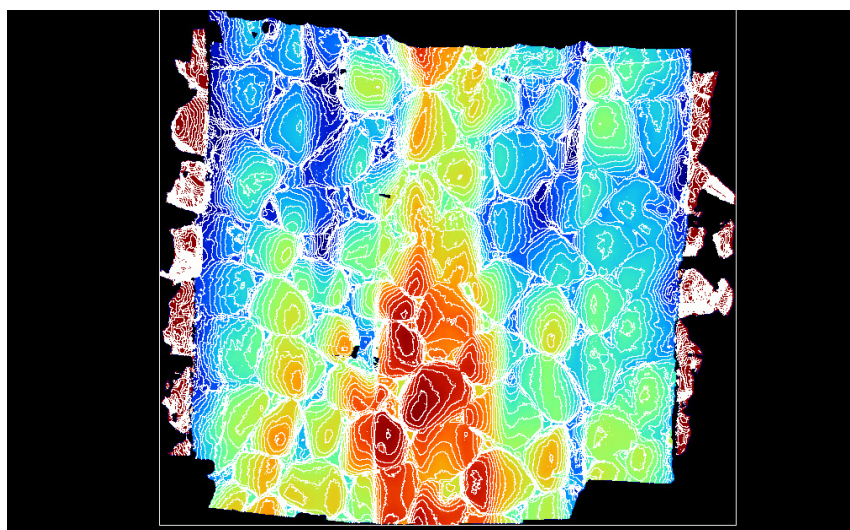


Figura 8 Curve di livello del basolato stradale della *Laurentina Vetus*



Figura 9 Profilo del basolato stradale della *Laurentina Vetus*

Per fare sì che il risultato finale fosse ottimale sono stati dedicati diversi giorni all'elaborazione dei dati i quali si sono rivelati fruttuosi visto il perfetto modello tridimensionale ottenuto.

5.1.2. Rilievo della parete rocciosa



Figura 10 Colata lavica - *Laurentina Vetus*

La parete rocciosa che è stata rilevata è solo una piccola parte di tutta la colata lavica che fu tagliata per costruire la strada e che ora si ritrova su entrambi i lati del tracciato stradale.

La porzione di parete rilevata è lunga circa 7 metri e alta 2, le riprese sono state effettuate ad una distanza di circa 2,50 metri, sono state acquisite 14 foto in una sola strisciata con la modalità di ripresa a mano libera, ossia senza asta topografica.

Una volta controllato con EVOcheck che le immagini fossero appropriate ai fini di una corretta ricostruzione 3D, si è avviato il procedimento automatico su UMap che ha impiegato circa 15 minuti per elaborare la nuvola di punti completa. Al fine di migliorare il risultato si selezionano solo 8 dei 14 modelli elaborati, che sono poi stati puliti con ZMap, ottenendo così una nuvola di 571.458 punti.



Figura 11 Nuvola di punti della colata lavica – *Laurentina Vetus*

Si è proseguito con la creazione dalla nuvola di punti dei soliti prodotti: modelli 3D triangolati, ortofotomosaico, DEM, profilo e curve di livello.



Figura 12 Modelli 3D triangolati della colata lavica – *Laurentina Vetus*



Figura 13 Ortofotomosaico della colata lavica – *Laurentina Vetus*

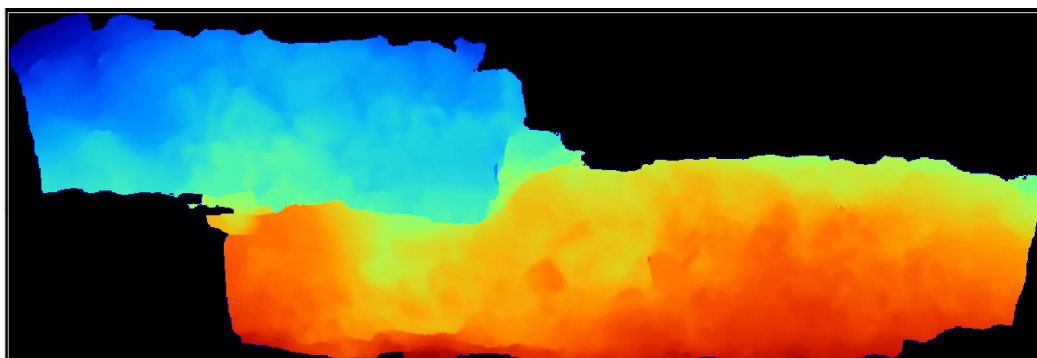


Figura 14 DEM della colata lavica – *Laurentina vetus*

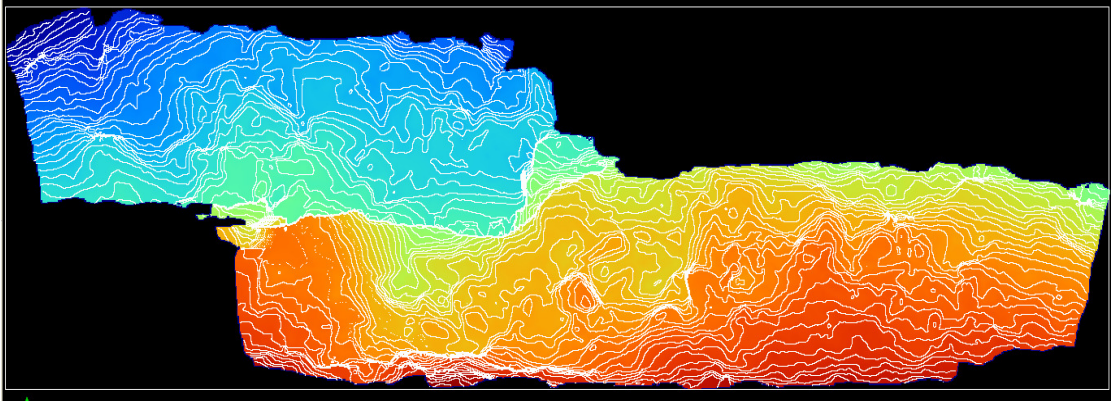


Figura 15 Curve di livello della colata lavica – *Laurentina Vetus*

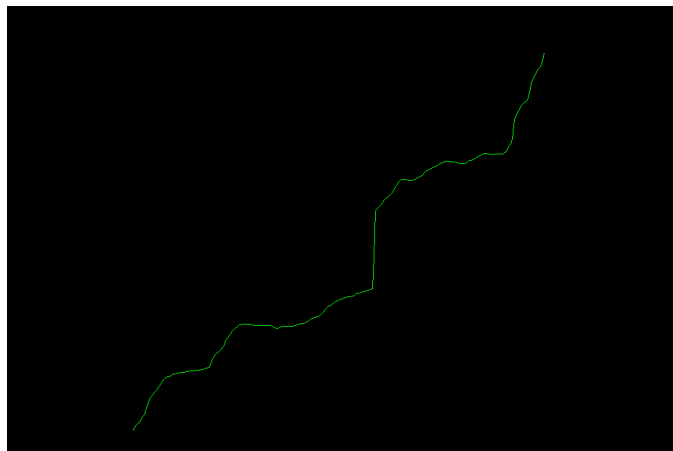


Figura 16 Profilo della colata lavica – *Laurentina Vetus*

5.2. Sito archeologico della Catacomba di Santa Ciriaca

La catacomba di Santa Ciriaca, o anche detta di San Lorenzo, è localizzata a Roma sulla Via Tiburtina, appunto sotto la basilica del santo. Questa catacomba fu chiamata con il nome della nobile Ciriaca perché questa era la proprietaria del “campo Verano” dove si sviluppò e per la sua sepoltura in questo luogo dopo essere stata uccisa durante la persecuzione del 257-258 dell’imperatore Valeriano. Oltre a Ciriaca qui vi furono sepolti San Lorenzo, San Romano, San Ippolito, Santa Concordia, San Giustino e molti altri³³.

La diramazione della catacomba indagata durante i rilievi fu scoperta appena un anno fa dal Pontificio Istituto di Archeologia Cristiana, su Via Tiburtina, in corrispondenza di Piazzale del Verano.

Le condizioni di ripresa non erano ottimali perché ci si trovava negli spazi molto ristretti dei cunicoli che hanno una larghezza di circa 50 cm mentre con ZScanEVO è necessario lavorare

³³ Bosio 1710.

ad una distanza di almeno 1 metro. Si è cercato di ovviare a questa situazione riprendendo le pareti dei loculi con la fotocamera inclinata di circa 30°. Inoltre, ulteriore problema erano i ponteggi che oltre ad ostacolare l'inquadratura creavano le ombre sui soggetti ripresi.

5.2.1. Rilievo di una parete in opera mista

Il primo soggetto ripreso nella catacomba è stato un rivestimento parietale in opera mista di una fossa di deposizione scavata nel tufo, di dimensioni 1,60 x 0,62.



Figura 17 Rivestimento parietale in opera mista – catacomba di Santa Ciriaca

Sono state acquisite 10 immagini con una sola strisciata, a mano libera, ad una distanza di circa 2 metri e con la fotocamera inclinata di circa 30°. L'elaborazione della nuvola di punti su UMap ha richiesto circa 15 minuti. Sono stati selezionati 9 modelli, poi puliti con ZMap per ottenere infine una nuvola di 689.051 punti. Il risultato non è stato perfetto perché nelle parti basse della parete c'era una scarsa densità di punti, questo è dovuto al fatto che le riprese non essendo eseguite frontalmente al soggetto ma dall'alto si sono create delle zone d'ombra agli angoli inferiori della parete che hanno poi dato questa carenza di punti.



Figura 18 Nuvola di punti del rivestimento parietale in opera mista – catacomba di Santa Ciriaca

Applicando i soliti procedimenti si sono poi ottenuti: modelli 3D triangolati e scalati, ortofotomosaico, DEM e curve di livello. Nel caso del DEM ha influito il fattore delle riprese dall'alto perché è una parete piatta ma invece risulta con una certa profondità ma solo perché non è stata ripresa frontalmente.



Figura 19 Modelli 3D triangolati e scalati del rivestimento parietale in opera mista – catacomba di Santa Ciriaca



Figura 20 Ortofotomosaico del rivestimento parietale in opera mista – catacomba di Santa Ciriaca

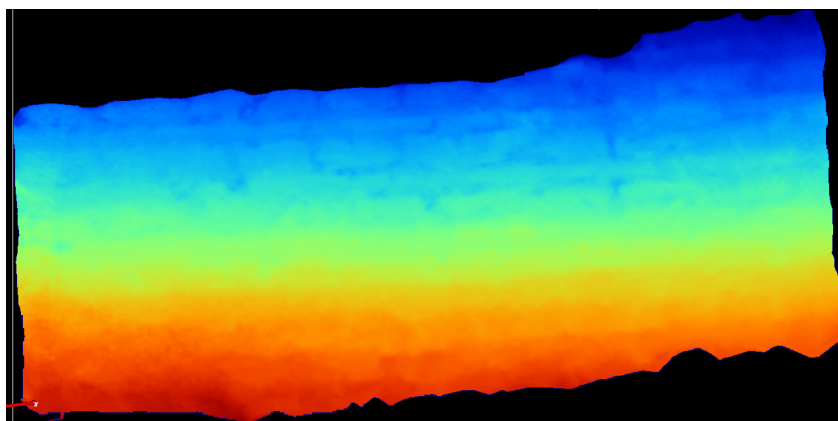


Figura 21 DEM del rivestimento parietale in opera mista – catacomba di Santa Ciriaca

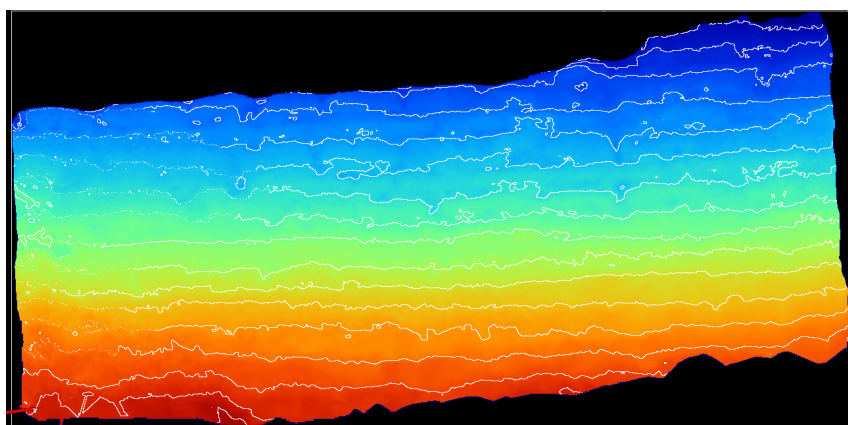


Figura 22 Curve di livello del rivestimento parietale in opera mista – catacomba di Santa Ciriaca

5.2.2. Rilievo di una parete di loculi

Il secondo soggetto rilevato è stata una parete di tufo nella quale sono stati scavati i loculi poi ricoperti da lastre marmoree e laterizi.



Figura 23 Parete di loculi – catacomba di Santa Ciriaca

Le immagini acquisite a mano libera sono state 9 in una sola strisciata, UMap ha impiegato circa 15 minuti per l'elaborazione di una nuvola di punti che però non è perfetta sempre per problemi dati dall'ombra dovuta al modo di ripresa (anche in questo caso dall'alto con la fotocamera inclinata di 30°) ed ai ponteggi. Sono poi stati selezionati e puliti 5 modelli che formano una nuvola di 660.921 punti.



Figura 24 Nuvola di punti della parete di loculi – catacomba di Santa Ciriaca

Da questa si sono poi ottenuti modelli 3D triangolati, ortofotomosaico, DEM, curve di livello e profilo.



Figura 25 Modelli 3D triangolati della parete di loculi – catacomba di Santa Ciriaca



Figura 26 Modelli 3D triangolati e scalati della parete di loculi – catacomba di Santa Ciriaca



Figura 27 Ortofotomosaico della parete di loculi – catacomba di Santa Ciriaca

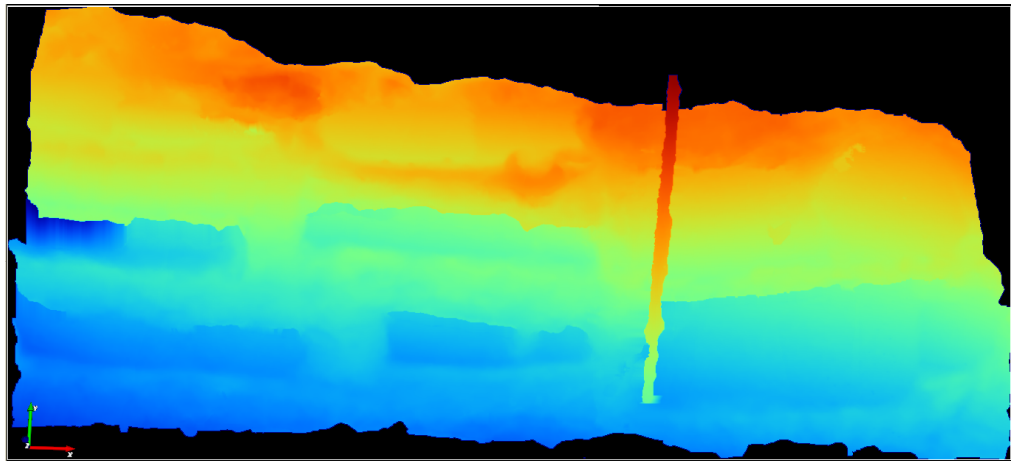


Figura 28 DEM della parete di loculi – catacomba di Santa Ciriaca

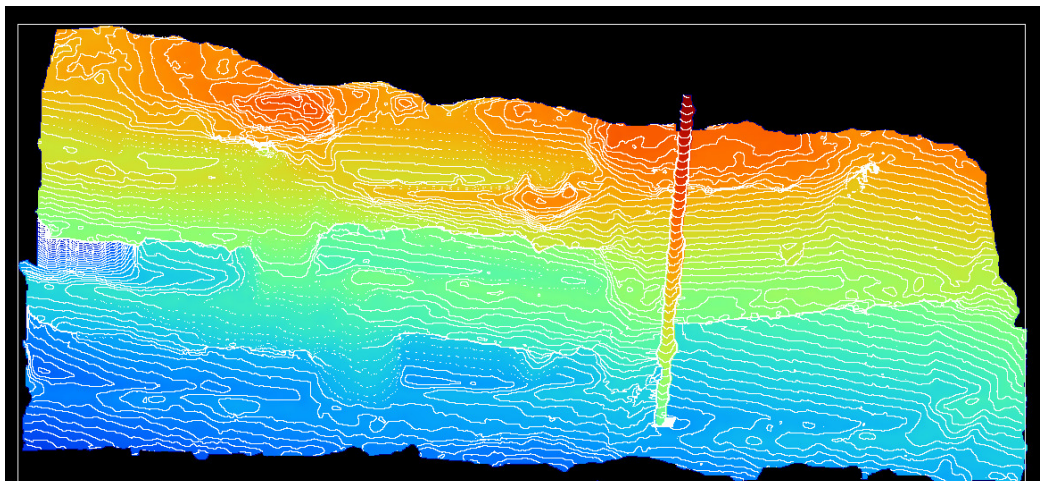


Figura 29 Curve di livello della parete di loculi – catacomba di Santa Ciriaca

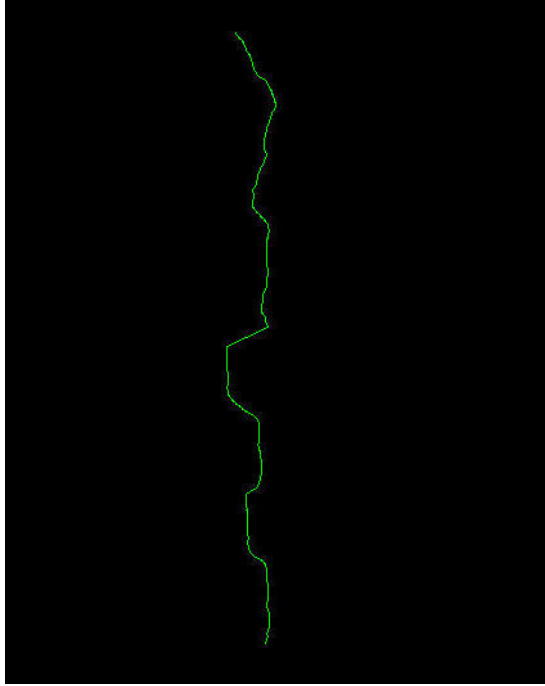


Figura 30 Profilo della parete di loculi –
catacomba di Santa Ciriaca

5.3. Osservazioni conclusive

Le applicazioni fotogrammetriche con ZScanEVO si sono rivelate molto produttive. Tutto ciò che si è ottenuto dalle elaborazioni dei modelli 3D possono essere utili a fini documentari, divulgativi e valorizzativi.

È necessario però sottolineare che in condizioni di scarsa luminosità e agibilità, come nel caso della catacomba, risulta difficoltoso ottenere dei prodotti perfetti anche se sono comunque apprezzabili e sfruttabili.

6. Tecniche di rilievo archeologico

“Il rilievo archeologico è lo strumento principale per interpretare e ricostruire i monumenti del passato”, come disse il grande professore Giuliani. Essenziale è la conoscenza delle tecnologie edilizie e delle culture materiali del mondo antico perché il rilievo archeologico è un procedimento interpretativo che evidenzia gli elementi significativi tra tanti altri segni di un manufatto³⁴.

Da circa 15 anni nel mondo del rilievo archeologico ha fatto il suo ingresso la tecnologia con la funzione di creare ricostruzioni il più possibile fedeli alla realtà, ridurre i tempi di lavoro e avere fini divulgativi, di tutela e valorizzazione.

I principali strumenti utilizzati per un rilievo archeologico che corrisponda alle caratteristiche appena descritte sono oltre alla fotogrammetria, di cui abbiamo già parlato: la stazione totale, il GPS ed il laser scanning.

6.1. Stazione totale

Con la stazione totale vengono acquisite posizioni, sia planimetriche che altimetriche, dei punti che si vogliono rilevare.

Con il passare del tempo questo strumento ha sviluppato le sue funzioni che permettono di realizzare un rilievo in modo ancor più preciso e veloce: i dati vengono registrati automaticamente nei calcolatori elettronici con un trasferimento in tempo reale, tecnica laser grazie alla quale non è più necessario il prisma riflettente a distanze non troppo elevate. Per ottenere dei punti da riprodurre in cartografia è necessario che la stazione totale si appoggi a tre punti fissi, di solito costituiti dalla rete geodetica nazionale realizzata dall'IGM e dall'Amministrazione del Catasto per quanto riguarda le triangolazioni di dettaglio.

Dopo aver montato la stazione totale, dotata di treppiede, assicurandosi che sia in bolla, si dirige il mirino verso il punto da acquisire. Quest'ultimo può essere indicato da un mirino retroriflettente, oppure, come si è accennato sopra, le nuove stazioni hanno il sistema laser che indica, senza bisogno di altri supporti, il punto da prendere.

In campo archeologico l'uso della stazione totale è molto utile data la sua capacità di prendere punti sparsi perché permette la georeferenziazione delle piante di scavo³⁵.

³⁴ Bianchini 2008.

³⁵ Bartolini - Salzotti 2003-2004.

6.1.1. Applicazioni stazione totale

Nel caso del rilievo di dettaglio del sito archeologico di Colle Breccioso (RI) è stato utilizzato per la maggior parte il DGPS ma avendo questo un margine di errore troppo elevato per il posizionamento delle strutture affioranti, si è scelto di proseguire con l'uso simultaneo di una stazione totale computerizzata, la quale è stata molto utile anche per rilevare le aree coperte da vegetazione³⁶.

Nel caso dello studio dell'antica Cuma la stazione totale è stata utile alla realizzazione di una pianta del profilo delle strutture emergenti. È stata posizionata su un punto di riferimento coincidente con l'origine di un sistema di assi cartesiani xy. Da qui, oltre a rilevare i setti murari evidenti, sono stati presi due punti in zone idonee alla misurazione tramite GPS, così da poter poi orientare i vari sistemi locali secondo il sistema geografico Gauss-Boaga³⁷.

I rilievi delle aree di scavo di Hierapolis e dei rispettivi monumenti effettuati con la stazione totale sono stati indispensabili per la creazione di un GIS archeologico della città antica. Ed inoltre i punti battuti trasformati in coordinate note sono stati plottati alla scala desiderata realizzando così lo schema grafico per eseguire a mano il rilievo di dettaglio archeologico³⁸.

Per la valorizzazione del sito archeologico di Doclea in Montenegro la stazione totale è stata utilizzata per rilevare i vertici di dettaglio opportunamente distribuiti lungo il perimetro di tutte le strutture architettoniche emergenti e per i punti di appoggio usati per le riprese fotogrammetriche di alcune parti degli alzati.

6.2. GPS

In campo archeologico il Sistema Globale di Posizionamento è utile per georiferire immediatamente le emergenze rinvenute e dà quindi la possibilità di creare una cartografia archeologica. Le precisioni necessarie in archeologia non sono elevate, non è richiesta una precisione centimetrica è quindi possibile ottenere le coordinate di un punto in pochi secondi.

Per rilevare attraverso un GPS sono necessari uno o più ricevitori e che ci siano almeno 4 satelliti visibili. La posizione è data dalla distanza che percorre il segnale emesso dai satelliti orbitanti (in tutto ce ne sono 24, più 3 per i casi di emergenza) per arrivare al ricevitore.

Due sono i metodi di rilevamento: quello assoluto e quello differenziale. Nel primo caso è necessario il solo ricevitore che registra e visualizza la posizione, non arriva ad elevate precisioni ma è veloce e pratico e quindi comodo da usare sui siti archeologici. Nel secondo caso sono

³⁶ Colosi – Gabrielli – Peloso - Rose 2001.

³⁷ *Ibid.*

³⁸ Semeraro - Pecere 2007.

necessari due ricevitori e si tratta di un posizionamento relativo rispetto ad un punto noto, sono necessari tempi maggiori, dai 30 ai 60 minuti. In questo tipo di rilievo rientrano diverse tecniche: 1) rilevamento statico che garantisce precisioni centimetriche e subcentimetriche, utilizzato per la produzione cartografica, si deve essere fermi sul punto per almeno 30 minuti; 2) rilevamento cinematico permette di acquisire punti continui in movimento, con sessioni di misura prolungate e regolari, il *reference* viene mantenuto fisso su un punto e il *rover* è spostato sui punti da rilevare, permette una buona precisione; 3) rilevamento *stop and go*, è uguale al precedente ma più rapido, comunque ha una buona precisione anche questo, di poco inferiore ai precedenti. È poi necessario correggere quegli errori sistematici delle misure.

Il GPS è scomodo se ci si trova in contesti boschivi o urbani con presenza rispettivamente di una fitta vegetazione e di un'alta densità di palazzi di altezze abbastanza notevoli., perché difficilmente coglie il segnale satellitare³⁹.

5.2.1. Applicazioni GPS

Le variazioni altimetriche della collina di Breccioso (RI) sono state rilevate in modalità differenziale cinematica: è stato registrato un punto topografico ogni 2 secondi con un margine di errore compreso tra i 2 o 3 cm, adeguato per la ricostruzione di curve di livello e la morfologia del territorio⁴⁰.

Per lo studio della topografia dell'antica Cuma è stato realizzato un rilievo GPS in modalità differenziale per georiferire gli elementi archeologici rinvenuti secondo il sistema geografico Gauss-Boaga e per ancorare i punti GPS a due nodi della rete topografica IGM WGS 84 esistenti a meno di 20 km dal sito di Cuma e ad alcuni appoggi trigonometrici presenti in zona⁴¹.

Nel caso di studio del castello di al-Wu'ayra a Petra, in Giordania, per georiferire le strutture del castello sono state registrate le coordinate assolute di una serie di punti fiduciali con il DGPS in modalità cinematica. Questo rilievo ha permesso la realizzazione del modello tridimensionale della rocca e delle sue strutture⁴².

Nell'applicazione del DGPS in modalità cinematica nel caso di Villa Magna a Anagni (FR) si è scelto di montare un'antenna rover su un'automobilele seguendo una precisa procedura di acquisizione. È stato necessario considerare le oscillazioni del veicolo per arrivare ad una corretta interpretazione del dato. Con questa tecnica è stato possibile coprire grandi aree, avere

³⁹ Bartolini - Salzotti 2003-2004.

⁴⁰ Colosi – Gabrielli – Peloso - Rose 2001

⁴¹ *Ibid.*

⁴² *Ibid.*

un passo di campionamento costante, visualizzare le zone già indagate mediante le tracce lasciate dagli pneumatici⁴³.

6.3.Laser scanning

Il rilievo tramite laser scanner permette di ottenere una nuvola di punti dell'oggetto che corrisponde ad una copia fedele.

Attraverso un laser che va a scansionare l'oggetto da indagare si registra quando il segnale laser incontra un ostacolo e così si ricostruiscono i singoli punti che poi formeranno un complesso modello tridimensionale. È molto facile acquisire i dati ma si richiede una grande elaborazione degli stessi per ottenere un buon risultato. Oltre la possibilità di ricreare in 3D ciò che interessa e quindi poter monitorare lo stato di degrado e poterlo interpretare, è anche utile a fini divulgativi. Esistono scanner ad altissima definizione (risoluzione submillimetrica) per oggetti di piccole dimensioni e quindi molto utili per reperti archeologici, altri che hanno una risoluzione subcentimetrica utilizzati per ricostruire strutture architettoniche ad alta definizione, alcuni sono apposti per la restituzione di ampi panorami urbani e paesaggistici a medio - alta definizione da usare anche in campo archeologico per contestualizzare un sito rispetto al suo territorio circostante, inoltre alcuni scanner restituiscono panorami aerei a media definizione (risoluzione decimetrica)⁴⁴.

Dalle nuvole di punti è possibile poi, attraverso processi di elaborazione dei quali gran parte automatici, ottenere modelli tridimensionali, DTM, DSM, DDEM.

In archeologia è importante a scopo sia documentaristico che divulgativo perché permette una ricostruzione, oltre che fedele, anche di grande impatto, del soggetto rilevato. È comunque disagiata dal punto di vista pratico date le proporzioni dello strumento e l'enorme quantità di dati prodotta, complicata poi da gestire.

6.3.1. Applicazioni laser scanning

Per il rilievo tridimensionale dell'Abbazia di San Galgano a Chiusdino (SI) con il laser scanner, si è deciso di lavorare di notte per potenziare le possibilità del raggio laser. Con la luce solare la potenza del laser cala sensibilmente, raggiungendo una dimensione del raggio approssimativa a 20/25 metri. Il risultato è stato ottimale.

⁴³ Angelini – Colosi – Gabrielli – Fentress - Filippone 2007

⁴⁴ Bartolini - Salzotti 2003-2004.

Essendo nella maggior parte degli scavi archeologici costretti a lavorare di giorno, si può ovviare a questo difetto aumentando il numero di stazioni e quindi riducendo la distanza tra l'una e l'altra⁴⁵.

Per l'acquisizione dei dati dei rivestimenti parietali e pavimentali della *cenatio* della villa di Faragola a Ascoli Satriano (FG) sono state impostate 12 stazioni di rilievo da cui sono state eseguite 14 scansioni per un totale di circa 11 milioni di punti. L'alto numero di stazioni è dovuto al tentativo di eliminare le zone d'ombra (che nella restituzione dati diventano punti sporchi) create dalla tettoia e dai pali che la sostengono, ma non è stato possibile rimuovere quelle prossime al pavimento⁴⁶.

Nel caso del rilievo del castello di Gorizia si è deciso di procedere sia con il LIDAR (laser aviotrasportato con GPS/INS), sia con il laser terrestre.

Le scansioni laser aeree hanno rilevato un'area di 1,66 kmq con 14 strisciate incrociate con una densità media di campionamento pari a 7 punti/mq per un totale di più di 20 milioni di punti. La sovrapposizione delle strisciate ha permesso l'eliminazione di gran parte delle occlusioni prospettiche e di raggiungere nel complesso una densità pari a 15 punti/mq. Il risultato della scansione totale aerea è georiferito grazie al sistema GPS/INS. È stato poi eseguito un filtraggio dei punti, riconoscendo quelli che appartengono al terreno (DTM). Inoltre i vari punti vengono attribuiti a diverse classi definite dall'utente (terreno, edifici, vegetazione e automobili) in base alla differenza altimetrica tra i punti o all'intensità del segnale laser che varia in funzione del materiale colpito. Da questa operazione è stato poi possibile ottenere il DEM. Le ultime operazioni sono state la modellazione degli edifici e l'integrazione con immagini fotogrammetriche.

Con lo scanner terrestre sono state rilevate la Corte dei Lanzi, la Sala degli Stati Provinciali e la salita che dalla porta di ingresso delle mura arriva al mastio principale. Per la creazione di una rete di appoggio topografico per la successiva georeferenziazione sono stati rilevati 65 punti. Sono state eseguite 18 scansioni: 7 per la corte, 9 per la salita, 2 per la sala. In totale oltre 34 milioni di punti impiegando 1 ora e 47 minuti di scansione. Anche in questo caso l'ultimo passaggio è consistito nell'integrazione con immagini fotogrammetriche.

Si è proceduto infine all'integrazione dei dati aerei e terrestri⁴⁷.

⁴⁵ Peripimeno 2005.

⁴⁶ De Felice – Sibilano - Volpe 2010.

⁴⁷ Visintini – Fico - Spangher 2006.

6.4. Osservazioni conclusive

Come si può constatare dai diversi casi applicativi portati come esempio per spiegare al meglio l'uso e lo scopo di ogni sistema di rilievo archeologico, l'uso congiunto di questi metodi è la soluzione ottimale. Il laser scanning si integra bene con la fotogrammetria perché quest'ultima restituisce le immagini che diventano la *texture* della nuvola di punti ottenuta con la scansione laser; e la stazione totale e il GPS si completano a vicenda nel caso in cui siano presenti condizioni ambientali o atmosferiche che obblighino all'uso dell'uno o dell'altro metodo.

Inoltre tutti i dati che si ottengono da questi tipi di rilievo sono sfruttabili per la creazione di un sistema GIS che contenga tutte le informazioni fondamentali di un sito archeologico. Infatti come dicono Balletti-Guerra⁴⁸, nel caso degli scavi archeologici ci sono diverse situazioni da rilevare: dalla posizione dei manufatti all'interno di un'area urbana, all'architettura di ogni singolo edificio e alla forma di ogni frammento ritrovato. La posizione dei manufatti viene rilevata tramite l'uso del GPS, grazie al quale è possibile georiferire i resti in un unico sistema di riferimento e poter sfruttare dei punti di controllo in più scale di rappresentazione. Il laser scanner può essere usato per ricostruire gli edifici, come anche la fotogrammetria la quale può tranquillamente restituire le misure dei manufatti rinvenuti e qualsiasi rinvenimento orizzontale, ovvero strutture a terra e strati. Inoltre il laser scanner e la fotocamera possono essere agganciati a palloni frenati o ad elicotteri e aeroplani così da rilevare grandi porzioni di territorio, utile ad una ricostruzione complessiva, ad una contestualizzazione del territorio circostante e soprattutto all'individuazione di tracce sul terreno e conseguente interpretazione.

⁴⁸ Balletti - Guerra 2007.

7. La geoarcheologia

Con il sorgere delle domande circa l'antichità dell'uomo dalla prima metà del XX secolo, con la geologia è nata anche la geoarcheologia. La sua utilità in ambito archeologico invece è avvenuta solo con gli anni '70, quando è stato compreso che le tracce archeologiche sono l'effetto, oltre che di un'attività antropica, anche di un'azione naturale che si è sviluppata in tempi lunghissimi attraverso processi deposizionali e post-deposizionali.

La geoarcheologia è la ricerca archeologica che utilizza concetti e metodi delle scienze della terra.

Le informazioni della disciplina geoarcheologica che apporterebbero nozioni fondamentali all'interpretazione e alla divulgazione del dato archeologico sono date da:

- la geografia fisica, studio della dinamica della superficie terrestre;
- la sedimentologia, studio dei processi di sedimentazione e dei sedimenti;
- la geofisica, tecniche di prospezione non invasive;
- la pedologia, studio del suolo e dei processi di trasformazione della superficie terrestre.

Per poter interpretare correttamente il dato archeologico è necessario ricostruire la situazione paleo-ambientale alla quale il dato appartiene.

Il geoarcheologo deve riuscire a differenziare le tracce antropiche da quelle naturali e comprendere quindi il contesto geografico fisico che c'era all'origine, prima dell'intervento umano. Solo così si può scoprire quale sia la pianificazione territoriale, le strutture economiche e sociali, ricercate dall'uomo. Si può ottenere questo obiettivo basando gli studi sulle scienze della terra e facendo interagire la disciplina archeologica con quella geologica.

Le unità stratigrafiche archeologiche non sono da intendere solo come contenitori, la loro struttura interna è diagnostica per i processi che le hanno generate. Effettuando una distinzione tra strutture sedimentarie e figure pedogenetiche è possibile riconoscere le unità pedologiche che non sono prodotte da processi di accumulo ma di alterazione *in situ* di materiale precedentemente depositato. Anche le unità negative sarebbe utile denominarle, in termini geologici, contatti. Inoltre unità positive e negative riducono la formazione di strati alla semplice attività di sedimentazione ed erosione, mentre il procedimento è molto più complesso e vi interviene soprattutto il processo pedologico.

I siti archeologici, proprio come tutte le successioni stratigrafiche, si articolano in corpi discontinui in spessore ed estensione, disposti secondo particolari geometrie, suddetti corpi sono le unità litostratigrafiche, ossia la risultante, la traccia materiale, dei processi geomorfici (erosione, sedimentazione, pedogenesi), questi includono fasi di instabilità ambientale che possono portare anche alla completa cancellazione di parte delle successioni stratigrafiche, così

anche le tracce dell'attività antropica risultano progressivamente più diluite. Attraverso un'accurata analisi dell'evidenza stratigrafica si risale ai processi che l'hanno generata e quindi alla condizione paleo-ambientale originaria e alla sua evoluzione grazie alla comprensione della successione delle unità stratigrafiche. I siti archeologici subiscono gli stessi processi di degrado che subisce qualsiasi superficie della terra, con variazioni legate alla presenza antropica. L'attività dell'uomo sui sedimenti è una forma di bioturbazione pur estremamente differenziata.

Durante lo scavo archeologico è indispensabile realizzare una descrizione del terreno che includa caratteri sedimentologici (forma e orientamento, stratificazione, tessitura e struttura che permettono di risalire alle *facies* sedimentarie) e caratteri pedologici (alcune superfici sono talmente esposte da essere soggette a processi pedogenetici che obliterano a volte i preesistenti caratteri sedimentologici). È poi opportuno procedere con le analisi fisico-chimiche sui campioni raccolti, la cui densità è rapportata a ciò che si vuole sapere. In particolare: analisi tessiturali (misure granulometriche dei sedimenti), analisi chimiche dei componenti del suolo e analisi mineralogico-petrografiche (studio della frazione sabbiosa dei sedimenti e dei minerali pesanti).

Per l'interpretazione di singoli siti archeologici è importantissimo metterli in relazione al paesaggio cui essi appartengono. Il rilevamento geomorfologico consiste nello studio di foto aeree e foto da satellite ed assieme alla carte relative ad esso è possibile comprendere l'evoluzione diacronica del paesaggio, individuando le sue diverse unità geomorfologiche. È particolarmente utile, per la geoarcheologia, nel caso di pianure alluvionali.

Le relazioni tra siti archeologici e paesaggi sono individuabili anche attraverso la provenienza dei materiali lapidei (rocce per allestire attrezzi e strumento da lavoro) racchiusi nella stratificazione archeologica: attesta il grado di mobilità della comunità che vi è vissuta e le principali direttrici di traffico. La provenienza è nota grazie alle tecniche petrografiche delle rocce sedimentarie, metamorfiche, vulcaniche e magmatiche, oppure allo studio di sezioni lucide mediante microsonda e alla analisi geochimica degli elementi in tracce.

Quindi come indica il Cremaschi⁴⁹, il compito del geoarcheologo è quello di valutare il rischio archeologico, ricostruendo le trasformazioni paleo ambientali (a livello di territori) e analizzando i processi di formazione (a livello del singolo sito archeologico). Deve raggiungere questi obiettivi attraverso il rilevamento territoriale cui si è accennato sopra, lo studio dell'evidenza stratigrafica in serie significative o profili pedologici, analisi di laboratorio già citate su campionature mirate e gli elaborati cartografici, ossia carta pedologica (scala di dettaglio, situazioni di infrasito) e carta geomorfologica o fisiografica (media scala, rappresentazione unità di paesaggio, stabilisce morfogenesi e età relativa).

⁴⁹ Cremaschi 2006.

8. Conclusioni

In questo studio sono stati affrontati tre temi fondamentali: la modellazione tridimensionale dei beni archeologici e geologici, la comparazione tra diverse tecniche di rilievo e la disciplina della geoarcheologia.

A proposito della prima tematica si è visto come attraverso la fotogrammetria, ed in particolare con il prodotto ZScanEvo della Menci Software di Arezzo, sia possibile ottenere dei prodotti notevoli, sfruttabili in campo conservativo e di restauro grazie alla restituzione di misure precise che rendono possibile l'applicazione di interventi mirati sull'oggetto rilevato, in campo divulgativo dato il grande impatto che hanno sul grande pubblico e di conseguenza la possibilità di creare, per esempio, percorsi museali più esplicativi ed interessanti, ed in campo di studio vista la fedeltà con la quale viene riprodotto l'oggetto che può quindi essere di aiuto in ricerche scientifiche future.

Dall'analisi delle diverse tecniche di rilievo archeologico si è imparato come queste giungano a livelli di efficacia davvero elevati quando sono applicate insieme. In archeologia è quasi impossibile trovarsi di fronte a situazioni già conosciute e sperimentate, è per questo che è fondamentale avere la mente aperta e predisposta a metodologie di lavoro sempre nuove e sempre per questo risulta utile l'integrazione di stazione totale e GPS, fotogrammetria e laser scanning a seconda del contesto, e in alcuni casi anche del vecchio metodo della triangolazione, ormai superato dalle nuove tecnologie, che ogni buon archeologo dovrebbe essere in grado di realizzare

È importante comprendere la necessità di far interagire i diversi metodi di rilievo proprio come è importante che comunichino le diverse discipline della archeologia e della geologia. Queste due materie hanno molto in comune e non si può arrivare ad una vera e chiara interpretazione archeologica di un sito se non se ne conosce il contesto geologico. Ogni attività antropica sulla terra è influenzata dall'ambiente e viceversa, proprio come spiegò la corrente scientifica del possibilismo agli inizi del '900 con Paul Vidal de la Blache (*“De l'interprétation géographique des paysages”*, 1908), e l'ambiente è appunto determinato da fattori ed eventi geologici. Per questo è fondamentale che un archeologo conosca almeno delle nozioni base di geologia che lo indirizzino verso una corretta interpretazione del dato archeologico e per arrivare a ciò è anche necessario che sia adoperata, nei casi in cui è necessario (per esempio quando si parla di strati e contatti), una nomenclatura comune tra archeologia e geologia.

Infine, ritengo sia necessario che gli ambiti di cui si è trattato in questo studio continuino ad essere oggetto di ricerche future perché sicuramente un loro continuo sviluppo porterà l'archeologia ad essere una disciplina sempre più esatta e sempre più fondamentale per la ricostruzione del nostro passato.

Bibliografia

- Angelini A. – Colosi F. – Gabielli R. – Fentress E. – Filippone C., “Tecniche speditive per la ricostruzione tridimensionale dell’area archeologica di Villa Magna”, in *Archeologia e Calcolatori*, 2007.
- Apollonia 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*, 2007.
- Balletti C. – Guerra F., “Dal modello numerico alla reintegrazione della forma”, in *La geomatica per i beni culturali*, 2007.
- Bartolini G. – Salzotti F., “Disegno e rilievo archeologico mediante la strumentazione informatica”, 2003-2004.
- Bianchini M., “Manuale di rilievo e di documentazione digitale in archeologia”, 2008.
- Bosio A., “Roma sotterranea”, 1710.
- Camin L. – Carrozzino M. – Leonardi R. – Negri A., “Nuove tecnologie per la conoscenza e la comunicazione di Lucca Romana”, in *Archeologia e Calcolatori 21*, 2011.
- Ceccaroni F., “Generazione di ortofoto ad alta risoluzione su scansione laser. Proposta di una nuova tecnologia con caratteristiche di produttività e standard qualitativi di tipo cartografico”, in *Geomedia*, 2005.
- Ceccaroni F. – Menci L., “ZScan: generazione di modelli 3D per la ricognizione metrica e radiometrica dei beni culturali tramite immagini”, in *Techa*, 2008.
- Colosi F. – Gabrielli R. – Peloso D. – Rose D., “Impiego del *differential global positioning system* (DGPS) per lo studio del paesaggio antico: alcuni esempi rappresentativi”, in *Archeologia e Calcolatori*, 2001.
- Cremaschi M., “Manuale di geoarcheologia”, 2006.
- De Felice G., Sibilano M.G., Volpe G., “Esperienze laser scanning su rivestimenti pavimentali e parietali: il caso della *cenatio* della villa di Faragola (Ascoli Satriano, FG), 2010.
- Dursun S. – Sagir D. – Büyüksalih G. – Buhur S. – Kersten T.P. – Jacobsen K., “*3D City Modelling of Istanbul Historic Peninsula by Combination of Aerial Images and Terrestrial Laser Scanning Data*”, 2008.

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 rilievi 3D terrestri nell’antica città di Palmyra (Siria)”, in *Atti XIV Conferenza Nazionale ASITA*, 2010.

Gabrielli R. – Landini B. – Amico N. – Angelini A. – Franchi R. – Menci L., “*The ancient drainage sistema f Petra: analysis and restoration for cultural heritage conservation of the methodologies applied to the conservation of the monumental Palace Tomb*”, in *IV International Congress on “Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin”*, 2009.

Ghezzi M. – Santarsiero D., “ZScan: scansione tridimensionale digitale”, in *Archeomatica*, 2009.

Lo Brutto M. – Spera M.G., “*Image-based and range-based 3D modeling of archaeological cultural heritage: the telamon of the temple of Olympian Zeus in Agrigento (Italy)*”, 2011.

Menci L., “Stazione digitale multisensore per una moderna produzione di dati cartografici”, in *Geomedia*, 2004.

Menci L. – Morandi T. – Vangi D., “Misura della deformazione di veicoli soggetti a incidenti stradali tramite la fotogrammetria”, in *ALAS – Associazione Italiana per l’Analisi delle Sollecitazioni*, 2008.

Menci L. – Nex F. – Rinaudo F., “ZScan Menci Software: un nuovo strumento per le elaborazioni fotogrammetriche multimmagie”, in *Atti XI Conferenza Nazionale ASITA*, 2007.

Menci L. – Rinaudo F., “Cyclop: acquisizione e restituzione di prese stereoscopiche senza punti di appoggio”, 2000.

Menci L. – Salonia P., “*Exploring 3D models in a stereoscopic way*”, 2007.

Nex F. – Rinaudo F., “*Multi-image matching: an “old and new” photogrammetric answer to LIDAR techniques*”, 2007.

Parenti R. – Vecchi A. – Gilento P., “*Integrated System for the Study and the Managment of the Historical Buildings*”, in *CAA Fusion of Cultures*, 2010.

Peripimeno M., “Sperimentazione di tecniche 3D laser scanning per l’analisi e la conservazione del patrimonio archeologico e storico-monumentale. Definizione di procedure e campi di utilizzo”, 2005.

Petriaggi R. – Davide B. – Ghezzi M., “L’impiego del sistema ScubaScan per il rilievo 3D dei sarcofagi del relitto di San Pietro in Bevagna (Taranto)”, in *XVII Salone dell’Arte del Restauro e della Conservazione dei Beni Culturali e Ambientali*, 2010.

Platner S.B. – Ashby T., “*A topographical dictionary of ancient Rome*”, 1965.

Salonia P. – Bellucci V. – Scolastico S. – Marcolongo A. – Leti Messina T., “*3D survey technologies for reconstruction, analysis and diagnosis in the conservation process of cultural heritage*” in *XXI International CIPA Symposium*, 2007

Salonia P. – Marcolongo A. – Scolastico S., “*Experimentation of a three-focal photogrammetry survey system as non invasive technique for analysis and monitoring of painting surfaces decay condition*”, 2010.

Santarsiero D. – Ghezzi M., “*Texturised 3D models using photo scanning*”, in *GeomaticsWorld*, 2010.

Semeraro G. – Pecere B., “Gestione informatizzata dei dati archeologici e dei sistemi GIS. Applicazione al sito di Hierapolis di Frigia”, in *Archeologia e Calcolatori*, 2007.

Tiano P. – Salvo P. – Ceccaroni F., “*The Microphotogrammetry as a Portable Diagnostic Tool for Monumental Surface Monitoring*”, 2008.

Tucci G. – Bonora V., “*Teaching geomatics*”, 2008.

Vannini G., “Da Petra a Shawbak – archeologia di una frontiera”, in *Archeologia Viva*, 2009.

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”, 2006.

