

Università degli Studi di Firenze - Dipartimento di Architettura DIDA
Dottorato di Ricerca in Architettura - Indirizzo in *Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente*
Settore disciplinare ICAR 17
Tesi di Dottorato di Ricerca D.P.R. 11/7/1980 - Ciclo XXVIII - Novembre 2015

Sara Bua

**La rappresentazione tridimensionale dell'architettura e dell'archeologia:
sistemi informatici per la documentazioni e valorizzazione dei
Beni Culturali.**



Scuola Nazionale di Dottorato in Scienza della Rappresentazione e del Rilievo

Scuola Nazionale di Dottorato XVIII ciclo - 2012/2015

in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo

Sede centrale di coordinamento dal 2011

Università degli Studi di Roma "Sapienza"

Direttore dal 2011 - Cesare Cundari

Direttore dal 2013 - Riccardo Migliari

Sedi consorziate

Politecnico di Bari

Università di Catania - Siracusa

Università degli studi "G. D'Annunzio" Chieti - Pescara

Università degli Studi di Firenze

Università degli Studi di Palermo

Università Mediterranea di Reggio Calabria

Università degli Studi di Roma "Sapienza"

Università degli Studi di Firenze

Dottorato di Ricerca in Architettura

Indirizzo in Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente

XXVIII Ciclo - Settore disciplinare ICAR 17

Coordinatore 2011/2013 - Marco Bini

Coordinatore dal 2013 - Maria Teresa Bartoli

Collegio del Dottorato al 2015

Barbara Aterini, Maria Teresa Bartoli, Stefano Bertocci, Giuseppe Conti.

<i>Dottoranda</i> Sara Bua	<i>Dottorato in Architettura, Università degli Studi di Firenze</i>
<i>Tutor</i> Stefano Bertocci	<i>Coordinatore</i> Maria Teresa Bartoli <i>Referente del Curriculum in</i> <i>"Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente"</i> Barbara Aterini Data.....

INDICE

<i>Premessa</i>	6	2.5 Considerazioni sulla gestione della nuvola di punti	40
		2.5.1 L'allineamento di nuvole di punti	46
		2.5.2 La registrazione delle scansioni	49
		2.5.3 La standardizzazione del dato	51
PARTE I		3. L'acquisizione del dato metrico: <i>metodi image based</i>	59
INTRODUZIONE	9	3.1 Obiettivi e strumentazione	60
1. La documentazione del patrimonio culturale	11	3.2 Metodologia	66
1.1 Il rilievo dei Beni Culturali e la valorizzazione del dato attraverso scenari virtuali	12	3.3 Rilievo fotogrammetrico del sito archeologico di Masada	68
1.2 Obiettivi e organizzazione della tesi	14	3.4 La ripresa fotografica	69
1.3 Descrizione dei casi di studio affrontati	16		
PARTE II		PARTE III	
L'ACQUISIZIONE DEL DATO METRICO	21	LA RAPPRESENTAZIONE DELL'ARCHITETTURA	77
2. L'acquisizione del dato metrico: <i>metodi range based</i>	23	4. La rappresentazione bidimensionale: prodotti vettoriali e raster	79
2.1 Breve storia dei sistemi a sensori attivi	24	4.1 La rappresentazione bidimensionale dell'architettura e dell'archeologia	80
2.2 Sistemi distanziometrici	26	4.2 La restituzione vettoriale	82
2.3 Accuratezza dei sistemi laser scanner	28	4.2.1 Le operazioni di lucidatura della nuvola di punti	86
2.4 Considerazioni pratiche e operative sulle procedure di acquisizione del dato metrico: il rilievo del sito archeologico di Masada	31	4.3 La restituzione vettoriale al tratto: esempi dal rilievo della Chiesa dei SS. MM. Donato e Ilarino del Monastero di Camaldoli	90
2.4.1 Attività di acquisizione dati	34	4.4 La restituzione fotogrammetrica	94
2.4.2 Il progetto di scansione	35		
2.4.3 La regolazione dello strumento	38		
2.4.4 La scansione	39		

4.5 La restituzione della fotogrammetria non convenzionale monoscopica	97	7. Archivi digitali per la catalogazione	157
4.6 Fotopiano e fotomosaico da fotogrammi isolati	98	7.1 Fase di archiviazione e gestione dei dati: il caso Masada Project.	158
4.7 Il metodo analitico	99	7.2 La struttura dell'archivio Masada	161
PARTE IV		8. Nuovi approcci di fruizione del dato	171
LA RAPPRESENTAZIONE TRIDIMENSIONALE NEL CAMPO DEI BENI CULTURALI	103	8.1 Il sistema di valorizzazione del modello e la creazione dell'interfaccia web	172
5. La rappresentazione tridimensionale: modellazione 3D poligonale e nurbs	105	8.2 La Realtà Aumentata	174
5.1 Dalla nuvola di punti alla restituzione 3D	106	8.2.1 Il Tracking	176
5.1.1 Pre-trattamento della nuvola di punti, per la generazione di una mesh	108	8.2.2 I display	179
5.1.2 La generazione della nuvola di punti attraverso la fotografia	113	8.3 Scenari virtuali per la conservazione, valorizzazione e divulgazione della conoscenza: il caso di Montepulciano	182
5.1.3 Elaborazione dei dati	117	8.4 La modellazione tridimensionale per il restauro e la lettura critica dei Beni Culturali	185
5.1.4 Filtraggio dei dati	117	8.4.1 I mosaici del Palazzo Occidentale di Masada	185
5.1.5 Mesh editing	119	CONCLUSIONI	193
5.1.6 Successivo post-processing della mesh	121	Bibliografia	198
5.1.7 Smoothing	122	Crediti	202
5.1.8 Decimazione della mesh	123	Abstract	206
5.1.9 Remeshing	126		
5.2 La modellazione tridimensionale Nurbs	128		
5.2.1 Il Grado	131		
5.2.2 Punti di controllo	131		
5.2.3 Nodi	132		
5.2.4 Nodi e punti di controllo	134		
5.2.5 Ottimizzazione del modello 3D	134		
5.3 Texture mapping e visualizzazione	138		
6. Output: sintesi sui vantaggi e svantaggi della modellazione tridimensionale	147		
6.1 Integrazione dei modelli e verifica di correttezza del dato metrico	148		
PARTE V			
ARCHIVIAZIONE DEL DATO E OUTPUT	155		

Premessa

Gli sviluppi tecnologici messi a disposizione nel campo della documentazione, danno notevoli opportunità per il rilevamento dell'Architettura e soprattutto per il rilievo nel settore dei Beni Culturali, sia per quanto riguarda l'acquisizione delle informazioni riferite all'oggetto d'indagine, cioè la fase di acquisizione del dato metrico, sia per quanto riguarda la questione della rappresentazione e divulgazione.

Lo studio oggetto della presente tesi si propone, sulla base di numerose esperienze maturate nel corso del Dottorato e partecipando alle attività del Laboratorio di Rilievo e dal Laboratorio Congiunto LS3D dell'Università di Firenze, di affrontare e approfondire, oltre che le problematiche connesse all'utilizzo della fotogrammetria digitale e del laser a scansione terrestre per applicazioni nell'ambito dei Beni Culturali, le problematiche inerenti la rappresentazione, la fruizione e l'archiviazione dei dati digitali.

La ricerca condotta è prettamente applicata, quindi è stata primaria l'esigenza di avere a disposizione reali casi di studio su cui sperimentare le tecniche di interesse; è però importante sottolineare che questo è un campo in cui ogni esperienza presenta proprie caratteristiche e peculiarità e difficilmente può essere affrontata con schemi convenzionali e metodologie standardizzate; le problematiche emerse hanno di volta in volta indirizzato e spinto la ricerca all'approfondimento di certi aspetti piuttosto che altri.

A tal proposito è stato evidenziato dalle esperienze effettuate che il campo dei Beni Culturali è forse il più emblematico delle potenzialità oggi disponibili dalle tecnologie di rilevamento, e soprattutto dalle possibilità offerte da un approccio integrato e multidisciplinare di tecniche e tecnologie diverse; per questo si è voluto sottolineare questo aspetto, descrivendo l'approccio metodologico adottato in molti lavori in contesto archeologico.

In questo settore si presenta generalmente l'esigenza dell'utilizzo di diverse tecniche integrate tra loro allo scopo di realizzare in modo rigoroso un rilievo multiscala che a partire dal territorio, passa alla scala del sito archeologico e degli scavi, ed arriva fino al singolo reperto; questo approccio è caratterizzato dall'avere tutti i dati e le relative elaborazioni in un unico e ben definito sistema di riferimento.

In questa chiave di lettura l'attenzione si è poi focalizzata sulle due tecniche che rivestono oggi nel settore in esame il maggiore interesse, cioè la fotogrammetria digitale e il laser a scansione terrestre.

La struttura della tesi segue le fasi classiche del processo che a partire dal rilievo porta alla rappresentazione ed alla generazione dei prodotti finali; il secondo ed il terzo capitolo, incentrati sull'acquisizione del dato metrico, riguardano da un lato l'acquisizione mediante sistemi laser e dall'altro l'acquisizione mediante i sensori digitali; sempre nei primi capitoli

vengono descritte le caratteristiche metodologiche e tecnico-operative e le relative problematiche delle due tipologie di rilievo.

Il capitolo quattro è dedicato, attraverso l'illustrazione dei casi studio selezionati, al problema della rappresentazione bidimensionale vettoriale e raster, il quinto capitolo ha l'obiettivo di presentare, attraverso i casi studio precedentemente illustrati, un quadro generale delle possibilità offerte dalle moderne tecnologie per la rappresentazione tridimensionale fotorealistica, generata a partire sia da dati fotogrammetrici, sia da dati laser, in maniera diretta e in maniera indiretta attraverso la modellazione nurbs.

La parte finale della tesi riguarda l'output ed in particolare l'archiviazione e la sistematizzazione dei dati acquisiti ed elaborati, per eventuali ulteriori utilizzi.

Infatti, prendendo in prestito il concetto di 'smartcity', teorizzato oltre un decennio fa da William J. Mitchell, disporre di contenuti in forma digitale permette di trarre vantaggi dalla possibilità di integrare informazioni e processi rapidamente in un unico strumento e poterli poi facilmente rendere accessibili al fruitore finale; tuttavia questo implica una progettazione accurata della struttura del database che contiene l'informazione stessa.

In questa ultima parte viene trattata la problematica dell'archiviazione in funzione della fruizione del dato metrico che, partendo dalla costruzione di un sistema di modelli tridimensionali capaci di restituire infor-

mazioni scientificamente corrette e riutilizzabili anche per scopi gestionali, diventa una sorta di contenitore dell'oggetto reale che qui appare completamente virtuale. Questo non vuole essere un duplicato del reale ma un sistema che arricchisce di nuovi significati il modello stesso.

I modelli poi non sono pensati come sistemi isolati, alla stregua di un oggetto puro destinato a rimanere identico a se stesso nel tempo, ma costituiscono una collezione di modelli tridimensionali digitali pensata come un sistema in evoluzione, capace non solo di fissare l'oggi, ma anche di essere strumento efficace per la gestione futura grazie alla restituzione della conformazione geometrica, della matericità del quale è costituita, oltre ad essere sistema conoscitivo architettonico georeferenziato all'interno di un sistema informativo creato per l'oggetto stesso dell'indagine, sia questo un centro storico, un sito archeologico o un bene culturale del patrimonio architettonico.





PARTE I

INTRODUZIONE



Resti archeologici del sito UNESCO di Villa Adriana, Tivoli (Roma).

CAPITOLO 1

La documentazione del patrimonio culturale

Il settore della documentazione dei Beni Culturali ha suscitato nel corso degli ultimi anni un interesse sempre più forte da parte della comunità scientifica e particolare interesse riveste anche per chi fa riferimento alle scienze del rilevamento.

L'UNESCO ed altre fra le maggiori agenzie ed autorità nel settore pongono ormai sempre maggiore attenzione alla documentazione metrica digitale accurata di siti archeologici, centri storici cittadini, complessi edificati d'importanza storico-architettonica, reperti archeologici. Si è quindi andata sempre più diffondendo l'idea che la conoscenza di un bene non può riguardare solo la sua storia artistica, ma deve necessariamente comprendere anche le sue caratteristiche di posizione, forma e geometria.

Le scienze del rilevamento hanno conosciuto negli ultimi anni un profondo rinnovamento ed un'importante evoluzione e le possibilità oggi rese concrete dalle tecnologie elettroniche ed informatiche offrono nuove prospettive in tutte le applicazioni del rilevamento.

In questo senso il campo dei Beni Culturali è quello che più degli altri si presta ad un approccio complementare e integrato di tecniche e tecnologie diverse, tutte di grande interesse e in continuo sviluppo: in primo luogo perché in questo settore ogni situazione costituisce un caso a sé stante, con le proprie caratteristiche, problematiche e specificità, che spesso costringono ad abbandonare i classici schemi ed approcci del rilievo per cercare soluzioni nuove e diversificate; in secondo luogo qualunque bene per poter essere correttamente studiato e compreso non va considerato solo come singola entità, ma va inserito nel contesto territoriale in cui si trova e questo costringe spesso ad adottare un approccio multidisciplinare e multiscala, che partendo dal rilievo del territorio arriva fino al singolo reperto, ponendo per ogni fase problematiche diverse,

che richiedono strumentazioni distinte e che operano con precisioni non omogenee e differenti sistemi di riferimento, ma che devono alla fine riuscire a coesistere e comunicare.

Questo è un settore che interessa moltissime aree di studio, dall'archeologia all'architettura, dalla storia all'arte, dal rilevamento alle scienze strutturali, ed ogni studioso ha le proprie esigenze in termini di procedure, dati di partenza, conoscenze necessarie e prodotti finali ottenibili.

Si pone pertanto in maniera forte il tema dell'interdisciplinarietà.

1.1 Il rilievo dei Beni Culturali e la valorizzazione del dato attraverso scenari virtuali

Il campo del rilevamento del patrimonio culturale è probabilmente, come accennato prima, il più rappresentativo delle possibilità offerte dall'integrazione delle moderne tecniche di rilevamento, per diversi motivi. Un primo aspetto è legato alle specificità presentate da ogni caso di studio che rende per molti aspetti difficile la standardizzazione del *modus operandi*.

Inoltre perché spesso le condizioni di lavoro impongono che le attività di rilievo e acquisizione dei dati, sia metrici che qualitativi, siano efficaci e ben programmate.

Le nuove tecniche e tecnologie digitali offrono, infatti, la possibilità di ottenere nuovi prodotti non solo dalle attività di rilievo, ma anche nei settori della rappresentazione e della visualizzazione, con lo scopo di avere una descrizione metrica accurata del territorio, di strutture, di edifici e di reperti. Costituiscono inoltre potenti strumenti per l'analisi degli oggetti anche a supporto delle attività di conservazione e restauro.

L'acquisizione ed il processamento dei dati devono essere realizzati seguendo appropriate metodologie, prendendo in considerazione le caratteristiche di ogni tecnica sia in termini di capacità intrinseche, come ad esempio dettaglio, accuratezza e formato dei dati, sia allo scopo della mutua integrazione, con lo scopo di inserire tutti i prodotti in un comune database, utile per molte applicazioni: divulgazione, documentazione, studi di stabilità delle strutture, etc.

L'approccio metodologico che qui viene descritto è stato adottato in molti lavori in contesto archeologico, come il sito di Masada in Israele, ed include generalmente diverse tecniche integrate tra loro allo scopo di realizzare in modo rapido e rigoroso un rilievo multi-scala che parte dal territorio, documenta l'area del sito archeologico e degli scavi, ed arriva fino al singolo reperto.

Questo approccio è caratterizzato dall'aver tutti i dati e risultati in un unico e per definito sistema di riferimento.

A questo scopo si possono definire varie opportunità dell'organizzazione del lavoro, attraverso specifici *workflow* da definirsi caso per caso.

Generalmente si possono individuare varie fasi in relazione alle metodologie e strumentazioni da mettere in campo.

Una prima fase consiste, in genere, nella definizione di punti di riferimento o di una rete d'inquadramento pre-segnalizzata nell'area di interesse; questo generalmente implica l'adozione della geodesia spaziale, per esempio per la connessione alla rete IGS di stazioni permanenti al fine di realizzare la georeferenziazione assoluta del sito, nel caso non esistano, come spesso accade, punti geodetici locali o dati noti al riguardo.

Il sistema GPS può essere utilizzato anche in modalità cinematica per la descrizione della morfologia dell'area ed il rilievo delle strutture, talvolta accoppiato con altre tecniche, come rilievi topografici classici con Total Station e fotogrammetria aerea da bassa quota, anche con l'utilizzo di piattaforme non convenzionali, e fotogrammetria terrestre; i risultati devono in ogni caso essere riportati in uno stesso sistema di riferimento.

Gli stessi punti già rilevati possono essere utilizzati per la georeferenziazione di immagini satellitari, utili per una descrizione del territorio circostante e come base per unire e sovrapporre tutti i rilievi e gli altri dati esistenti, oltre che per altri studi, come classificazioni e interpretazioni tematiche.

Rilievi topografici classici, laser a scansione terrestre e fotogrammetria *close-range* sono usati alla scala del sito per il rilievo di oggetti e strutture; tutte le metodologie richiedono la realizzazione preliminare

dell'orientamento nel sistema di riferimento comune precedentemente definito.

La fotogrammetria, da sola o integrata col laser a scansione, con i relativi prodotti come le ortofoto, la restituzione vettoriale tridimensionale e i *Digital Surface Models*, con o senza applicazione della texture, costituiscono importanti strumenti per lo studio visuale e le analisi strutturali, ad esempio a scopo di restauro, combinando un'accurata informazione metrica con una descrizione fotografica qualitativa di alta qualità per quanto riguarda informazioni su superfici, materiali, colore, ecc.

Infine la conoscenza di un sito può essere facilitata grazie ad esplorazioni virtuali, utilizzando tecniche di realtà virtuale basate su dati fotografici, come la tecnologia QTVR (Quick Time Virtual Reality) o su dati vettoriali e raster, come i prodotti in formato VRML e successivi, considerando anche che questo tipo di prodotti è altamente interattivo e può facilmente essere reso disponibile sul web.

Per singoli oggetti, lo studio può essere realizzato utilizzando differenti tecniche, secondo le caratteristiche di forma, dimensione, location dell'oggetto, e degli scopi del rilievo; in questo senso la fotogrammetria digitale è un'ottima soluzione, grazie alle sue caratteristiche offre la possibilità di realizzare il rilievo senza contatto con l'oggetto ed in tempo breve, così da non richiedere ad esempio l'interruzione delle attività di scavo per un lungo periodo.

Attualmente è inoltre possibile l'uso di camere digitali a medio-basso costo, che permettono l'acquisizione del dato metrico con semplicità, economicità e maneggevolezza, anche se in questo caso il processo fotogrammetrico diviene più difficile, richiedendo l'uso di algoritmi e procedure appropriate, specialmente per quanto riguarda la fase di calibrazione della camera.

Il laser a scansione terrestre è una tecnica emergente per la realizzazione di oggetti con una elevatissima densità di informazioni tridimensionali, e con la possibilità di accoppiare i punti acquisiti con i propri attributi radiometrici acquisiti da camere calibrate; la disponibilità di un laser a scansione terrestre durante gli scavi è ancora una possibilità non usuale, a causa di problemi logistici connessi con le difficoltà di portare uno strumento di questo tipo in molti paesi e a causa del costo ancora elevato di questa tecnologia; è tuttavia possibile eseguire un calco degli oggetti, da rilevare al termine della missione.

1.2 Obiettivi e organizzazione della tesi

La tesi risulta incentrata sull'approfondimento delle nuove tecniche digitali per la rappresentazione tridimensionale e la fruizione del dato proveniente dal rilievo applicate al campo dei Beni Culturali e dell'Architettura, in particolare fotogrammetria digitale e laser scanner.

Infatti la continua evoluzione delle tecniche di rilievo e modellazione 3D basate su sensori e lo sviluppo di sistemi sempre più performanti per la visualizzazione di dati digitali evidenziano il valore aggiunto dato dall'uso di queste metodiche nell'ambito archeologico. In particolare appare sempre più chiaro il contributo attivo che tali tecnologie possono fornire nella fase interpretativa, nella conservazione e archiviazione dei dati e nella valorizzazione del bene attraverso il web. Tutti questi aspetti portano verso un miglioramento generale dell'informazione e la crescita della ricerca archeologica¹.

L'interesse sulle diverse tecniche e metodologie di rilievo digitale e di modellazione tridimensionale in ambito archeologico è evidenziato dalla crescita della richiesta, dal loro sempre più frequente impiego e dalla necessità di utilizzare sempre di più forme di registrazione e archiviazione digitale a differenti livelli di scala e risoluzione. Ovviamente l'uso di questi strumenti si inserisce all'interno di un processo conoscitivo ben codificato, nel quale particolare attenzione deve essere posta proprio nella fase di integrazione tra le metodiche tradizionali e quelle innovative. La definizione di un sistema conoscitivo che integri tutte queste forme di analisi è il risultato di un processo nel quale vengono coinvolte differenti competenze e professioni che hanno la capacità di comunicare e condividere un obiettivo comune. Questo risultato può essere raggiunto grazie ad uno sforzo comune, profuso da un lato dagli esperti del 3D Imaging nel cercare di comprendere ed interpretare le richieste degli archeologi, dall'altro dagli archeologi

nel conoscere le potenzialità e il funzionamento di base di queste tecnologie, al fine di poterne valutare la reale efficacia ed utilità in relazione alla condizione di utilizzo. La tesi si propone nella sua prima parte di delineare in maniera più esaustiva possibile, i metodi di applicazione e i principi di funzionamento degli strumenti di acquisizione 3D più utilizzati in ambito archeologico, concentrandosi ed evidenziandone le potenzialità in ambito di documentazione e valorizzazione.

Sull'approccio metodologico della realizzazione di archivi virtuali incentrati su modelli 3D accurati e fotorealistici.

Provando a sviscerare la complessità di un processo difficile che richiede esperienza, soprattutto nel caso di acquisizione di grandi e complessi siti archeologici. Quindi in questa tesi si affrontano tutti quei processi legati alla tipologia di dati tridimensionali, provenienti dai sistemi image-based e range-based, che possono essere facilmente integrate con altre informazioni metriche provenienti da rilievi diretti e da mappe, al fine di ottenere una corretta georeferenziazione e scalatura del modello.

Anche se esistono diverse tecniche di rilievo e sensori che permettono di generare modelli 3D realistici, definiti da una buona qualità metrica e da un dettaglio coerente con le caratteristiche geometriche del modello, il migliore approccio per il rilievo consiste nella combinazione di differenti strumenti e tecniche di modellazione. Infatti l'uso di una sola tecnologia di rilievo 3D non permette, al momento, di arrivare ancora ad un risultato soddisfacente in tutte le condizioni di lavoro e in termini di accuratezza geometrica, portabilità, automatismo, fotorealismo e bassi costi, a parità di efficienza e flessibilità. Per questo i dati provenienti da immagini e laser scanner vengono integrati per sfruttare appieno le potenzialità di ogni singola tecnica di misura³.

Infine, nella tesi oltre ad affronta la tematica della creazione di modelli tridimensionali reality-based di manufatti architettonici e siti archeologici attraverso l'impiego di dati 3D generati da entrambe le tecnologie citate, si affronta la possibilità di modellazione 3D basate su rilievi già esistenti come piante di edifici o mappe generando strutture 3D che vengono realizzate attraverso estrusioni o applicando regole architettoniche e geometriche².

La tesi si articola in cinque parti che vanno dal rilievo alla rappresentazione ed alla generazione dei prodotti finali.

Nella prima parte vengono introdotti gli argomenti della tesi e i i casi studio attraverso i quali vengono illustrati i contenuti stessi della tesi.

Nella seconda, viene illustrata l'acquisizione del dato metrico, da un lato mediante sistemi laser e dall'altro mediante sensori digitali; sempre in questa parte vengono descritte le caratteristiche metodologiche e tecnico-operative e le relative problematiche delle due tipologie di rilievo.

La terza parte è incentrata, attraverso l'illustrazione dei casi studio selezionati, sul problema della rappresentazione bidimensionale vettoriale e raster.

La quarta parte, invece, tratta la rappresentazione tridimensionale, offrendo un quadro generale delle possibilità offerte dalle moderne tecnologie per la rappresentazione tridimensionale fotorealistica, generata a partire sia da dati fotogrammetrici, sia da dati laser, in maniera diretta e in maniera indiretta attraverso la modellazione nurbs.

La parte finale della tesi riguarda l'output ed in particolare l'archiviazione e la sistematizzazione dei dati acquisiti ed elaborati, per eventuali ulteriori utilizzi.

In questa ultima parte viene trattata la problematica dell'archiviazione in funzione della fruizione del dato metrico.

1.3 Descrizione dei casi di studio affrontati

La necessità di disporre di beni reali su cui sperimentare le tecniche e tecnologie oggetto della presente tesi, è nata dalla natura stessa della ricerca descritta, che è prettamente applicata; è però importante sottolineare che a loro volta, le problematiche caratteristiche di ogni caso affrontato, hanno spinto all'esigenza di trovare soluzioni specifiche, che hanno indirizzato e in qualche modo definito la ricerca stessa, portandola verso le tematiche approfondite.

I casi di studio, facenti parte di ben più ampi Progetti di Ricerca che interessano il Dipartimento di Architettura di Firenze in collaborazione con diverse università nazionali ed internazionali, vengono qui brevemente descritti:

Il sito UNESCO di Masada, Israele

Il progetto di documentazione del sito di Masada è un progetto interuniversitario sviluppato all'interno di accordi internazionali tra il Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze, il Dipartimento di Architettura e Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Pavia e il Department of Interior Building and Environment Design of Shenkar College of Design and Engineering di Ramat Gan, Israele.

Il progetto, che consiste in una proposta di documentazione digitale del sito archeologico di Masada iscritto dal 2001 nella Lista del Patrimonio Mondiale, è diretto da Stefano Bertocci, Sandro Parrinello e Rebeka Vital. Il sito di Masada, individuato da un viaggiatore nel 1828 sugli aspri rilievi che si innalzano ad Est del Mar Morto, nella Giudea sud-orientale, si trova attualmente in territorio israeliano a circa cento chilometri a sud-est di Gerusalemme e fu oggetto di studi da parte del grande specialista Schülte nel 1933; la grande fortezza venne meglio identificata e studiata dopo i primi sca-

vi realizzati dal 1963 al 1965 dalla missione guidata dall'archeologo israeliano Yigael Yadin. Dal 1966 Masada ed il suo territorio divenne un'area protetta dal Ministero delle Antichità e dal 1998 fu protetta come National Parks, Nature Reserves, National Sites and Memorial Sites.

Sulla sommità del rilievo, ad una altezza di circa quattrocento metri al di sopra della depressione del Mar Morto, si estende un pianoro della superficie di circa una decina di ettari. Questo pianoro sommitale appare recinto da una singolare cortina muraria che sviluppa circa 1.300 metri, costituita da un doppio muro, composto dalla cortina esterna con torri di rinforzo e da un muro interno, collegati da murature trasversali disposte in maniera tale da formare una serie di vani comunicanti (sistema definito casamatta) una volta destinati a depositi, arsenali ed anche ad abitazioni. All'interno del recinto fortificato appare ben evidente, nella zona Nord, un articolato complesso di costruzioni: emergono i complessi dei magazzini, costituiti da due serie di fabbricati composti da lunghi vani (lunghi dai 20 ai 27 metri) articolati secondo una semplice viabilità interna, e grandi residenze articolate attorno a cortili, fra i quali emerge il cosiddetto Palazzo di Erode, risalente al I secolo a. C., un singolare complesso monumentale articolato su tre terrazze del banco roccioso, sospese sul deserto con una incomparabile veduta del Mar Morto. All'interno del grande complesso vi è anche un edificio termale articolato in vari ambienti (oggi in buona parte restaurati) aperti su di una corte, con piscina e cisterne. Un ulteriore complesso palaziale con varie residenze occupa la parte sud occidentale del recinto fortificato ed appare composto da vari ambienti articolati attorno a cortili con singolari lunghi atrii di ingresso. Nella parte centrale dell'area vi sono i resti di un edificio di epoca bizantina, con una chiesa

a pianta centrale, che testimonia l'occupazione del sito perlomeno fino a tale periodo. Molto interessanti e sufficientemente ben conservati appaiono anche i resti del grandioso apparato di assedio realizzato dai romani fra il 72 ed il 73 d. C. costituito da un muro (circonvalazione) che circonda tutto il rilievo di Masada, rafforzato dalla presenza di ben otto campi militari fortificati con il tradizionale impianto quadrilatero. Fra le opere di assedio il resto più impressionante è costituito dalla rampa artificiale, realizzata in terra ed armata con strutture lignee (delle quali ancora rimangono tracce), che funzionava da piano inclinato per raggiungere le mura sulla cima del rilievo roccioso con una gigantesca torre d'assedio, resa famosa dagli scritti di Giuseppe Flavio. Lo straordinario stato di conservazione dell'intero complesso costituito dalla fortezza e dal territorio circostante con i resti delle opere di assedio ha fatto sì che tutta l'area venisse ritenuta di grande interesse e venisse dichiarata Patrimonio dell'umanità dall'UNESCO.

Divenuta sito protetto dall'UNESCO nel 2000, oggi è un grande parco archeologico aperto ai visitatori, uno dei più visitati di Israele.

Il sito UNESCO di Villa Adriana, Tivoli, Italia

Il complesso architettonico del Ninfeo di Palazzo e dei grandi ambienti attigui, disposto all'interno del sito archeologico di Villa Adriana, ha costituito la prima tappa sperimentale del progetto di documentazione digitale attualmente in corso, che vede coinvolte le Università di Firenze, Bologna e Pavia.

Villa Adriana è stata costruita tra il 118 e 138 d.C. dall'Imperatore Adriano (Publius Aelius Hadrianus). La Villa si distribuì su un'area di almeno 120 ettari, su un pianoro tufaceo compreso tra due fossi, quello dell'acqua Ferrata ad est e quello di Risicoli o Rocca Bruna ad ovest.

Per realizzare un complesso così grandioso Adriano decise di spostare la propria residenza fuori della capitale, scegliendo un territorio verde e ricco di acque, nei pressi di Tivoli, a 28 km da Roma, sui banchi tufacei che si allargano ai piedi dei Monti Tiburtini.

La Villa comprende edifici residenziali, terme, ninfei, padiglioni, giardini che si alternano secondo una distribuzione del tutto inusuale, che non rispecchia la consueta sequenza di ville e domus, anche imperiali.

I vari edifici erano collegati fra loro, oltre che da percorsi di superficie, anche da una rete viaria sotterranea carrabile e pedonale per i servizi.

Nel 1999 Villa Adriana è stata dichiarata Patrimonio dell'Umanità dall'Unesco.

Il centro storico, sito UNESCO, di Acre, Israele

Le esperienze di rilievo di alcune strutture del centro medievale di Acre, rientrano nel progetto di documentazione e valorizzazione delle architetture crociate in Medio Oriente.

Il centro storico di Acre, nominato patrimonio dell'umanità dall'UNESCO nel 2001, è caratterizzato dall'essere una città fortificata, risalente al XVIII e XIX secolo ottomano, con elementi urbani tipici come la Cittadella, le moschee, il khan e i bagni. I resti della città crociata, risalente 1104-1291, si sono conservati in modo impeccabile, sia sopra che sotto il livello dell'attuale piano stradale, fornendo un quadro eccezionale nello studio della morfologia urbana e delle strutture della capitale medievale del Regno Crociato di Gerusalemme.

La chiesa dei SS. Martiri Donato e Ilarino, all'interno del monastero di Camaldoli, Camaldoli, Italia

Il tema dell'architettura eremitica, che riveste uno straordinario interesse per gli studiosi, non soltanto di architettura, accompagna fin dal Medioevo lo sviluppo della cultura occidentale.

Tra storia e religione questo fenomeno ha lasciato nel tempo una quantità di testimonianze che si sono spesso concretizzate in interventi architettonici di notevole interesse che hanno in qualche modo influenzato e accompagnato, come nel caso del territorio della Toscana, sia lo sviluppo della città che del paesaggio extraurbano, costituendo una maglia insediativa particolarmente importante anche per le aree territoriali

mente più appartate o periferiche, a partire dalle creste dell'Appennino per giungere alle zone più remote della Maremma.

L'architettura monastica, articolata fino dall'Alto Medioevo nelle due grandi esperienze religiose che hanno seguito da un lato la regola cenobitica e dall'altro quella eremitica, si è sviluppata secondo modelli propri, adattati di volta in volta alle singole esperienze ed alle caratteristiche dei luoghi, costituendo tuttavia sempre nuclei di aggregazione di valori ed esperienze non solo religiose, che hanno funzionato da veri e propri centri di aggregazione e produzione culturale nei rispettivi territori.

Sulla base di queste premesse si colloca il filone di ricerca sulle architetture eremitiche toscane, condotto dal Prof. Stefano Bertocci e il Prof. Sandro Parrinello rispettivamente dell'Università di Firenze e dell'Università di Pavia.

La mia personale sperimentazione condotta in questo ambito, riguarda la documentazione della chiesa del monastero di Camaldoli.

Il complesso eremitico di Camaldoli è composto da due grandi strutture architettoniche: il monastero e l'eremo.

Il monastero è concepito non in contrapposizione all'eremo ma in comunione con esso. In quest'ottica di inscindibilità dei due centri religiosi della Comunità Camaldolese a Camaldoli, assimilati ad un unico centro monastico, sia nello spirito, sia nella vita quotidiana e sia nell'amministrazione di essa e del patrimonio terreno, come testimonia il Vasari, nei suoi scritti, che riceve l'incarico dal Superiore (eremita), si colloca lo studio architettonico della Chiesa dei SS. Martiri Donato e Ilarino a Camaldoli.

Attraverso la ricerca di fonti bibliografiche, documentarie ed iconografiche, integrate dalla lettura dell'impianto architettonico e dei resti archeologici, è stato costruito un quadro relativo alla conoscenza dei processi evolutivi del manufatto per giungere ad una visione più chiara del sito, dell'aspetto storico, strutturale e compositivo oltre che pittorico-raffigurativo della chiesa.

Lo studio si è posto l'obiettivo di rintracciare e com-

prendere, nell'impianto architettonico, quelle che sono state le esigenze della comunità cenobitica, che, pur osservando la Regola, in certi momenti ha sentito l'esigenza di riappropriarsi della vocazione eremitica. Per comprendere meglio l'evoluzione delle "quattro chiese" e degli ambienti annessi che si sono sovrapposti dalla prima edificazione sino all'odierna, del diciottesimo secolo, ci si è avvalsi di una rappresentazione grafica di tipo tridimensionale dell'edificio, che si propone come modello descrittivo dell'evoluzione, documentata per fasi cronologiche⁴.

Il centro storico di Montepulciano, Italia

Il progetto di ricerca svolto dal Dipartimento di Architettura di Firenze e dal Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura di Pavia per l'amministrazione di Montepulciano ha avuto come scopo quello di studiare nuove metodologie di analisi e di promozione dell'immagine della città.

La restituzione analitica dei prospetti e dei fronti stradali del centro storico, realizzata in un decennio di analisi nel quale si è svolto lo studio per la pianificazione urbanistica, ha costituito un utile corpus documentario per la realizzazione di un modello tridimensionale della città stessa.

Il modello, che consente un'interazione dinamica con la struttura urbana, è stato realizzato per sviluppare strumenti di valorizzazione delle attività e del patrimonio storico e culturale, attraverso la determinazione di un'interfaccia visuale e di una struttura multimediale interattiva che trasformassero lo stesso modello in un vero e proprio contenitore emozionale.

Note

1. Guidi, Russo, Beraldin 2010;
2. Müller et al. 2006; Yin, Wonka, Razdan 2009;
3. Guidi et al. 2003; Stumpf et al. 2003; El-Hakim et al. 2004; Guarnieri, Remondino, Vettore 2006; Guidi et al. 2009;
4. Bua, Ceccarelli, Parrinello, 2012.





PARTE II

L'ACQUISIZIONE DEL DATO METRICO



Lasers Scanner Laica C10 utilizzato per tre campagne di rilievo del Sito Archeologico di Masada, Israele. Seconda campagna di rilievo Febbraio 2014.

CAPITOLO 2

L'acquisizione del dato metrico: *metodi range based*

I sensori tridimensionali sono strumenti che consentono di generare un'immagine 3D della scena che inquadrano. La classe di sensori trattata in questa tesi è quella basata sull'uso della radiazione luminosa, all'interno della quale si può fare un'ulteriore distinzione in funzione della natura della luce che viene impiegata per effettuare la misura. Se si tratta di luce naturale i metodi di misura si dicono "passivi" (tecnica fotogrammetrica, teodoliti, etc.) che verranno trattati nel capitolo successivo; se invece la luce è codificata in maniera da svolgere un ruolo nel processo di misura, si parla di "sensori attivi" (laser scanner, strumenti a proiezione di luce strutturata, radar, stazioni totali, etc.).

La scelta dei dati da impiegare o della tecnica di rilievo da utilizzare avviene in funzione della caratterizzazione della superficie da rilevare, l'accuratezza e il dettaglio geometrico richiesti, le dimensioni dell'oggetto, la collocazione spaziale, l'esperienza, i costi del progetto, etc. I sensori ottici attivi permettono di ottenere direttamente la posizione spaziale della superficie o del punto rilevato e l'informazione del colore lo strumento è provvisto di fotocamera digitale.

Questa tipologia di strumenti attivi ha il principale pregio di acquisire direttamente e in poco tempo grandi quantità di dati relativi ad una geometria complessa con un'accuratezza molto spinta.

L'insieme di queste caratteristiche rende questa tipologia di strumenti ideale per molte applicazioni, soprattutto nell'ambito dei Beni Culturali, ma non adattabile a tutte le condizioni ambientali e alle caratteristiche materiche dei manufatti.

L'utilizzo di questo genere di strumenti ha raggiunto la sua completa maturità già da diversi anni e il processo di modellazione da dati range-based è oggi ben strutturato e definito¹, nonostante presenti ancora alcuni "colli di bottiglia" legati in particolare alla gestione delle gran-

di quantità di dati acquisiti. Uno strumento attivo che impiega luce laser viene normalmente chiamato range camera o laser scanner 3D. Il principio di funzionamento di una range camera può variare a seconda delle dimensioni dell'oggetto da rilevare e, di conseguenza, a seconda della distanza tra sensore e oggetto (Tabella 1). Per volumi inferiori al metro cubo, gli scanner si basano sul principio di misura della triangolazione; per volumi di dimensioni superiori si utilizzano sensori detti a tempo di volo o Time of Flight (TOF). Tra i sensori attivi vanno anche ricordati i radar (strumenti montati su piattaforme aeree o terrestri, che acquisiscono immagini e consentono di rilevare informazioni 3D attraverso processi di interferometria), il GPS e le stazioni totali (strumenti in grado di restituire puntualmente coordinate e posizioni nello spazio).

Rilievo archeologico	Oggetti da rilevare	Dati e tecniche di rilievo
Scala regionale	Territorio Topografia Sito	Immagini satellitari, Immagini aeree a piccola scala, Radar, Lidar, GPS
Scala locale	Sito Architetture Scavo Strati	Immagini satellitari ad alta risoluzione Immagini aeree a grande scala Radar, Lidar Laser scanner TOF/CW Immagini terrestri Stazione totale, GPS
Scala oggetto	Ritrovamenti Oggetti museali	Immagini terrestri Laser scanner a triangolazione Sistemi a luce strutturata

Tabella 1. Scale di lavoro archeologiche e possibili dati o tecniche per il rilievo 3D digitale e non invasivo.

2.1 Breve storia dei sistemi a sensori attivi

Fra tutti i sistemi che realizzano ricostruzioni tridimensionali di oggetti, i sensori attivi, come ad esempio il laser a scansione, fanno parte del gruppo di sistemi basati su una vera e propria attività di rilievo, contrapponendosi in modo netto ai software di Computer Animation (Cinema 4D, 3D Studio Max, Zbrush) che invece non utilizzano misure sull'oggetto.

Basati sulle onde luminose come i metodi image based, i sensori attivi realizzano come risultato diretto della sessione di misura un insieme di coordinate tridimensionali riferite ad un numero elevatissimo di punti in un sistema di riferimento correlato con lo strumento.

Le applicazioni di questi sistemi sono ampissime e spaziano dall'industria (progettazione di pezzi meccanici, controllo della qualità, sviluppo di prototipi, video games, automazione, monitoraggio del traffico) al campo della modellazione del corpo umano, trovando sempre di più largo utilizzo nell'ambito dell'Architettura e dei Beni Culturali.

La diffusione delle tecniche laser a scansione nel rilievo dei Beni Culturali è abbastanza recente e certamente è una delle tecnologie in più grande espansione; in questo caso non è il principio alla base del metodo ad essere nuovo, infatti la misura di distanza tramite triangolazione è vecchia di secoli, i Greci la utilizzavano per la navigazione e per gli studi astronomici, ma lo sviluppo pratico di questi sistemi segue da vicino la disponibilità di nuovi componenti, tecnologie e dispositivi.

Ciò che era pratica comune per i militari durante le due guerre mondiali, cioè la misura passiva di distanza tramite dispositivi ottici, è potuta diventare disponibile anche per i laboratori di ricerca prima e per gli utilizzatori poi, solo a partire dagli anni '80, con la disponibilità di dispositivi elettro – ottici e computer a relativamente basso costo; già negli anni '70 in molti

importanti laboratori scientifici statunitensi e canadesi sono noti i principi di funzionamento dei laser a proiezione di luce, e negli anni '80 il National Research Council (NRC) del Canada inizia uno studio approfondito sul mondo della tridimensionalità, focalizzando l'attenzione sullo sviluppo di sistemi a sensori attivi basati sul principio della triangolazione.

Il limite più grosso all'utilizzo pratico di questi sistemi è dovuto però al fatto che i dispositivi sensibili alla posizione erano ancora analogici: il sistema basato sulla Lateral Effect Photodiode (LEP) e la camera tipo Vidicon era utilizzato per convertire l'informazione ottica in un segnale elettrico allo scopo di estrarre informazioni sulla distanza, ma l'accuratezza raggiungibile con questi sistemi era limitata e la tecnologia difficile da usare e da calibrare.

L'avvento della tecnologia digitale ha costituito il vero spartiacque fra la sterile ricerca ed il reale utilizzo di questi sistemi; il primo prototipo di laser a triangolazione con tecnologia digitale sviluppato dal NRC utilizzava un sensore CCD a linea formato da 2048 elementi; i laser sono così diventati sempre più accurati nella misura di distanza, che è passata ad essere prima di uno poi di due ordini di grandezza più precisa rispetto ai sistemi analogici, veloci nell'acquisizione, relativamente economici; gli ultimi sviluppi nella tecnologia hanno in seguito riguardato la nascita dei laser basati sulla misura del tempo di volo, la ricerca di sistemi che fossero sicuri per l'occhio umano e per i materiali rilevati, l'introduzione di laser accoppiati a camere digitali e termiche; di pari passo si sono sviluppati i software per il trattamento dei dati.

Il termine L.A.S.E.R. è l'acronimo di Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation e si riferisce direttamente al principio di generazione del raggio laser.

La luce che è possibile osservare in natura è costituita da fotoni emessi spontaneamente dagli atomi.

Un atomo è composto da un nucleo che contiene protoni e da elettroni che ruotano attorno al nucleo stesso e che possono occupare solamente alcuni orbitali (posizioni). Quando viene aggiunta energia ad un atomo, gli elettroni si spostano, "saltano", in un orbitale più lontano rispetto al nucleo, in modo che il numero di elettroni che si muove e quale orbitale occuperanno dipende dalla quantità di energia applicata; fotoni di diverse lunghezze d'onda trasportano quantità di energia differenti: in modo particolare, minore è la lunghezza d'onda, maggiore sarà la quantità di energia trasportata.

Di conseguenza la lunghezza d'onda della luce emessa da un atomo dipende dalla quantità di energia associata con ogni possibile salto di elettrone. L'emissione luminosa indotta ha la stessa lunghezza d'onda e la medesima fase del fotone che l'ha generata, in altre parole, il fotone che colpisce l'atomo genera l'emissione di un secondo fotone ad esso identico. Il nuovo fotone colpirà un altro atomo eccitato causando l'emissione di un secondo fotone e così via; ciò che si ottiene è quindi una cascata di emissioni stimolate, cui si dà il nome di laser.

Come si può facilmente intuire, solo una porzione dei fotoni del fascio stimolante trasporta una quantità di energia tale da poter dare avvio all'effetto a cascata, mentre i fotoni rimanenti vengono assorbiti o convertiti in altre forme di energia, di solito in calore. La porzione di fotoni che ha le caratteristiche adeguate per dare avvio all'emissione di luce è strettamente correlata all'efficienza del laser.

Ciò che costituisce il laser è dunque energia elettromagnetica, come la luce naturale, ma mentre in questa i fotoni vengono emessi in tutte le direzioni e con lunghezze d'onda diverse, nel laser la luce è usualmente monocromatica, consistente cioè di una singola lunghezza d'onda, ed emessa con un raggio molto ristretto.

Il mezzo che viene eccitato e libera i fotoni che formano il raggio laser, può essere la combinazione di due o più elementi, come elio e neon.

La consistenza dell'effetto a cascata cresce con la distanza che la luce percorre attraverso il mezzo del laser, per questo motivo il materiale di supporto è costituito da una barra allungata attraverso cui viene emessa la luce. Inoltre per incrementare l'intensità del raggio vengono posizionati due specchi alle estremità della barra, in questo modo la luce è costretta a percorrere più volte la barra, incrementando la distanza percorsa prima di lasciare la barra stessa.

L'oscillazione della luce attraverso la cavità del laser causa la formazione di un fascio laser ristretto. Il raggio del fascio dipende dalla distanza percorsa dalla luce attraverso il mezzo.

Gli specchi utilizzati nella cavità sono funzione dalla lunghezza d'onda del raggio laser e, in generale, lo specchio alla fine della barra è tale da riflettere completamente la luce incidente, mentre lo specchio frontale consente di riflettere solo una porzione della luce e di emettere l'altra parte. Entrambi gli specchi sono di solito curvi per meglio concentrare il raggio laser.

Per quanto riguarda le caratteristiche del raggio laser si può dire che la distribuzione d'intensità della luce non è uniforme nella sezione del laser, ma è tipicamente maggiore al centro.

Un'altra caratteristica del fascio è la divergenza, cioè l'ampliarsi della sezione mentre il raggio si allontana dalla cavità in cui viene generato, con l'angolo di divergenza f dipendente dalla lunghezza d'onda del laser emesso l , dal diametro alla sorgente D e dalla distribuzione d'intensità.

Riguardo alla lunghezza d'onda, infine, sono molti i fattori che influenzano questa caratteristica del raggio laser; in primo luogo il tipo di materiale utilizzato nella cavità, poi il metodo utilizzato per ottenere l'eccitazione degli atomi ed infine le caratteristiche dell'ottica utilizzata.

2.2 Sistemi distanziometrici

I sistemi distanziometrici sono strumenti nati all'incirca venti anni fa per il rilievo di siti industriali, che attualmente stanno trovando un impiego anche nel rilievo dell'architettura tradizionale e nei Beni Culturali come chiese e castelli.

Questi strumenti sono di due tipologie e operano con principi di funzionamento molto diversi, ma che per l'utilizzatore presentano caratteristiche analoghe: gli scanner che operano con differenza di fase e con tempo di volo.

Entrambi sono detti distanziometrici in quanto come risultato della misura si ha la distanza fra il centro dello strumento e il primo punto che il raggio incontra; la distanza, insieme alla conoscenza dei due angoli di emissione del raggio, consente di determinare per coordinate polari la posizione del punto in questione.

I sistemi laser che utilizzano la differenza di fase sono caratterizzati da un'elevata densità di punti acquisiti e velocità di acquisizione, all'incirca 625.000 punti al secondo. Operano in un range massimo di 100 m e con un'accuratezza che va dai 25 μm al centimetro. L'approccio di questo tipo di strumenti consiste nell'acquisire ogni particolare con la stessa risoluzione ed eventualmente sfoltire i punti nella fase di post-processo; l'elevata risoluzione consente di paragonarli ad un'immagine fotografica panoramica.

Gli scanner che operano con differenza di fase utilizzano un raggio laser, modulato con un'onda armonica, per scansionare lo spazio punto per punto e calcolano la distanza del punto dal centro dello strumento mediante un circuito che determina la differenza di fase tra l'impulso emesso e quello riflesso e di conseguenza il tempo necessario all'onda per percorrere la distanza da calcolare.

L'elaborazione di questo dato è piuttosto complessa, motivo per cui il tempo richiesto per il calcolo è mag-



Laser Scanner Z+F 5010 utilizzato per le campagne di rilievo del Sito Archeologico di Villa Adriana, Tivoli (Roma). Prima campagna di rilievo Aprile 2013.

giore rispetto ad altri sistemi, ma consente di ottenere precisioni migliori. Un limite di questo principio è la necessità di avere un segnale di ritorno che sia dotato di adeguata potenza, con conseguente riduzione della portata dello strumento e la possibilità di avere, all'interno della griglia di acquisizione, un numero consistente di punti non definiti.

Negli scanners TOF (Time Of Flight), lo strumento è costituito, in linea generale, dai seguenti componenti: un laser, usualmente un semi-conductor laser, che emette impulsi di luce infrarossa, indirizzati e convogliati da una lente di emissione; un sistema di specchi rotanti, necessari per deflettere il raggio; una lente di ricezione che capta la parte del segnale di eco del raggio laser riflesso dalla superficie di impatto dell'oggetto; un diodo ricevitore chiamato a valanghe (a valanga, poiché indica un processo cumulativo in cui un elettro-

ne che si muove velocemente ne genera rapidamente degli altri per collisione) che produce un segnale di ricezione elettrico; un orologio stabilizzato al quarzo, che misura l'intervallo di tempo tra segnale emesso e riflesso.

Questi sistemi sono meno accurati dei precedenti (precisione da alcuni mm ad un paio di cm ed oltre), ma offrono il vantaggio di operare in un range più ampio, sino ai 1500 metri ed hanno una velocità di acquisizione dei punti elevata (all'incirca 12.000 punti al secondo).

Questa tipologia di strumenti trova la sua migliore applicazione nel rilievo di oggetti molto grandi, dal momento che riesce a garantire relativa accuratezza nella misura ad un range elevato, accuratezza che rimane relativamente costante per l'intero volume delle misure.



Laser Scanner Laica 6100 utilizzato per la campagna di rilievo della Chiesa dei SS. Martiri Donato e Ilarino del Monastero Camaldolese di Camaldoli (AR)



Laser Scanner Nextergine Desktop 3D scanner, modello 2020 utilizzato per la campagna di rilievo di alcuni reperti archeologici di Villa Adriana a Tivoli (ROMA), realizzata nel 2013.

2.3 Accuratezza dei sistemi laser scanner

Quando si parla di accuratezza di un sistema laser a scansione è necessario parlare di ripetibilità, in quanto la valutazione dell'accuratezza non può prescindere dalla constatazione che uno strumento di questo tipo rileva l'oggetto per punti singoli, ma nell'unione di più scansioni difficilmente si può ottenere più volte la misura del medesimo punto.

Ciò che si ottiene è quindi una ridondanza nella misura di una superficie, ma non nella misura del singolo punto. Per questo motivo ogni punto ha solo un valore di precisione determinato dalla propagazione degli errori di misura dell'angolo, della distanza e degli altri parametri che influenzano la singola misura.

I costruttori di laser scanner forniscono delle specifiche di accuratezza che non sono tra loro confrontabili, poiché vengono riferite ai propri test di laboratorio. Per questo motivo è molto difficile fondare la scelta di uno strumento su questo parametro.

Negli anni, alcuni autori [Böhler 2001; Blais, 2003] hanno proposto e talvolta realizzato dei test di controllo ad hoc per poter confrontare numericamente l'accuratezza dei diversi strumenti tra loro, introducendo anche alcune formule per la valutazione della precisione degli strumenti; è necessario tenere in considerazione che strumenti operanti con principi di funzionamento diversi hanno ambiti applicativi spesso non confrontabili tra loro e le formule utilizzate per la valutazione dell'accuratezza sono funzione del metodo utilizzato per effettuare la misura.

Un altro fattore che influenza l'accuratezza è la divergenza del raggio laser, che è proporzionale alla distanza percorsa dal raggio stesso. L'espansione del raggio laser viene considerata lineare per grandi distanze, perciò spesso la divergenza viene indicata in termini di diametro iniziale cui viene sommato un fattore di espansione lineare espresso generalmente in mrad.

È importante sottolineare come, nonostante siano sempre di più le applicazioni di questi sistemi, non esista ancora una ben precisa standardizzazione delle procedure che determinino in modo univoco e confrontabile le caratteristiche dei sistemi in commercio per i vari campi di utilizzo.

L'effetto del laser sugli spigoli è un problema che può causare errori il cui ordine di grandezza varia dal millimetro a svariati decimetri ed è inevitabile, a meno che la dimensione dell'impronta del laser non venga settata sulla dimensione del punto da rilevare.

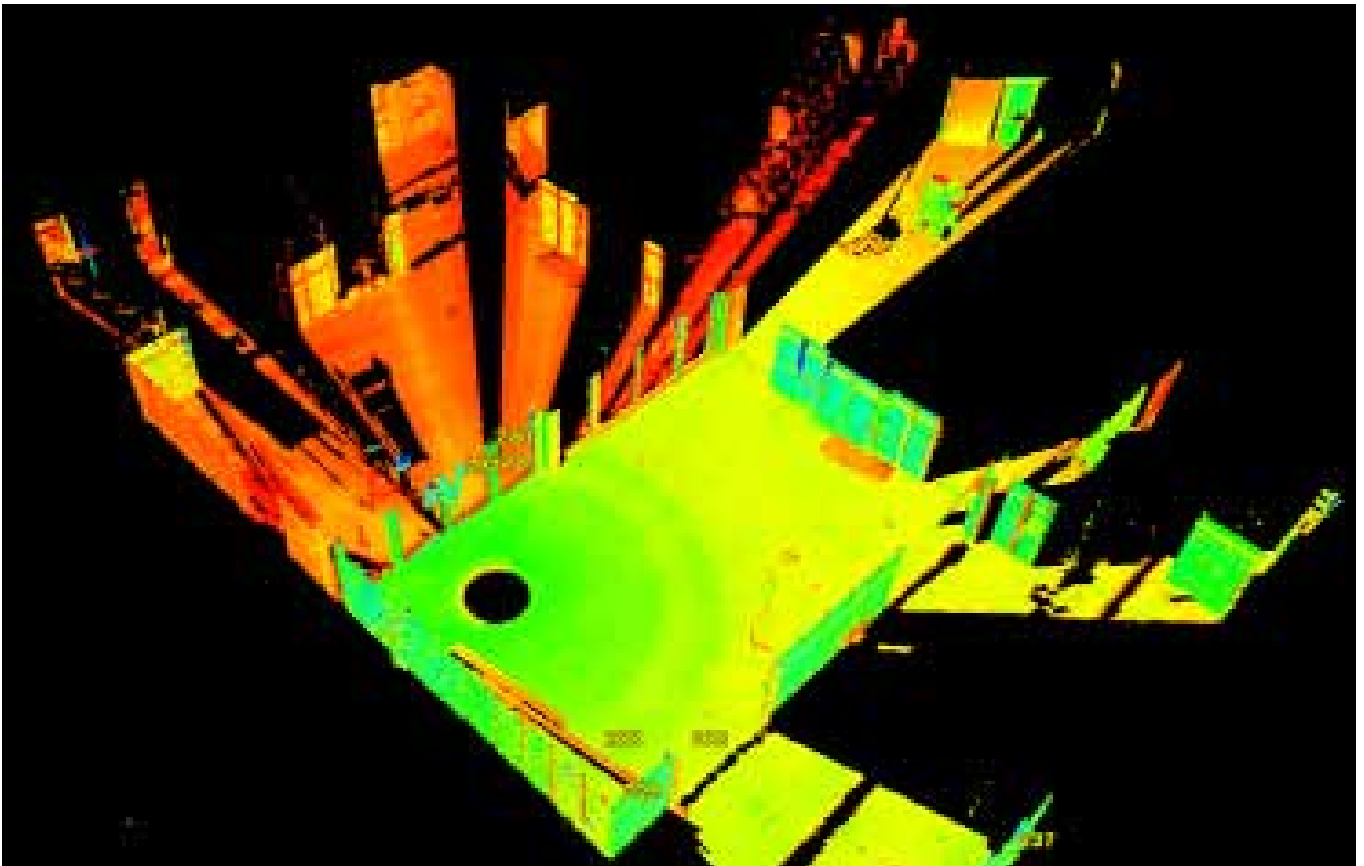
I sistemi laser scanner dipendono dal segnale riflesso dalla superficie dell'oggetto all'unità ricevente nel



Rilievo di una porzione di reperto archeologico di Villa Adriana. Nell'immagine è visibile il raggio laser che colpisce la superficie dell'oggetto.

caso siano distanziometrici, oppure alla camera nel caso di scanner triangolatori. In entrambi i casi l'intensità del segnale riflesso è influenzata tra i tanti fattori (distanza, condizioni atmosferiche, angolo di incidenza del raggio), ma anche dalla capacità riflessiva dell'oggetto. Le superfici bianche producono una forte riflessione, mentre le superfici nere riflettono debolmente il raggio; l'effetto delle superfici colorate dipende fortemente dalle caratteristiche del laser, mentre le superfici lucide sono di solito difficili da rilevare. È stato osservato che superfici costituite da materiali con differente riflettività causano errori sistematici nella distanza.

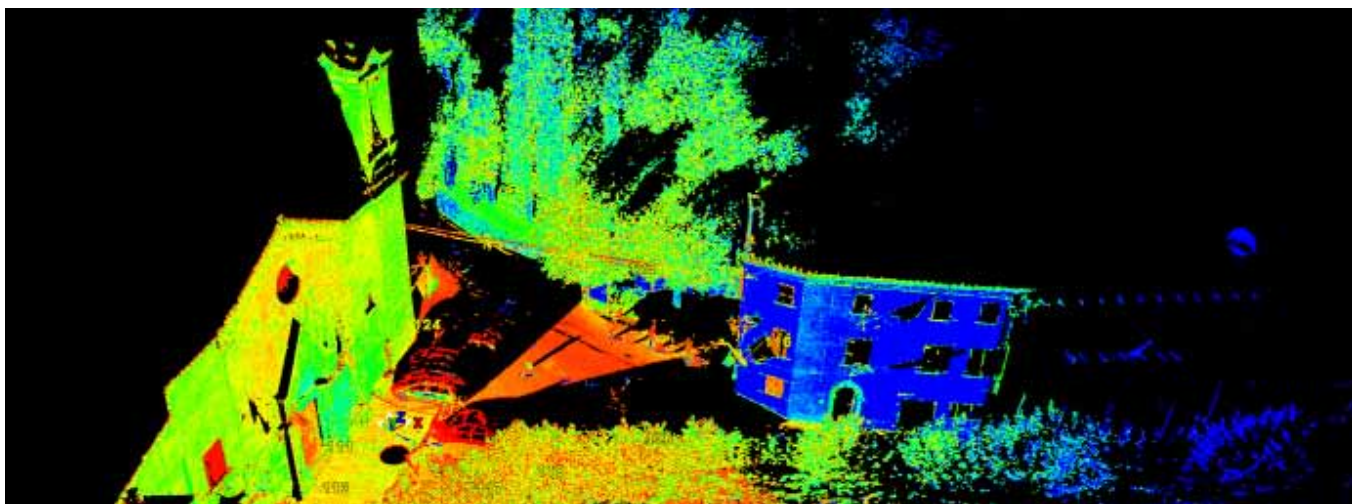
Per alcuni materiali questi errori possono raggiungere valori molto superiori alla deviazione standard della singola misura, per questo motivo sono stati costruiti scanner dotati di dispositivi di apertura regolabili, che presentano solamente errori nei primi punti scannerizzati: dopo che il laser ha raggiunto un'area con riflettività molto diversa dalla precedente, viene applicata in modo automatico una correzione nella misura della distanza, raggiungibile solo dopo che alcune misure sono già state effettuate. Per oggetti costituiti da materiali differenti o dotati di colorazione diversa, l'operatore deve aspettarsi errori consistenti.



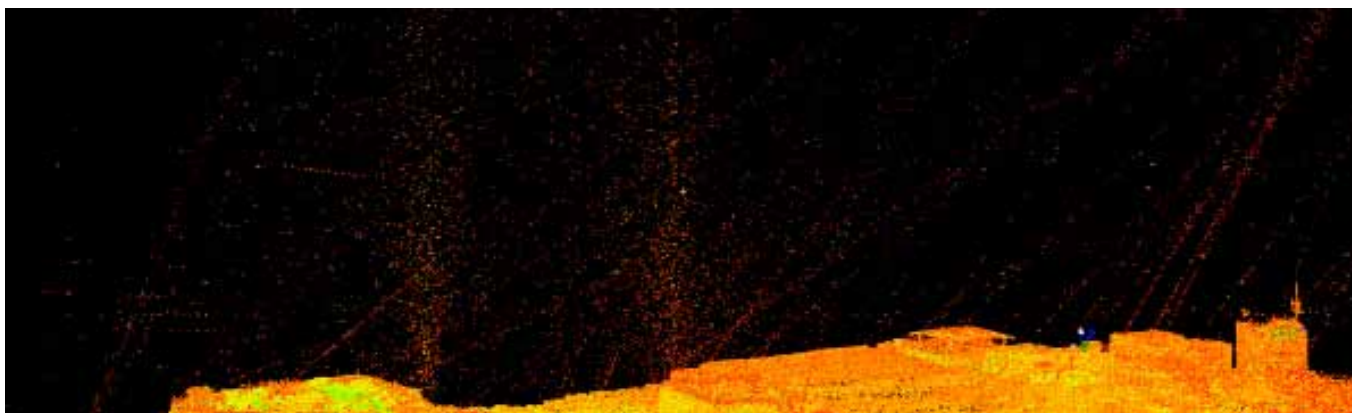
Nell'immagine le vetrate del vano rilevato, provocano una duplicazione esatta dell'ambiente stesso, verso l'esterno. Questo errore è dato dalla composizione del materiale, che risulta molto riflettente (vetro riflettente a controllo solare), in quanto in fase di realizzazione del vetro, è stato depositato uno strato di ossidi di metalli.

Anche le condizioni ambientali possono modificare la precisione di un rilievo. Infatti ogni scanner funziona correttamente solo in un certo range di temperatura ed anche all'interno di questo intervallo si possono osservare errori, soprattutto nella misura della distanza. Inoltre è necessario considerare che la temperatura interna allo scanner è sicuramente molto superiore a quella ambientale, sia per effetto della radiazione del sole sia per il calore che lo strumento sviluppa al suo

interno. Per quanto riguarda le condizioni atmosferiche è stato rilevato che sino a che vengono misurate distanze brevi, la propagazione del laser non risente dei cambiamenti di pressione e temperatura, mentre un effetto simile a quello causato dagli spigoli viene rilevato in presenza di pulviscolo o vapore. Infine, in presenza di pioggia dato metrico rilevato, si può considerare inaffidabile.



Nell'immagine si può notare la proiezione nello spazio di un segnale stradale, infatti, il materiale catarifrangente crea dei disturbi al raggio laser.



Nell'immagine la presenza di particelle d'acqua, anche in piccolissima quantità, crea un disturbo, che in fase di post acquisizione andrà rimosso manualmente dall'operatore.

2.4 Considerazioni pratiche e operative sulle procedure di acquisizione del dato metrico: il rilievo del sito archeologico di Masada

Il primo passo nell'impostare un rilievo con laser scanner terrestre (Terrestrial Laser Scanner, TLS) consiste nella scelta del tipo di strumento; in un rilievo di tipo architettonico, si dovranno valutare la precisione richiesta, che a sua volta sarà determinata dalle dimensioni e dalla forma dell'oggetto.

Nonostante la possibilità di suddividere gli scanner secondo la loro portata, non esiste un criterio unico nella

scelta del tipo di strumento, ma è necessario tenere in considerazione diverse caratteristiche operative, tra le quali assumono grande importanza, oltre alle inderogabili considerazioni riguardanti precisione e portata, anche parametri quali la velocità d'acquisizione, la risoluzione di scansione, la divergenza del raggio laser, la reale portata dello strumento in relazione ai materiali da cui è formato l'oggetto, il campo di misura,



Il sito UNESCO di Masada (Israele), in una vista dall'alto.

la possibilità di riconoscere automaticamente target e punti pre – segnalizzati, la presenza di sensori RGB accoppiati, l'autonomia operativa, e non ultimo il software necessario per il controllo dell'operazione di rilievo e per la gestione della nuvola di punti.

Effettuata la scelta dello strumento, è necessario compiere un'analisi preliminare dell'oggetto, in modo da stabilire quanti e quali saranno i punti di acquisizione al fine del rilievo completo dell'oggetto, senza buchi e zone nascoste.

Appare importante dunque per questi strumenti la considerazione che, mentre nel rilievo di tipo tradizionale l'accuratezza è il parametro predominante, in un rilie-

vo con la tecnica laser scanner è necessario considerare anche altre caratteristiche, che possono influenzare, a volte anche in modo determinante, la realizzazione e la precisione del rilievo stesso².

In particolare in ambito architettonico e nel rilievo dei Beni Culturali, è spesso necessario unire alla descrizione della forma geometrica anche la descrizione materica dell'oggetto. In tal caso l'immagine fotografica rappresenta la miglior risposta a questa necessità, per questo motivo, alcuni strumenti TLS sono stati dotati di camere RGB calibrate ed in posizione nota rispetto allo strumento, mediante le quali è possibile ottenere un modello fotorealistico.



La personificazione di Architettura, seduta sui resti di una perduta costruzione della quale rimangono solo frammenti di modanature e capitelli, indica ad un bambino impegnato a seguire la direzione della sua mano la capanna vitruviana.

Oltre alle considerazioni già fatte occorre considerare altri fattori, come la trasportabilità e l'autonomia di alimentazione dello strumento. Dal momento che spesso è necessario compiere spostamenti anche con mezzi di trasporto diversi, specialmente per il monitoraggio di Beni Culturali, lo strumento deve essere dotato di un contenitore in grado di proteggerlo sia

meccanicamente sia termicamente durante il trasporto. Inoltre il rilievo avviene sovente in luoghi in cui non è disponibile una rete di alimentazione elettrica, pertanto gli scanner devono essere dotati di batterie in grado di fornire autonomia sufficiente per l'intera durata del rilievo.



Nelle immagini alcune delle porzioni più rappresentative il sito archeologico di Masada, dal quale si evince la sua complessità e le notevoli dimensioni, che hanno costretto ad un'attenta progettazione del rilievo, effettuato in tre campagne diverse.

2.4.1 Attività di acquisizione dati

Il rilevamento delle strutture murarie presenti sull'altopiano del sasso di Masada è stato condotto secondo un principio di integrazione dei dati tra metodologie tradizionali di rilievo diretto e tecniche strumentali, tramite sistemi topografici e Laser Scanner³.

Il Laser Scanner terrestre è uno strumento di natura topografica che permette di acquisire una grande quantità di coordinate spaziali in breve tempo.

E' possibile rilevare completamente le superfici visibili di un determinato contesto o oggetto architettonico attraverso operazioni relativamente rapide che permettono di rimandare l'elaborazione dei dati acquisiti strumentalmente ed archiviati nella memoria di un computer, ad una fase successiva alla fase di campagna realizzata in loco, compresa l'estrazione degli elementi caratteristici e la riduzione del rilievo laser ad elementi classificabili e rappresentabili attraverso il disegno e la modellazione bidimensionale o tridimensionale.

I vantaggi del rilievo laser sono dunque:

- riduzione dei tempi di acquisizione in campagna (importante per l'esecuzione di lavori in ambienti definiti da un clima particolarmente temperato come quello del deserto e vincolati a contesti con specifiche esigenze di fruizione come si sono dimostrate alcune zone del sito, soggette ad una notevole affluenza turistica);
- rilevamento di geometrie complesse (necessario per lo studio delle modanature e degli elementi decorativi, oltre che per comprendere la composizione stessa di ciascuna muratura).

Le scansioni laser sono state effettuate combinando due scanner laser a tempo di volo modello Leica Geosystems C10, utilizzando, per il riferimento nelle coordinate relative delle singole nuvole di punti target piani ad alta riflettanza.

Lo scanner Leica C10 si compone di un generatore di

raggio laser, uno specchio rotante sul suo asse orizzontale e un supporto meccanico che consente la rotazione intorno all'asse verticale. Tali ingranaggi consentono una rotazione di 360° sul piano xy e di 270° rispetto alle verticali, lasciando non scansionata un'area coniforme che si estende dal centro dello strumento verso il basso sino ad un raggio, variabile a seconda dell'altezza a cui viene posizionato il cavalletto, di circa 1m. La posizione di ogni singolo punto è calcolata misurando l'angolo di incidenza ed il tempo di volo del raggio, valori utilizzati per calcolare le coordinate nello spazio di ciascun punto rilevato rispetto ad un'origine del sistema di riferimento, posizionato al centro dello scanner. Lo strumento è in grado di raccogliere sino a 50.000 punti per secondo, con un'ampiezza di raggio visivo variabile tra i 200 e i 300 m a seconda della riflettanza dell'oggetto scansionato.

Una scansione rappresenta però soltanto un punto di vista, pertanto per ottenere una ricostruzione tridimensionale sono necessarie diverse scansioni da più punti di vista. Inoltre, per poter unire due scansioni, effettuate da due postazioni differenti, è fondamentale disporre di almeno 3 punti omologhi che consentano la sovrapposizione tra le nuvole di punti, bloccando le loro reciproche posizioni nelle tre traslazioni e tre rotazioni nello spazio.

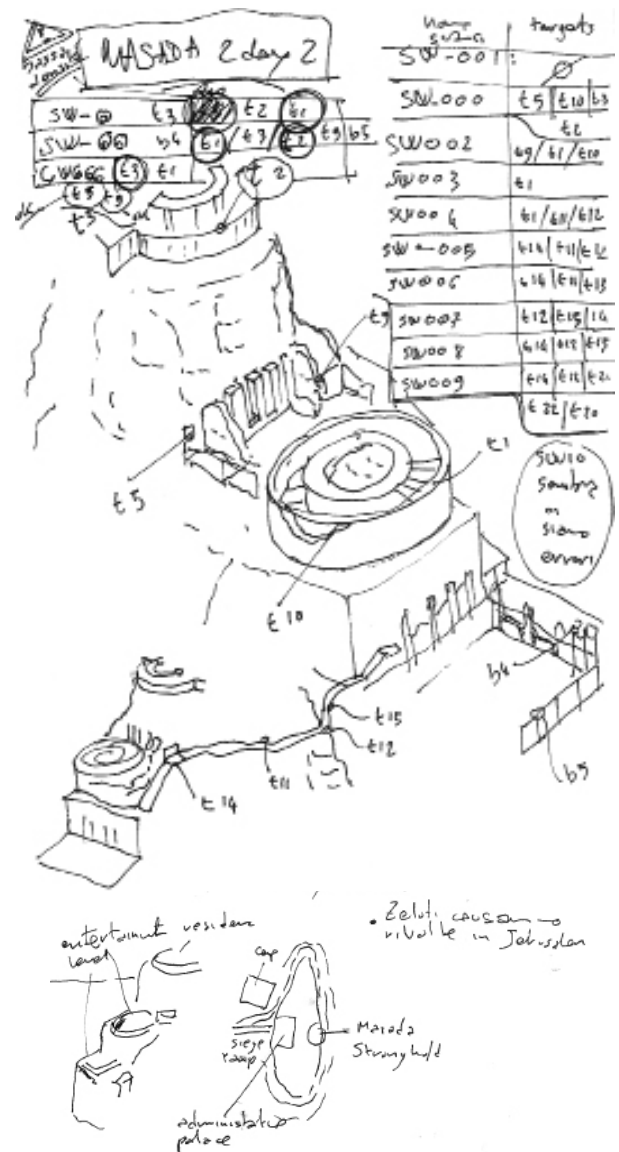
2.4.2 Il progetto di scansione

La prima fase di qualsiasi rilievo è il progetto della campagna di acquisizione per il quale devono essere ben note le finalità del rilievo stesso; nel rilievo scanner laser la questione si concentra però maggiormente sulle esigenze di scansione che riguardano il rapporto tra visibilità degli oggetti in relazione alla distanza dallo strumento.

Preliminarmente alle operazioni di scansione si è proceduto dunque ad una pianificazione del rilievo, effettuata in prima istanza secondo uno schema di intenzioni generali, basato sulla cartografia presente.

Lo schema di lavoro realizzato ha avuto come obiettivo l'individuazione del posizionamento delle stazioni in relazione alla possibilità di costruire una maglia unitaria che inquadrasse il sistema architettonico relazionato alla morfologia del territorio tenendo in considerazione la volontà di acquisire i dati relativi alle superfici degli elementi rilevati ad una determinata scala di dettaglio e precisione, sulla quale agganciare poi scansioni di maggior dettaglio, focalizzate sui singoli elementi decorativi. La pianificazione delle scansioni ha cercato di minimizzare il più possibile il numero di stazioni, cercando di individuare quali viste potessero ottimizzare il tempo di acquisizione e l'accuratezza dei rilievi proposti, assicurando inoltre la presenza tra più scansioni di aree di sovrapposizione, in modo da ricoprire interamente le superfici scansionate.

Questa programmazione di massima è stata confrontata e messa a punto in situ, dove si è provveduto al posizionamento dei target metallici, indispensabili per la successiva fase di registrazione ed unione delle singole scansioni, cercando di disporre i singoli punti di controllo in modo da ottimizzarne il numero complessivo, rendendoli visibili da più scansioni e distribuiti in modo adeguato, evitando di posizionare, ad esempio, i tre target necessari per registrare una scansione,



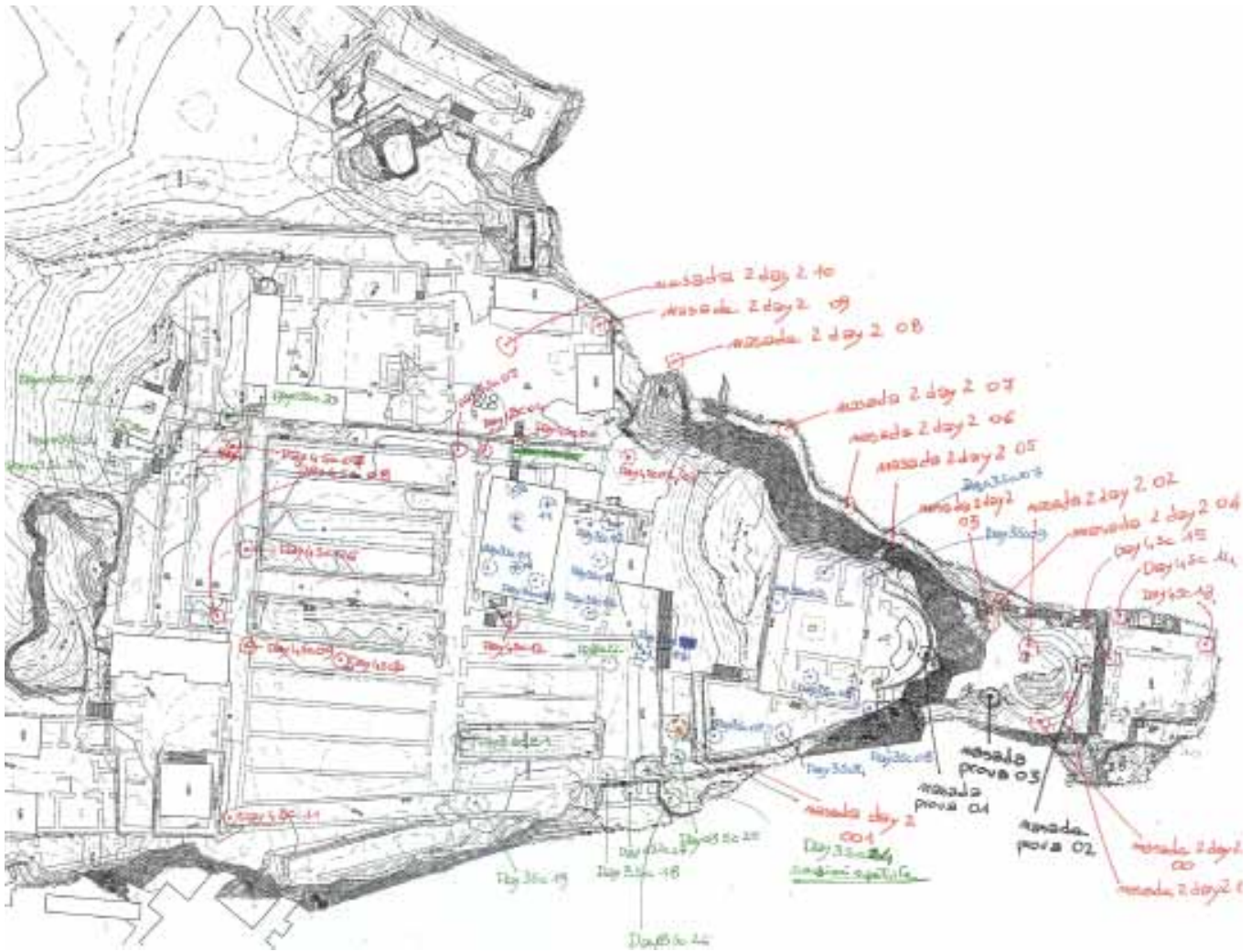
Eidotipo realizzato per la pianificazione della posizione dei target sulle tre terrazze.

allineati rispetto al punto di scansione, circostanza che non consente di effettuare correttamente la rototraslazione della nuvola di punti.

I target sono stati, per quanto possibile, collocati ad una distanza uniforme dallo scanner laser, in modo da essere acquisiti con una risoluzione tra loro omogenea. Un target posizionato molto lontano dallo scanner non può essere scansionato con un numero sufficiente di punti che permettano di determinare il centro con precisione ed un target molto ravvicinato non rispon-

de all'esigenza di una corretta distribuzione dei punti omologhi nello spazio, poiché un errore anche minimo nell'individuazione di tale target può causare errori di posizionamento elevati a grande distanza.

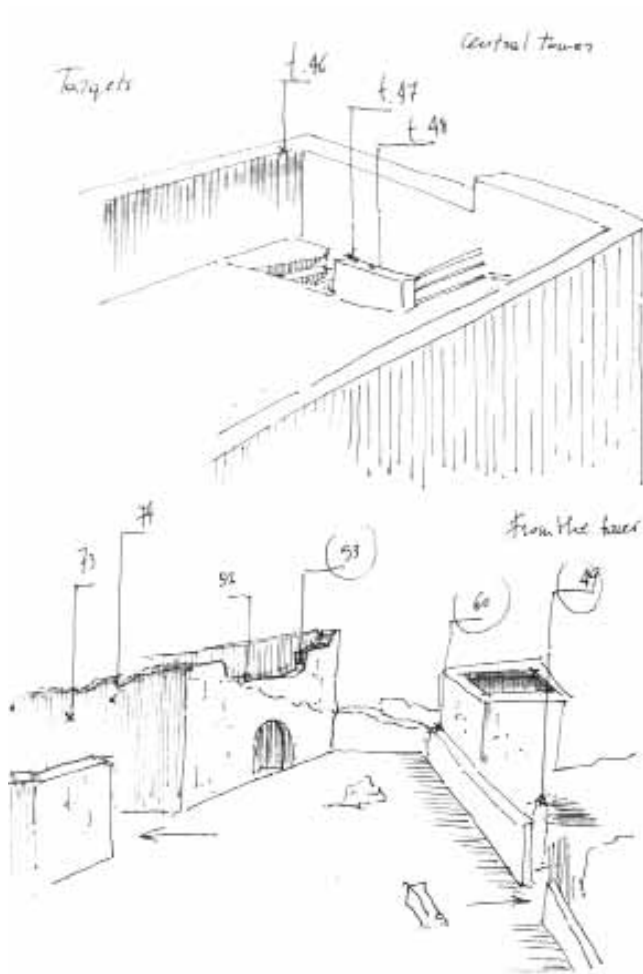
Le specifiche caratteristiche del sito hanno reso complessa questa programmazione, poiché la disposizione per livelli con conseguenti dislivelli notevoli del terreno e la conformazione degli ambienti e delle stanze del palazzo, divise tra loro da muri in elevato anche di notevole dimensioni provocavano con l'ombra evita-



Planimetria della porzione nord dell'altopiano di Masada con annotate le posizioni delle scansioni, effettuate durante la prima campagna di rilevamento.

bili esclusivamente con un numero elevato di scansioni, cambiando più punti di vista, e imponevano alcuni percorsi obbligati nel posizionamento delle stazioni. Per le regole basilari della prospettiva più un oggetto è vicino al centro di proiezione, coincidente in questo caso con la sorgente del raggio laser, più ampio sarà il cono d'ombra che proietterà dietro di sé, pertanto per progettare l'ubicazione di ciascuna scansione è necessario esperire e definire compiutamente lo spazio tridimensionale di ogni ambiente.

Durante l'intera fase di campagna si è inoltre provveduto: a registrare su una mappa cartacea, preparata precedentemente, le posizioni dello scanner durante le varie scansioni, adottando un numero progressivo per ogni punto di scansione; a riportare la posizione dei target, con un'altra serie di numeri progressiva; alla registrazione tabulare dei target rilevati per ogni scansione; a fotografare con la macchina digitale dal punto di scansione tutto l'intorno e la locazione dei singoli target in essa restituiti.



Eidotipi realizzati per l'annotazione della posizione dei target.

2.4.3 La regolazione dello strumento

Le operazioni necessarie per eseguire praticamente un rilievo laser scanner sono: il posizionamento dello strumento sul cavalletto nel luogo ed all'altezza ritenuti più idonei per la scansione;

controllo del livello verificando la bolla delle livelle collocate lateralmente all'apparecchio, per accertarsi di non aver accidentalmente mosso il sostegno in questa operazione.

Dopo l'accensione dello strumento è necessario attendere un tempo variabile intorno ai 2 minuti in cui il congegno interno allo scanner effettua un check programmato, che controlla l'efficienza di tutti gli apparati elettronici, di emissione e ricezione del raggio laser, nonché meccanici, concernenti i meccanismi di rotazione lungo il piano xy dello scanner e di basculaggio degli specchi riflettenti.

Terminata questa prima fase preparatoria lo scanner dopo una rotazione completa di 360°, si posiziona in direzione del punto che considera come suo punto di partenza emettendo un segnale luminoso, spia verde ready, che indica che lo scanner è pronto.

Inserimento dei parametri prescelti che riguardano la definizione di una griglia ideale che intende definire la densità dei punti da rilevare ad una determinata distanza.

Si tratta dell'immissione dei seguenti valori:

- risoluzione, che permette di definire quanti punti riportare in ogni scansione, e quindi la precisione ed il dettaglio desiderato, valore calibrato secondo il rapporto direttamente proporzionale tra distanza e risoluzione, per cui maggiore sarà la distanza media, maggiore dovrà essere la risoluzione impostata e viceversa;

- velocità di scansione, indirettamente proporzionale alla precisione richiesta dalla scansione.

Per garantire una omogeneità in termini di accuratezza

è opportuno posizionare lo scanner ad una distanza mediamente costante rispetto alla parte di interesse da rilevare. Fissato il passo di scansione un oggetto più lontano sarà descritto con un numero di punti minore rispetto ad un oggetto vicino.

Questo implica che la scelta del passo di scansione andrà decisa sulla base della distanza media dell'oggetto dallo scanner, in modo da ottenere un rilievo costituito da una serie di scansioni con precisioni omogenee.

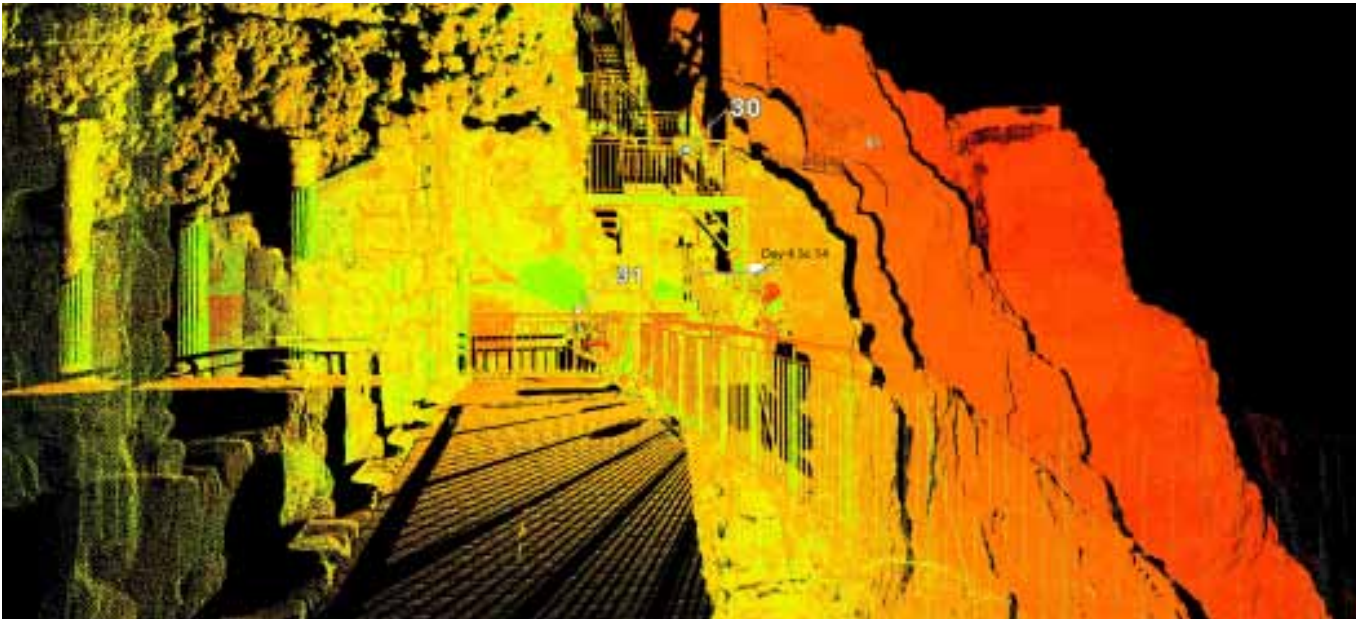


2.4.4 La scansione

La scansione vera e propria può effettuarsi sull'intera scena visibile dallo strumento, o su una porzione visibile la cui individuazione è facilitata dalla possibilità di segnare l'area interessata dalla scansione direttamente sull'immagine fotografica acquisita.

Ad ogni punto scansionato sono associate quattro informazioni: le tre coordinate lungo gli assi x,y,z e i valori di riflettenza, che cambiano a seconda della natura del materiale e l'angolo di incidenza del raggio laser. Al termine della scansione si procede ad un raffittimento della scansione in corrispondenza dell'area circoscritta dei singoli target, con una definizione utile al fine di poter individuare e riconoscere ciascun target all'interno della nuvola.

Lo strumento, descritta un'area nel quale è presente un target esegue un riconoscimento automatico del target stesso, corrispondente ad un modello standard inserito nella sua memoria software. Riconosciuto il punto di riferimento lo strumento effettua una nuova scansione esclusivamente nella zona ad alta riflettenza, per individuarne esattamente il punto centrale. Segnato il punto con una croce la mira viene etichettata, con la premura di assegnare ad ogni target un nome univoco per tutto il ciclo di scansioni, al fine di facilitare un primo controllo sulla correttezza dell'operato in fase di lavoro e agevolare la successiva fase di registrazione. Mediamente per ogni scansione sono stati registrati almeno dai cinque agli otto target.



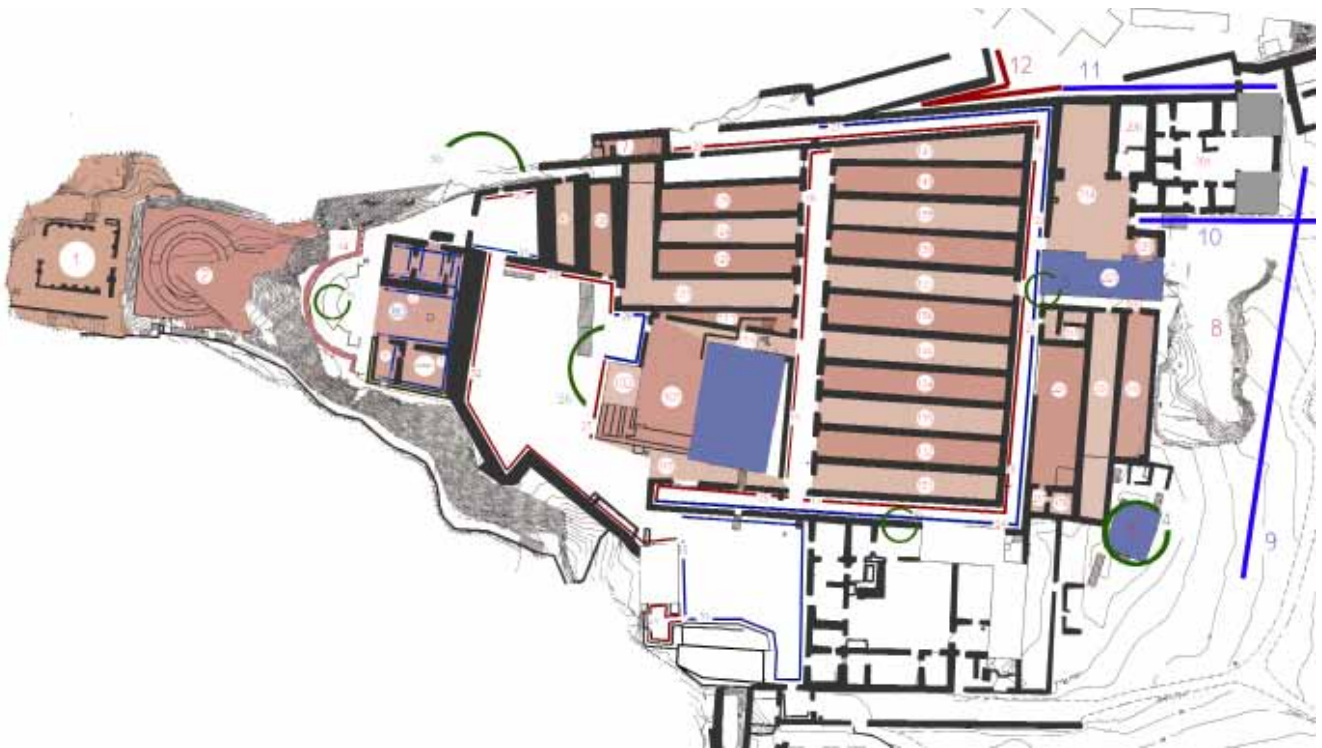
Nell'immagine una singola scansione con alcuni dei target visibili. Ogni target è nominato con un numero progressivo che sarà lo stesso che indicherà il medesimo target sulle altre scansioni ove esso sarà rilevato.

2.5 Considerazioni sulla gestione della nuvola di punti

Una campagna di rilievo produce una grande quantità di informazioni che necessitano di essere organizzate al fine di rendere gestibile il lavoro di restituzione dei dati. La strutturazione di codici che individuano singole categorie di elaborati e di dati e per la costituzione di un archivio comune per la gestione dei files e del materiale grafico e documentario realizzato sul campo costituisce un'operazione fondamentale per agevolare l'orientamento dell'operatore nella restituzione dei disegni e la ricostruzione delle operazioni svolte durante la precedente fase di acquisizione dei dati sul campo.

Le specifiche finalità di ogni campagna di rilievo, oltre alle strategie ed alle tecniche di intervento messe in atto per superare le difficoltà presentate dall'oggetto del rilievo, presuppongono la strutturazione di un processo ideale che va approfondito a seconda dei casi specifici, ma che solitamente viene ordinato per fasi tramite un apposito cronoprogramma di lavorazione.

I molteplici processi messi in atto nel rilievo, a partire dalla misura fino alla caratterizzazione dei materiali, agli aspetti strutturali, diagnostici ed interpretativi, acquisiscono un maggior valore e si prestano ad una



Nella planimetria sono indicate con una numerazione crescente, le campagne fotografiche, che successivamente saranno archiviate nel database, secondo una struttura che verrà esplicitata nel capitolo 7.

migliore utilizzazione se si struttura un processo che possa in qualche modo integrare le considerazioni sui dati e confrontare l'uno con l'altro i risultati parziali ottenuti durante il processo stesso. La prima fase delle lavorazioni consiste nella verifica e nel controllo dei dati presi sul campo.

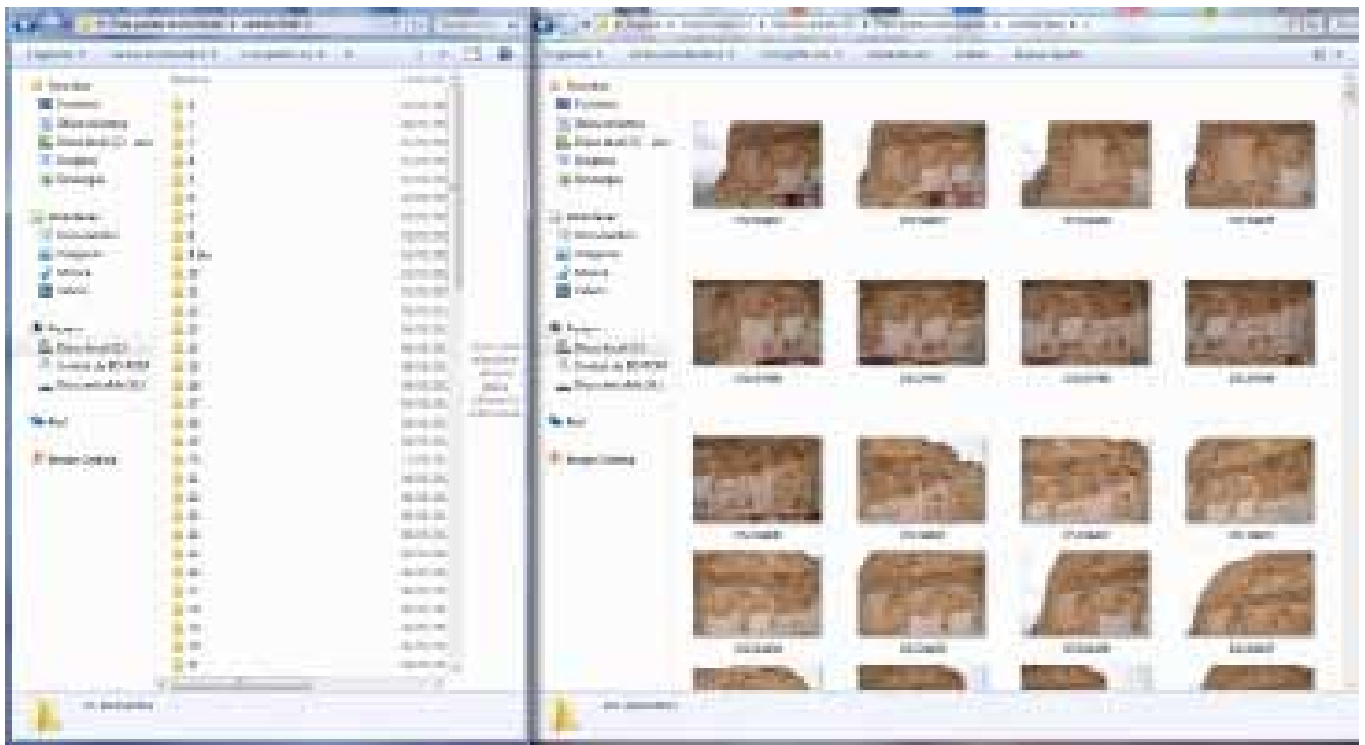
La fotografia risulta utile, ad esempio, al controllo costante del rilievo diretto per verificare tramite confronto delle proporzioni che non si stiano commettendo, o non siano stati commessi errori grossolani nella presa e trascrizione delle misure, i quali abbiano poi condotto a vistose deformazioni del rilievo. Il controllo delle procedure fotogrammetriche prevede, ad esempio una prima verifica integrata, ad esempio, con i rilievi topografici, per verificare eventuali incongruenze di mire o capisaldi e comprendere se alcuni punti sono stati battuti o trascritti male.

Se tutti i confronti incrociati sono eseguiti corretta-

mente, ed è verificata la correttezza della nuvola di punti topografica, si passa al tracciamento dei livelli utili ad individuare gli ingombri di massima ed a delimitare le singole parti del rilievo: lo schema ottenuto è anche utile per verificare, ad esempio, l'adeguata copertura fotografica da effettuarsi con la successiva procedura della mosaicatura.

E' importante precisare che in questa fase di lavorazione la mosaicatura non deve essere definitiva, ossia non si devono fare operazioni di fotoritocco, ma si deve prima disegnare il rilievo finito e, in un secondo momento intervenire sui fotopiani al fine di restituire un'immagine coerente.

Per la gestione di un lavoro che necessita l'integrazione di dati provenienti da molteplici fonti è opportuno un trattamento delle differenti sorgenti di dati attraverso specifici programmi; tutti questi software sono generalmente compatibili tra loro ma resta comunque



Database fotografico.

importante avere ben presente l'obiettivo finale che si intende raggiungere, per ottenere un adeguato prodotto grafico occorre verificare quali proprietà deve avere il supporto, verificare quali software sono in grado di soddisfare le specifiche esigenze di lavoro, controllare formati e compatibilità dei prodotti semilavorati, ovvero che siano in grado di produrre come bypass un file con la medesima estensione.

Nella complessità di un lavoro le informazioni modificano la loro forma e passano attraverso differenti canali: dalla mente per giungere al movimento di un braccio ed al disegno di un oggetto, dal computer alla stampa di tavole grafiche, dall'oggetto alla percezione della sua rappresentazione.

L'elemento chiave per un uso proficuo del laser a scansione è sicuramente il software.

L'utilizzo di uno strumento laser scanner è inscindibile da un pacchetto software e da uno strumento hardware, che siano in grado di gestire l'enorme quantitativo di dati che questa strumentazione è in grado di rilevare. Attualmente è difficile trovare in commercio dei software in grado di gestire propriamente la nuvola dei punti ai fini di un rilievo architettonico, probabilmente perché i programmi disponibili ereditano una grande esperienza dalla modellazione solida meccanica, con procedure che tendono a modellare su superfici artificiali regolari e a riconoscere nell'oggetto primitive solide elementari (cilindri, quadrati, ecc) e solo parzialmente soddisfano le esigenze della modellazione architettonica.

Contemporaneamente, i software di modellazione 3D e di tipo CAD disponibili non sono in grado di elaborare la quantità di dati ottenuta con questi strumenti in maniera fluida.

In generale le funzioni di base di un software ideale per il rilievo nei Beni Culturali sono:

- controllo e gestione dell'acquisizione dei dati;
- pretrattamento dei dati acquisiti (rimozione del rumore, filtraggio, registrazione delle scansioni);
- trattamento dei dati filtrati (modellazione);
- integrazione con altre informazioni (mappatura di immagini digitali).

Per quanto riguarda la prima fase, normalmente ogni

sistema è fornito di un software progettato ad hoc per la gestione di questa fase.

In generale questi programmi consentono la definizione dei parametri generali dell'acquisizione, quali l'area di scansione ed il passo incrementale dello strumento, la visualizzazione in tempo reale del risultato della scansione, mediante una serie di immagini digitali che rappresentano le distanze misurate o la riflettività e l'eventuale immagine RGB registrata durante l'acquisizione. Al termine della scansione l'operatore può modificare il punto di vista della scansione e muovere nello spazio la nuvola di punti acquisiti in modo da verificare il raggiungimento dell'obiettivo prefissato (verificare cioè che l'oggetto sia stato rilevato in modo completo).

I software forniti dalle case costruttrici sono generalmente molto efficienti e consentono una agevole esecuzione di questa fase, anche se talvolta il rendimento del software potrebbe essere migliorato implementando alcune funzioni come, ad esempio, la possibilità di utilizzare griglie di scansione con passo variabile a seconda delle zone dell'oggetto che si stanno rilevando (utilizzando per esempio una griglia ad alta risoluzione per gli spigoli).

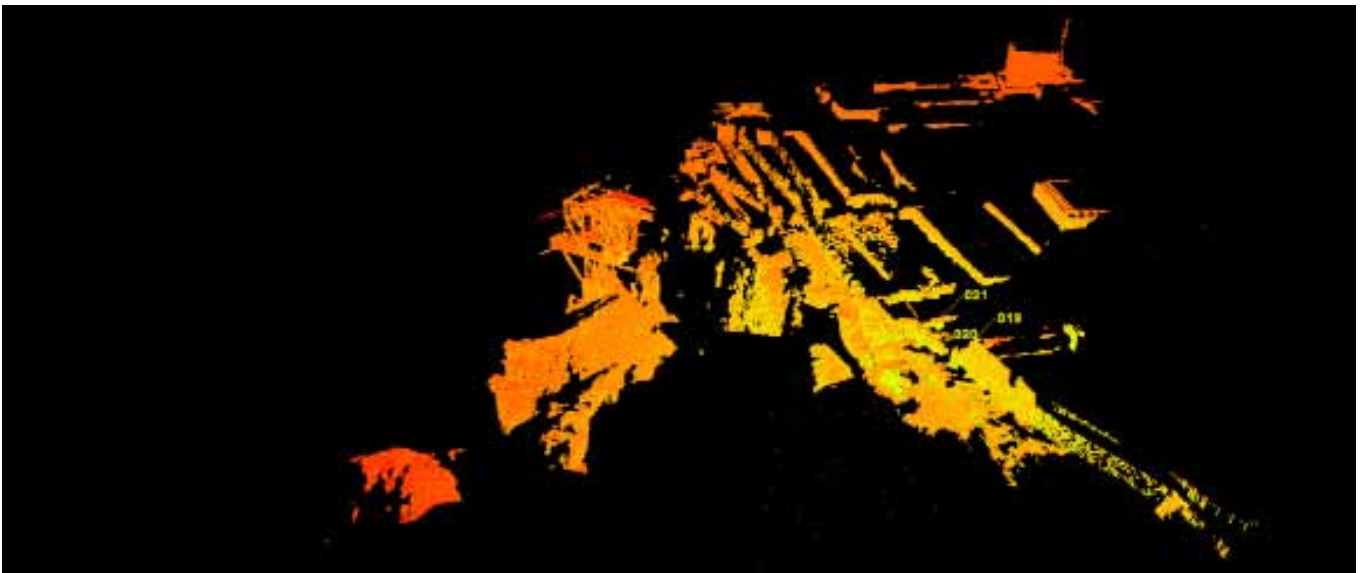
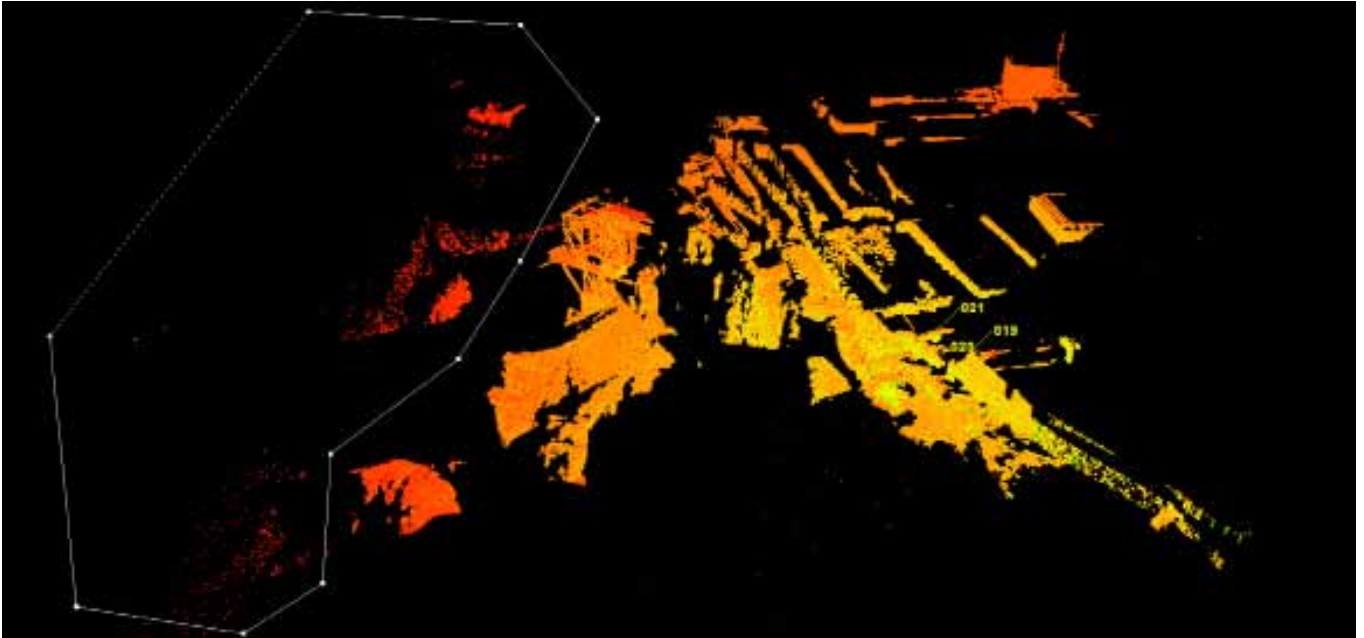
I dati acquisiti, a seconda delle soluzioni fornite, possono essere scaricati direttamente su di un pc durante l'acquisizione, oppure memorizzati all'interno dello strumento e scaricati solo al termine della sessione di misura. I formati di memorizzazione possono essere quelli tipici del software oppure in formato testo o DXF, facilmente leggibili da qualsiasi software di visualizzazione.

Nella fase di pre – trattamento dei dati è possibile eseguire diverse operazioni: la visualizzazione, la pulizia del dato primario, con cui si eliminano eventuali punti errati, lo sfoltimento o il filtraggio dei dati, la fusione delle nuvole acquisite e l'eventuale assegnazione ad un sistema di riferimento oggetto.

Il data cleaning è un'operazione necessaria poiché molte sono le ragioni che possono causare la memorizzazione di punti che non appartengono all'oggetto. Tra quelle già trattate in precedenza vi sono la parziale riflessione del raggio in corrispondenza degli spigoli,

gli errori nel calcolo della distanza dovuti alla presenza di materiali dotati di diversa riflettività, i punti errati causati da oggetti molto brillanti e gli effetti atmosferici. A questi errori, vanno aggiunti i punti causati

dalla riflessione di oggetti sullo sfondo, le riflessioni originatesi nello spazio tra scanner e oggetto (alberi od oggetti in primo piano, persone che si muovono o traffico) e le riflessioni multiple del raggio laser.



La pulizia della nuvola da tutti i punti non appartenenti all'oggetto d'indagine, è un'operazione importante e richiede una adeguata precisione.

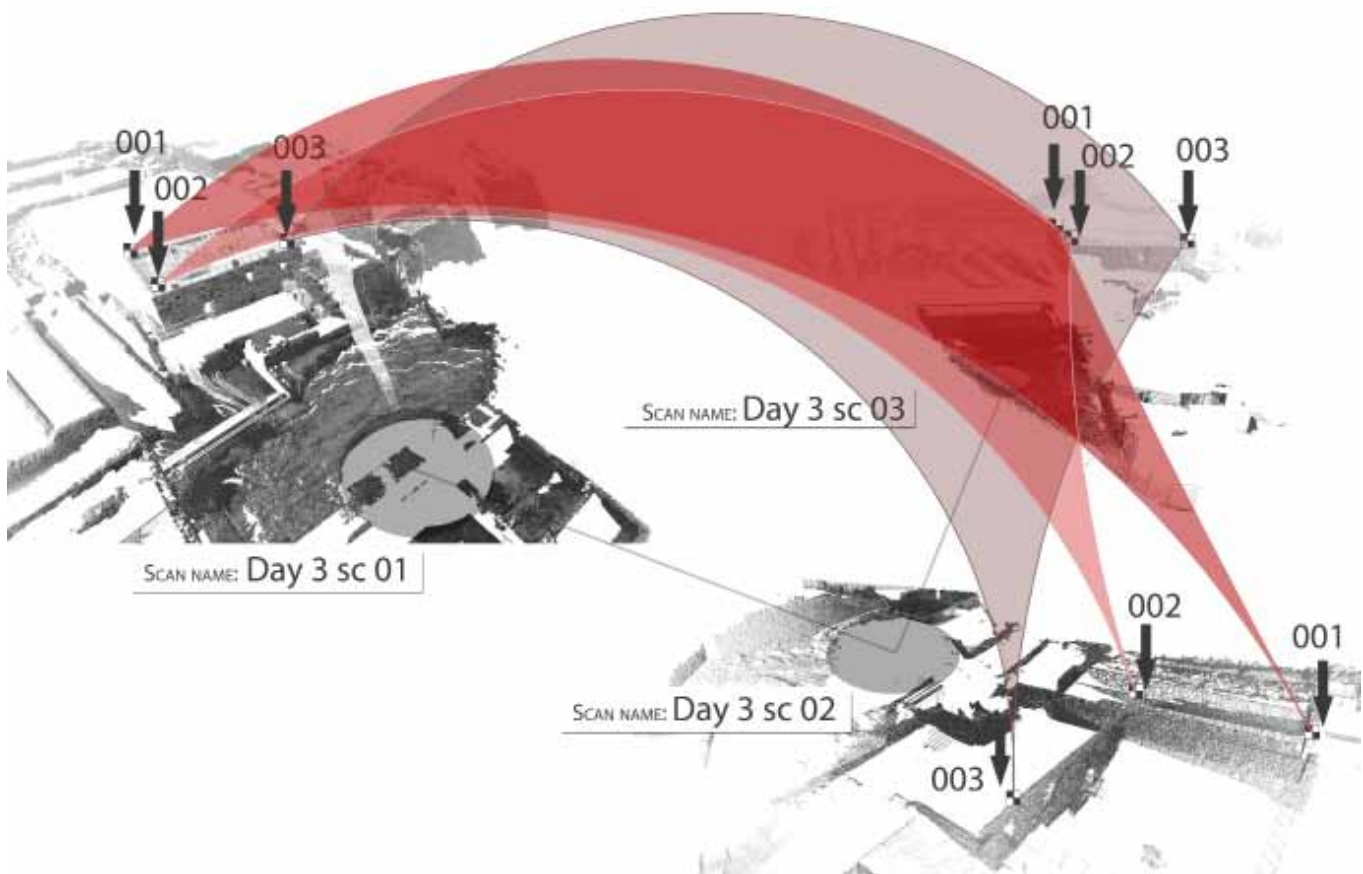
La maggior parte di questi punti errati può essere eliminata solo mediante procedimenti iterativi, poiché non esiste un metodo automatico che preveda tutte queste possibilità di errore; alcuni software assistono l'operatore in questo processo di editing tramite procedure semi-automatiche. Per esempio i punti sullo sfondo possono essere facilmente eliminati mediante l'introduzione di un intervallo di distanza, che consente contemporaneamente di eliminare le riflessioni multiple. Molto più difficili da eliminare sono i punti errati sugli spigoli.

All'interno delle procedure di pre-trattamento occorre inserire la registrazione delle scansioni eseguite. Si ricorda, infatti, che le coordinate dei punti scannerizzati

vengono definite in un sistema di riferimento, dapprima polare e poi cartesiano, con origine nel centro strumentale.

Questa operazione è chiamata registrazione e può avvenire secondo due modalità: utilizzando punti (presegnalizzati o meno), oppure correlando forme complesse.

Le tecniche di registrazione che si basano sull'utilizzo di punti prevedono che le scansioni adiacenti abbiano un sufficiente grado di ricoprimento (non meno del 30%) e che all'interno di questa fascia esistano punti presegnalizzati, o naturali e individuabili direttamente sulla nuvola, in numero sufficiente a garantire la stima dei parametri della trasformazione spaziale che per-

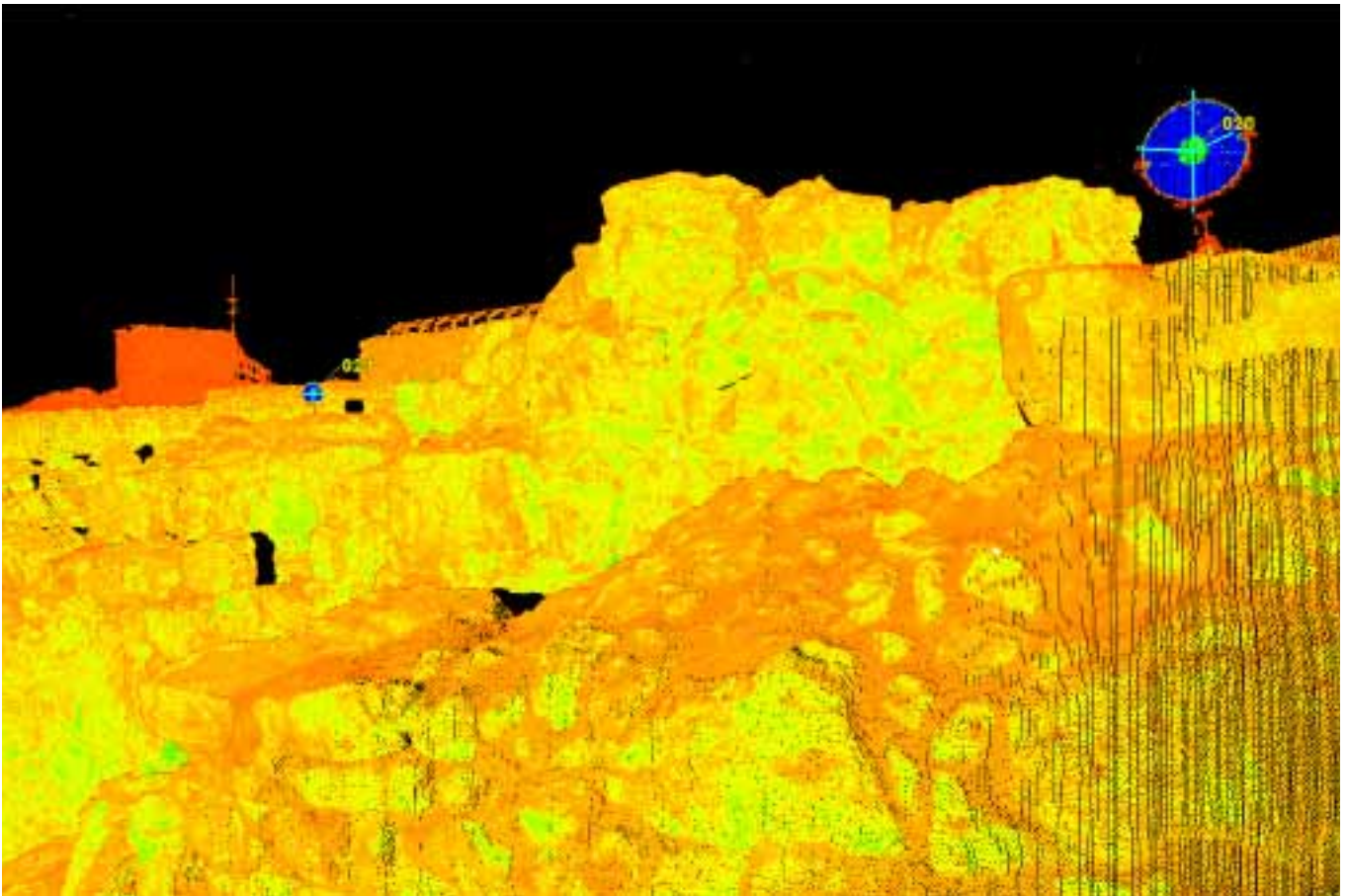


Nell'immagine viene schematizzata la connessione tra tre scansioni, attraverso una terna di target.

mette di mettere tutte le scansioni nello stesso sistema di riferimento.

L'operazione di scelta dei punti di collegamento all'interno delle due scansioni e la definizione dei punti omologhi può avvenire in modo completamente manuale; più affidabile e preciso risulta l'uso dei punti presegnalizzati, mediante segnali catarifrangenti o di forma nota.

L'utilizzo di questi punti è però possibile solo quando l'oggetto sia accessibile; in tal caso molti software consentono un'acquisizione automatica ad elevata risoluzione di questi target e quindi l'operatore è chiamato alla sola collimazione.



Nell'immagine, tratta da una singola scansione, si vedono due target, del tipo basilane, con la nomenclatura a loro assegnata.

2.5.1 L'allineamento di nuvole di punti

In passato, soprattutto nell'area della Computer Vision, notevoli sforzi sono stati fatti riguardo la tematica della registrazione di nuvole tridimensionali di punti. Uno dei metodi più popolari, tuttora implementato nella maggior parte dei software commerciali che si occupano della gestione ed elaborazione di dati 3D, è l'algoritmo Iterative Closest Point (ICP), sviluppato da Besl e McKay, che sono considerati i pionieri della registrazione, in quanto sono riusciti a tradurre in modo formale l'allineamento di superfici [Besl & McKay, 1992]; il principio di funzionamento del primo algoritmo è stato poi variato e sviluppato, anche da numerosi altri autori, nel corso degli anni.

L'algoritmo ICP applica in modo iterativo una rototraslazione rigida nello spazio ad una delle due nuvole, considerata mobile, affinché si sovrapponga nel mi-

glior modo possibile all'altra nuvola, considerata fissa. Il metodo è un cosiddetto punto-punto, che si contrappone al metodo punto-piano sviluppato da Chen e Medioni [Chen & Medioni, 1992]. In entrambi i metodi adottati, la registrazione avviene tramite la ricerca del minimo di una funzione obiettivo.

Nel primo metodo (metodo punto-punto) questa funzione è data dalla somma dei quadrati delle distanze dei punti corrispondenti delle nuvole. I punti corrispondenti si definiscono come la coppia formata da un punto di una nuvola e quello più vicino appartenente alla nuvola opposta. Nel secondo metodo (punto-piano), pur rimanendo la stessa struttura della funzione obiettivo, sono da minimizzare però le distanze tra i punti di una nuvola ed i piani di best-fit passanti per i punti dell'altra.

Scansione	Target 1	Target 2	Target 3	Target 4	Target 5	Target 6	Target 7	Target 8	Target 9	Target 10	Target 11	Target 12	Target 13	Target 14	Target 15	Target 16	Target 17	Target 18	Target 19	Target 20
1. Cloud 1-01-01	1000	1000	1000	1000																
2. Cloud 1-01-02	1000	1000	1000																	
3. Cloud 1-01-03	1000	1000		1000	1000															
4. Cloud 1-01-04	1000	1000			1000	1000	1000	1000												
5. Cloud 1-01-05	1000	1000			1000	1000	1000	1000	1000											
6. Cloud 1-01-06					1000	1000	1000	1000	1000	1000										
7. Cloud 1-01-07					1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000									
8. Cloud 1-01-08					1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000								
9. Cloud 1-01-09					1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000							
10. Cloud 1-01-10					1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000						
11. Cloud 1-01-11					1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000					
12. Cloud 1-01-12					1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000				
13. Cloud 1-01-13					1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000			
14. Cloud 1-01-14					1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
15. Cloud 1-01-15					1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
16. Cloud 1-01-16					1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
17. Cloud 1-01-17					1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
18. Cloud 1-01-18					1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
19. Cloud 1-01-19					1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
20. Cloud 1-01-20					1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
21. Cloud 1-01-21					1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
22. Cloud 1-01-22					1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
23. Cloud 1-01-23					1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
24. Cloud 1-01-24					1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

Nell'immagine viene riportata la tabulazione con tutti i target presenti nelle diverse scansioni.

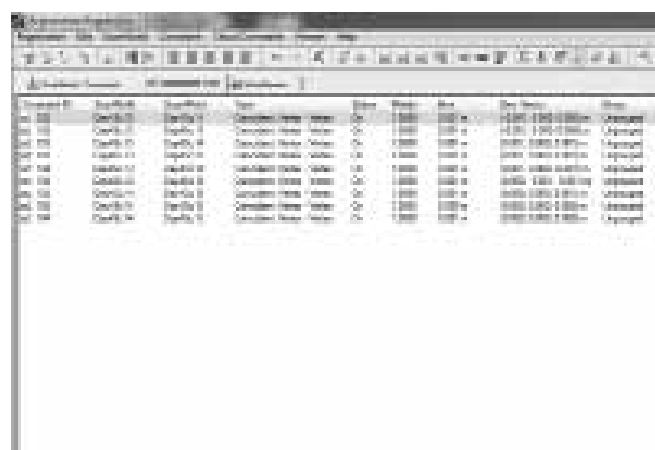
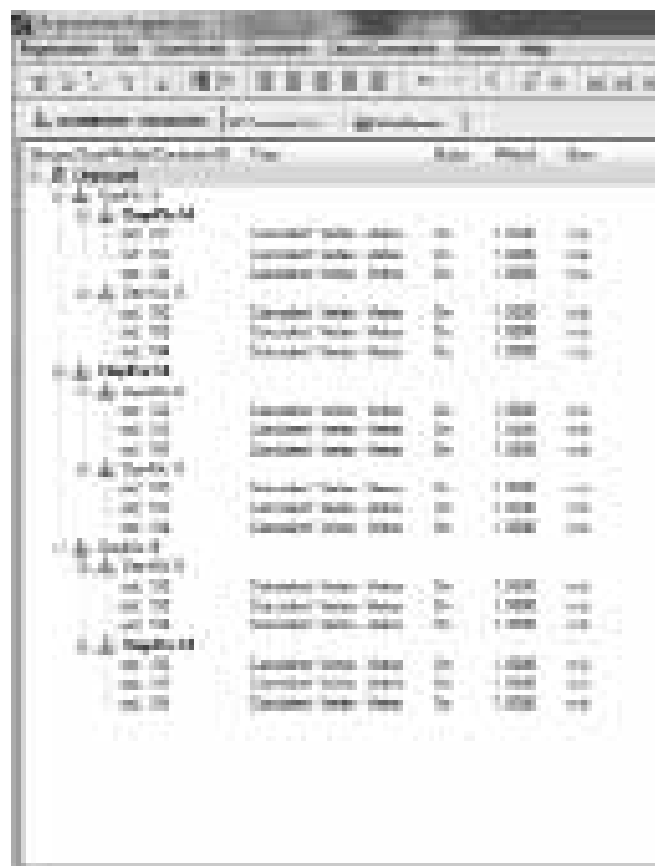
L'algoritmo procede in questo modo: date due superfici P e Q da allineare, si considera un punto di P indicato con p , e si cerca un punto particolare di Q, detto punto corrispondente q , che coincide con il punto più vicino (punto a distanza minima); in pratica per ogni punto della nuvola mobile vengono ricercati, all'interno della nuvola fissa, i punti contenuti all'interno di una sfera di un certo raggio (multiplo di un parametro introdotto dall'utente) e di questi viene tenuto il più vicino, che sarà considerato il punto corrispondente.

Questo avviene formalmente definendo un operatore "punto più vicino" (Closest Point Operator) C, fatto questo per tutti i punti della nuvola mobile e sommati i quadrati delle distanze relative, si ottiene il valore che sarà poi quello da minimizzare muovendo con delle rototraslazioni rigide la nuvola che si è scelta mobile. Si nota come in una procedura di ricerca così fatta, vengano escluse automaticamente tutte le coppie di punti corrispondenti che risultano avere una distanza superiore al valore del raggio della sfera da noi definita. Questo valore deriva da un parametro inserito dall'operatore, dal quale dipenderà anche l'esito della registrazione. Tale parametro in letteratura è convenzionalmente stimato come il doppio della distanza media dei punti di una nuvola, tuttavia in caso di forti disallineamenti dovrà essere convenientemente aumentato.

Naturalmente dopo un primo tentativo di minimizzazione delle distanze dei punti corrispondenti, sarà molto improbabile che la registrazione sia andata a buon fine, infatti molte coppie di punti che si sono formate, risulteranno essere solo "fittizie" e non porteranno verso un vero allineamento.

Saranno necessarie quindi più iterazioni, all'interno delle quali ripetere le operazioni di ricerca dei punti corrispondenti e di minimizzazione delle distanze. La convergenza dell'intero processo si avrà quando la variazione della matrice di rototraslazione tra due iterazioni successive è minore di una certa percentuale (generalmente quando la differenza delle ultime due traslazioni e rotazioni è contemporaneamente minore dell'1%).

Le coppie di punti corrispondenti che si sono formate



Due immagini della fase di registrazione di tre scansioni, con la terna di target in comune e l'errore presente del target nella coppia di scansioni.

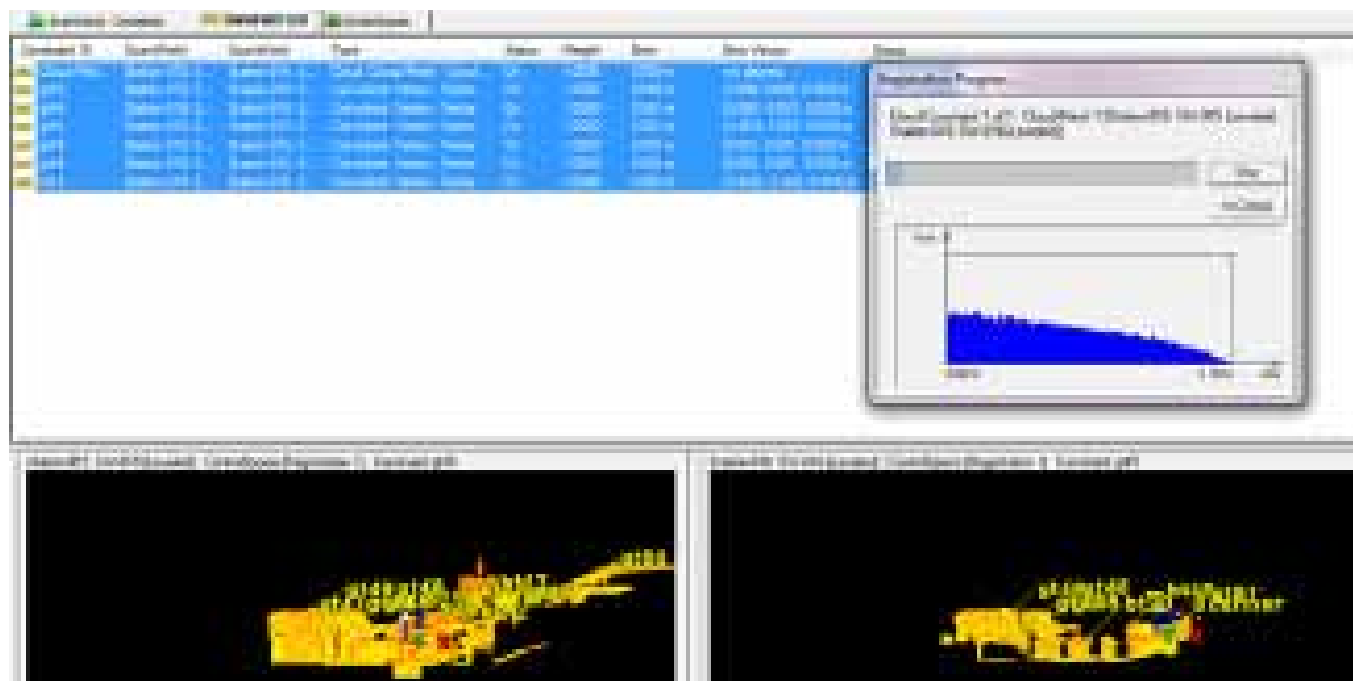
sono quelle all'interno della zona di sovrapposizione e in questo modo sono automaticamente esclusi tutti quei punti delle nuvole che non devono prendere parte al processo (punti di rumore o più generalmente fuori dalla zona di sovrapposizione).

Nel metodo di registrazione con minimizzazione delle distanze con metodo punto-piano, ad ogni punto della nuvola mobile viene associato un certo numero di punti dell'altra nuvola ottenuti scegliendoli tra quelli più vicini alla normale uscente dal punto della nuvola mobile. Questi punti vengono utilizzati per fare un best-fit, ossia trovare un piano che li approssima (col metodo dei minimi quadrati). Ogni punto della nuvola mobile si troverà così associato ad un piano sulla nuvola fissa; la funzione obiettivo in questo caso è minimizzare la somma dei quadrati delle distanze punto-piano di tutti i punti della nuvola mobile.

A parte il diverso modo di intendere la funzione obiettivo, la struttura dell'algoritmo rimane essenzialmen-

te la stessa di quella del metodo punto-punto. Questo metodo permette una convergenza con un numero di iterazioni di un ordine di grandezza minore, grazie al fatto che possiamo muoverci su un piano (quindi su due dimensioni) per trovare il minimo della funzione. Sebbene il processo di best-fit dei piani risulti piuttosto oneroso dal punto di vista computazionale, il metodo punto-piano resta più veloce e più preciso di quello punto-punto.

L'algoritmo ICP originale è pairwise based, cioè l'allineamento avviene per due sole nuvole per volta; i software commerciali (ad esempio PolyWorks, Innovmetric; Geomagic Studio, Geomagic Inc.; RapidForm, INUS Technology) permettono di eseguire, dopo una prima fase di allineamento delle nuvole a due a due in cui ogni nuvola viene allineata con l'ultima ottenuta, un allineamento globale di tutte le nuvole insieme, allo scopo di ridistribuire e quindi minimizzare l'errore residuo di registrazione fra tutte le scansioni.

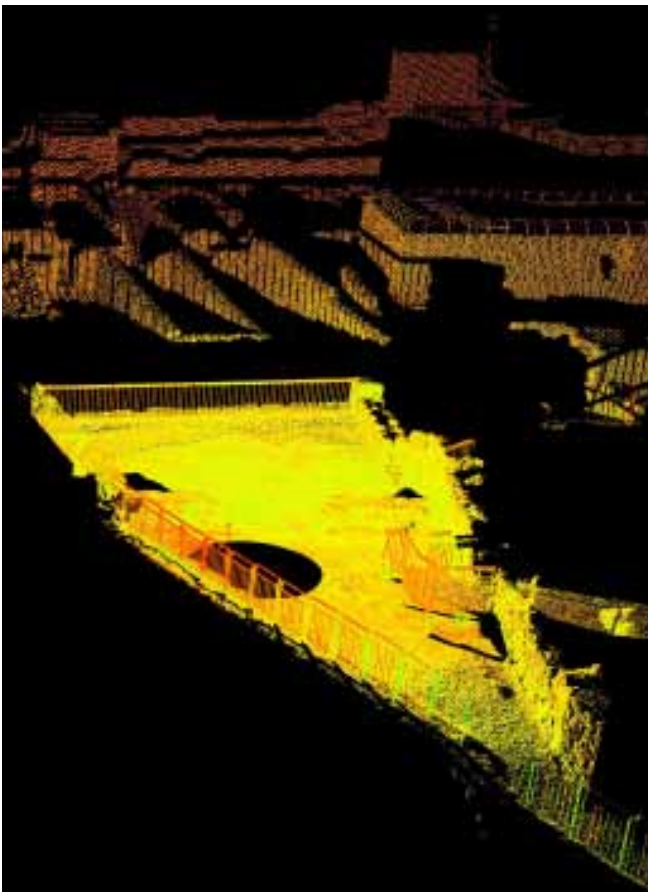


Processo di registrazione delle singole scansioni in un unico database.

2.5.2 La registrazione delle scansioni

La procedura di restituzione dei dati rilevati con laser scanner segue un processo sostanzialmente opposto al tradizionale metodo di rilievo. Si inizia con la fase di registrazione, compiuta sempre con il software Cyclone 6.03, e quindi di unione di tutte le scansioni in un'unica nuvola di punti.

Questa operazione è stata agevolata dall'utilizzo di target Leica che permettevano un'etichettatura dei punti già in fase di scansione. Ogni scansione possiede un proprio sistema di riferimento, che coincide con il centro ottico dello strumento, e tutte le nuvole di punti prodotte dalla stessa posizione dello scanner vengono



Il centro della scansione è l'origine del laser, che equivale al centro dello strumento. Nell'immagine a sinistra si trova al centro della circonferenza, data dalla mancanza di punti, visibile vicino la ringhiera. Nell'immagine a destra, viene visualizzato in modo schematico il centro dello strumento. La sua altezza dipende dalla collocazione sul cavalletto, da parte dell'operatore.

collocate sullo stesso sistema di coordinate. Per poter riunire tutte le scansioni effettuate dalle diverse postazioni è invece necessario definire un unico sistema di coordinate arbitrario ma comune a tutte le nuvole, mentre per un sistema georeferito è necessario riportare i dati ottenuti dalle misurazioni effettuate con il GPS, riferite ad un sistema cartografico di coordinate. Il GPS utilizzato nel rilievo di Masada è stato quindi impiegato per tracciare una maglia generale di punti riferita ai target principali utilizzati per l'allineamento delle scansioni. Lo strumento GPS ha lavorato sia su target mobili, utilizzati per connettere tra loro diverse stazioni, sia su target fissi applicati alle murature. La registrazione deve essere effettuata scegliendo un minimo di 3 punti omologhi (ne sono stati individuati

sempre almeno 5), corrispondenti ai centri di target scansionati da più postazioni, che consentono l'allineamento tra le scansioni.

Per agevolare e avere un maggior controllo su questa fase, al fine di ridurre le possibilità di errore accidentale, è stato preparato un documento di Excel, nel quale sono stati tabulati i target nella colonna delle ordinate e le scansioni lungo le ascisse, segnando con una croce le mire rilevate da ogni scansione.

Effettuata la registrazione, sfruttando sia i target per un preallineamento della nuvola che la corrispondenza delle "superfici" delle nuvole per un allineamento morfologico, si sono valutati gli errori commessi dall'approssimazione componendo in fine una grande nuvola autonoma per ciascun complesso rilevato.



Diversi target basculanti sono stati rilevati dal GPS per la georeferenziazione della nuvola dei punti rispetto al sistema satellitare.

2.5.3 La standardizzazione del dato

La tecnologia laser scanner terrestre si è evoluta nel campo del rilievo dei Beni Culturali soprattutto negli ultimi dieci anni e per questo motivo non è stata ancora predisposta una metodologia standard per le procedure ed il controllo di qualità di un rilievo di questo tipo.

In ambito anglosassone l'English Heritage, l'organismo responsabile della conservazione e della valorizzazione dei beni culturali inglesi, ha mantenuto uno standard di precisione per tutti i rilievi di tipo metrico effettuati negli ultimi otto anni.

Nell'ambito dei sistemi TLS (Terrestrial Laser Scanning) una standardizzazione è piuttosto complicata, soprattutto per la varietà dei sistemi in commercio. L'English Heritage si è occupato principalmente degli scanner distanziometrici ed in quest'ambito è interessante porre l'attenzione su questo studio per capire quali parametri sono stati considerati ed in che modo si è cercato di dare avvio ad una standardizzazione per questa nuova metodologia di rilievo.

Innanzitutto occorre evidenziare che per raggiungere una proposta soddisfacente sono stati rilevati più di 400 siti, sottoposti a tutela dell'English Heritage ed il procedimento di definizione si è evoluto mediante successive revisioni dei rilievi e consultando contemporaneamente sia i committenti che i rilevatori. Il risultato è stato pubblicato come "Addendum" al Metric Survey Specification for English Heritage.

Per ottenere un approccio strutturato, la progressione logica di un rilievo con laser scanner è stata suddivisa in tre segmenti tra loro correlati: acquisizione dei dati, utilizzo ed archiviazione.

Per quanto riguarda la fase di acquisizione dei dati, si può dire che questa è fortemente dipendente dallo strumento utilizzato, quindi è consigliabile richiedere un certificato di buon funzionamento dello strumento, oppure un test dettagliato eseguito nell'ultimo anno,

che dimostri che lo scanner è in grado di fornire la precisione e l'accuratezza richieste.

La precisione e la densità di punti vengono stabilite durante la fase iniziale della progettazione del rilievo e possono essere definite secondo due modalità (vedi tabella 2).

Affinchè l'acquisizione risponda ai requisiti richiesti dai committenti è necessario specificare, nella fase preliminare, quale sarà la dimensione dell'impronta del raggio laser, che non può superare il doppio della densità dei punti, il numero e la posizione delle scansioni, al fine di non ottenere delle lacune nei dati, il grado di sovrapposizione tra scansioni adiacenti ed in quale modo filtrare i dati per implementare le performance del software.

Eseguito il rilievo, per poter controllare l'accuratezza ottenuta, è possibile utilizzare dei punti di controllo, le cui coordinate, derivate dal modello tridimensionale ottenuto mediante rilievo laser scanner, vengano confrontate con le coordinate dei medesimi punti ottenute mediante strumenti topografici classici.

Per quanto riguarda l'utilizzo dei dati non vi sono ancora specifiche e standard sul tipo e sulle modalità dei prodotti ottenibili; comunque va sottolineato che

SCALA EFFETTIVA	DENSITÀ DEI PUNTI	USI E PRECISIONE
1:10	2.0 mm +/- 2.0 mm	Piccoli dettagli/oggetti (sino a 5m)
1:20	4.0 mm +/- 4.0 mm	Grandi dettagli/oggetti (sino a 10m)
1:50	15.0 mm +/- 15.0 mm	Piccole strutture (sino a 20m/30m)
1:100	25.0 mm +/- 25.0 mm	Grandi strutture (sino a 40m/60m)

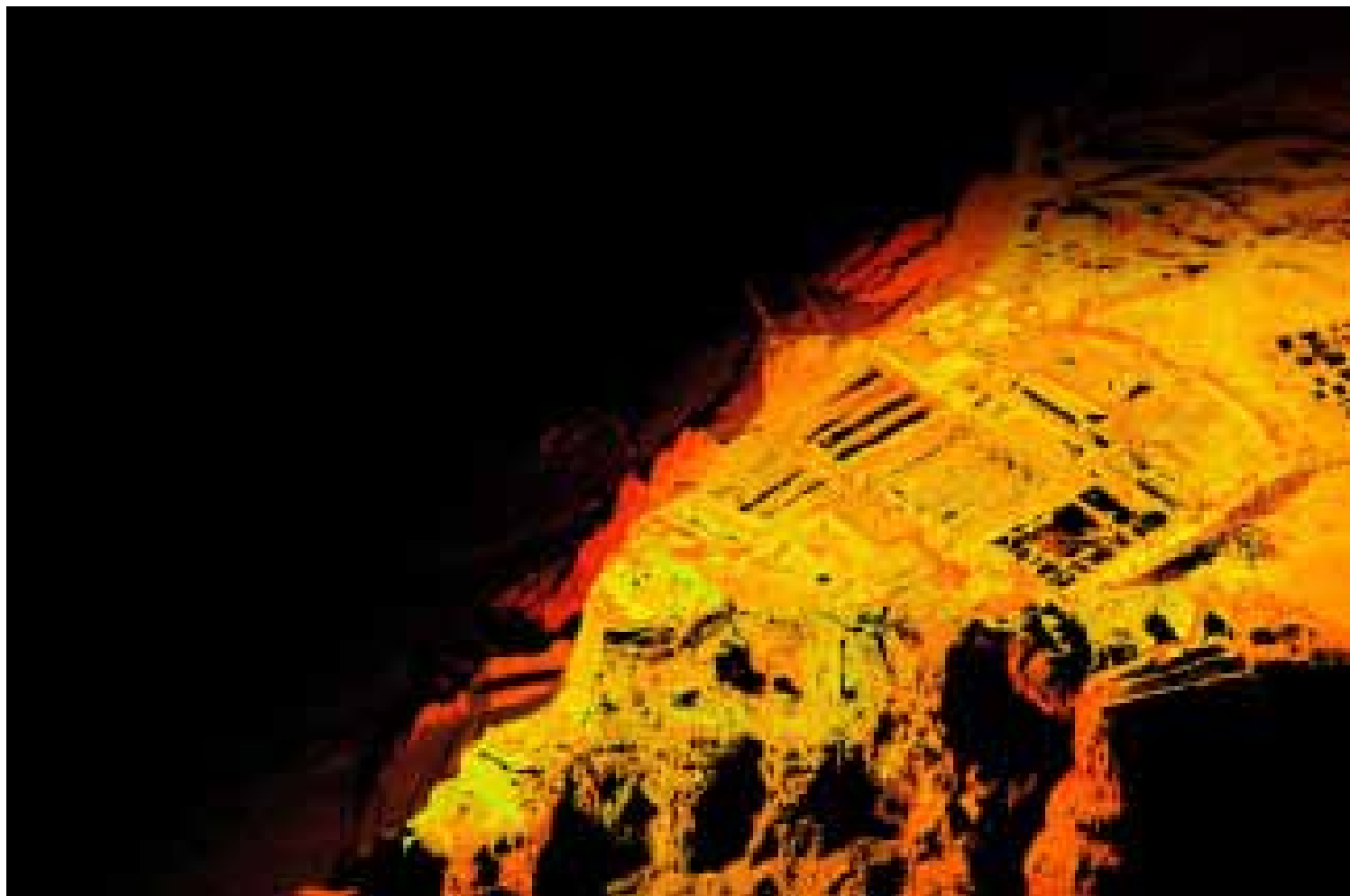
Tabella 2. Requisiti di un rilievo laser secondo la scala

il disegno bidimensionale, pur essendo lo strumento basilare di rappresentazione del rilievo, è un prodotto inappropriato per la rappresentazione e divulgazione di un rilievo laser scanner, mentre una corretta rappresentazione si può ottenere mediante un modello tridimensionale, animazioni e filmati, oppure mediante profili e sezioni.

La fase finale del processo, come vedremo nei capitoli successivi, è l'archiviazione del dato acquisito, che costituisce una parte vitale del processo di standardizzazione e deve garantire la consultazione dei rilievi anche a distanza di tempo. Il più grande ostacolo, attualmente, è la mancanza di un formato standard per i dati acquisiti, ma in tal senso l'English Heritage ha

iniziato a fissare alcune convenzioni per i propri siti sia riguardanti i dati, sia i nomi, sia i metadati.

È da rilevare l'importanza di tutte quelle nozioni aggiuntive che rendono ripetibili nel tempo un rilievo ed un'elaborazione mediante tecnologia laser scanner. Pertanto, il progetto deve contenere informazioni riguardanti le varie fasi di elaborazione (filtraggio registrazione e modellazione) ma anche tutte le informazioni disponibili per individuare correttamente i punti di stazione dello scanner e i punti di controllo, la precisione di tutti i parametri derivati dal processo di registrazione con i rispettivi residui, una descrizione completa della nuvola di punti e di tutte le lacune conosciute ed infine le note aggiuntive sul sito, come



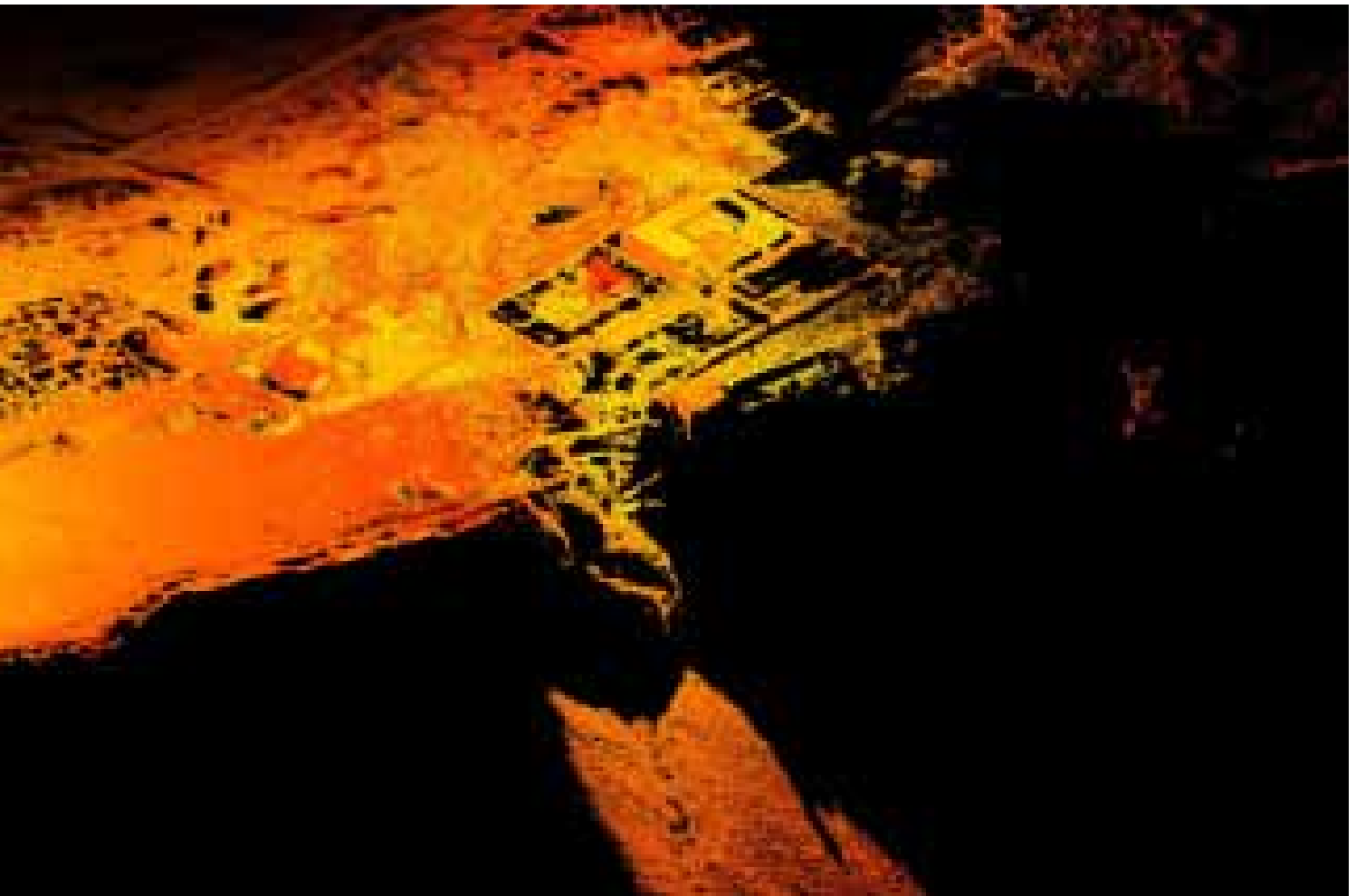
ad esempio le condizioni climatiche in cui è avvenuto il rilievo.

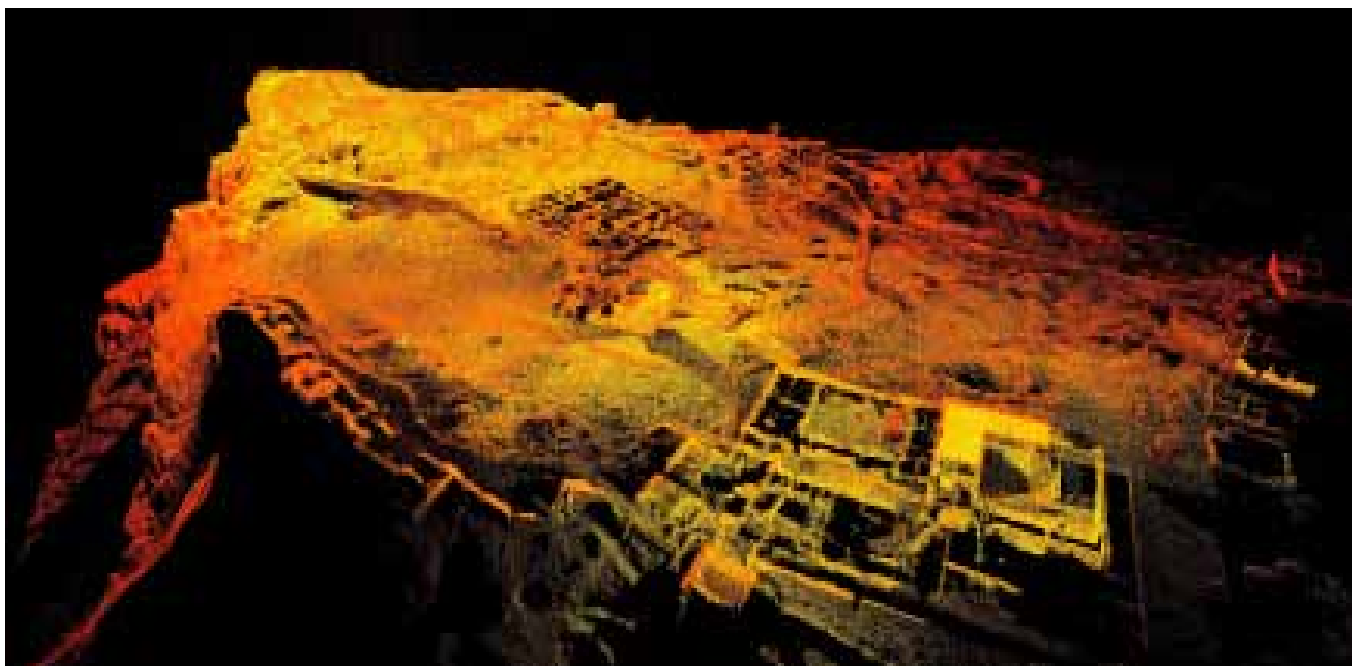
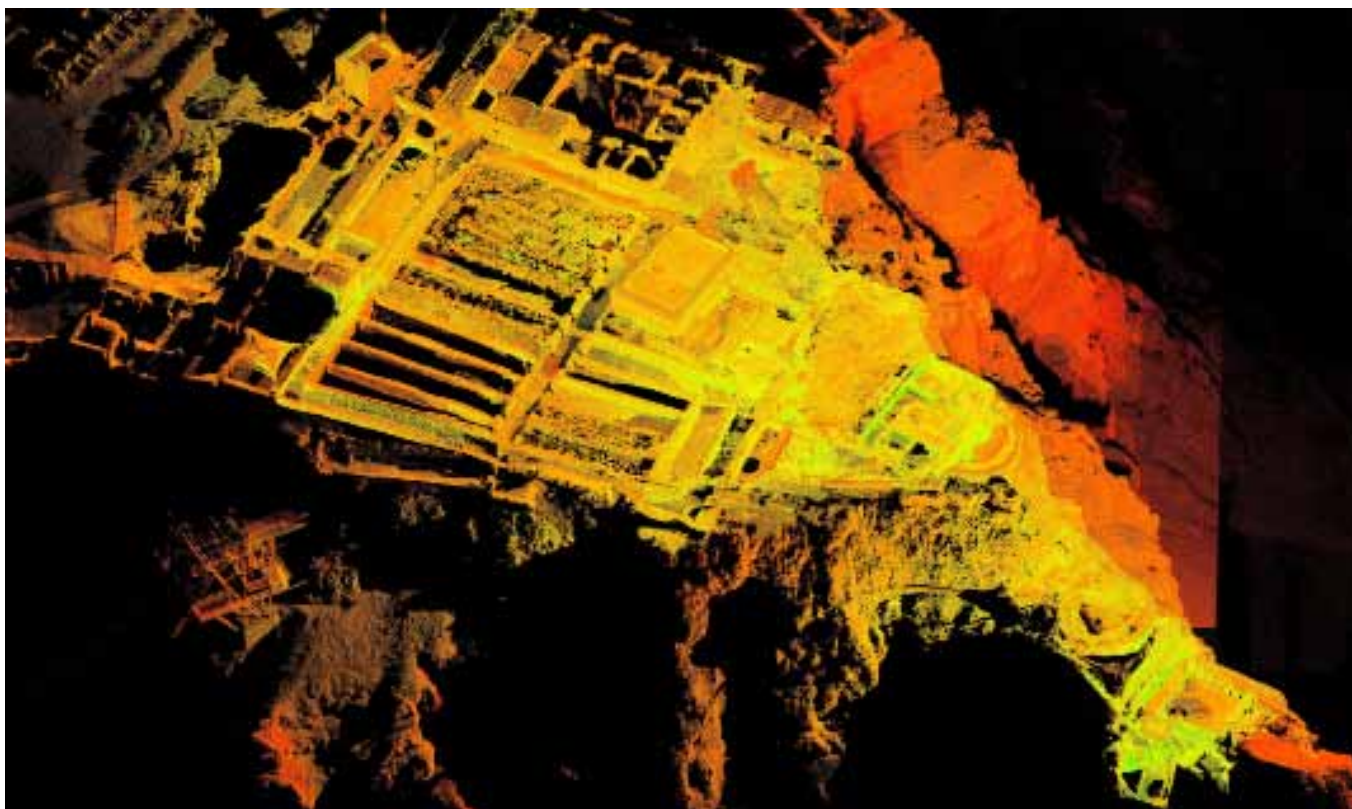
La generazione di queste informazioni può risultare onerosa per l'operatore, ma garantisce la leggibilità del rilievo nel tempo e la possibilità di utilizzare questo tipo di dati per un reale monitoraggio dei cambiamenti che il bene in esame subisce nel tempo.

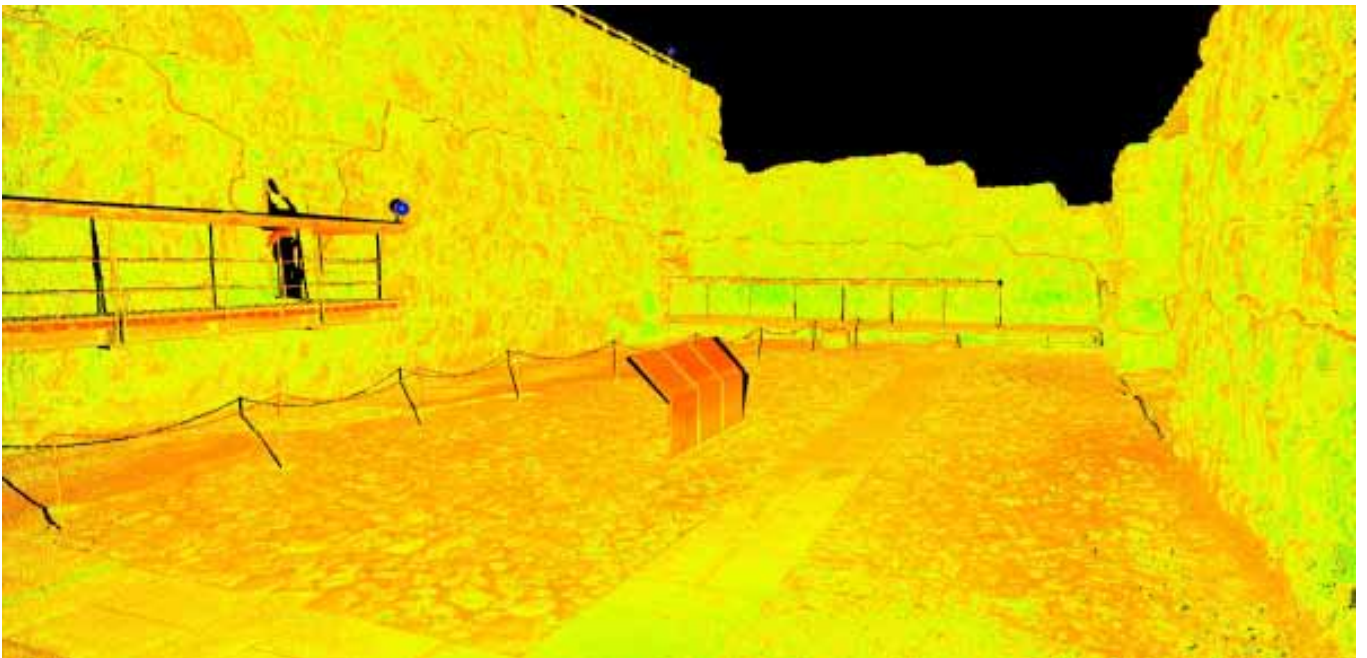
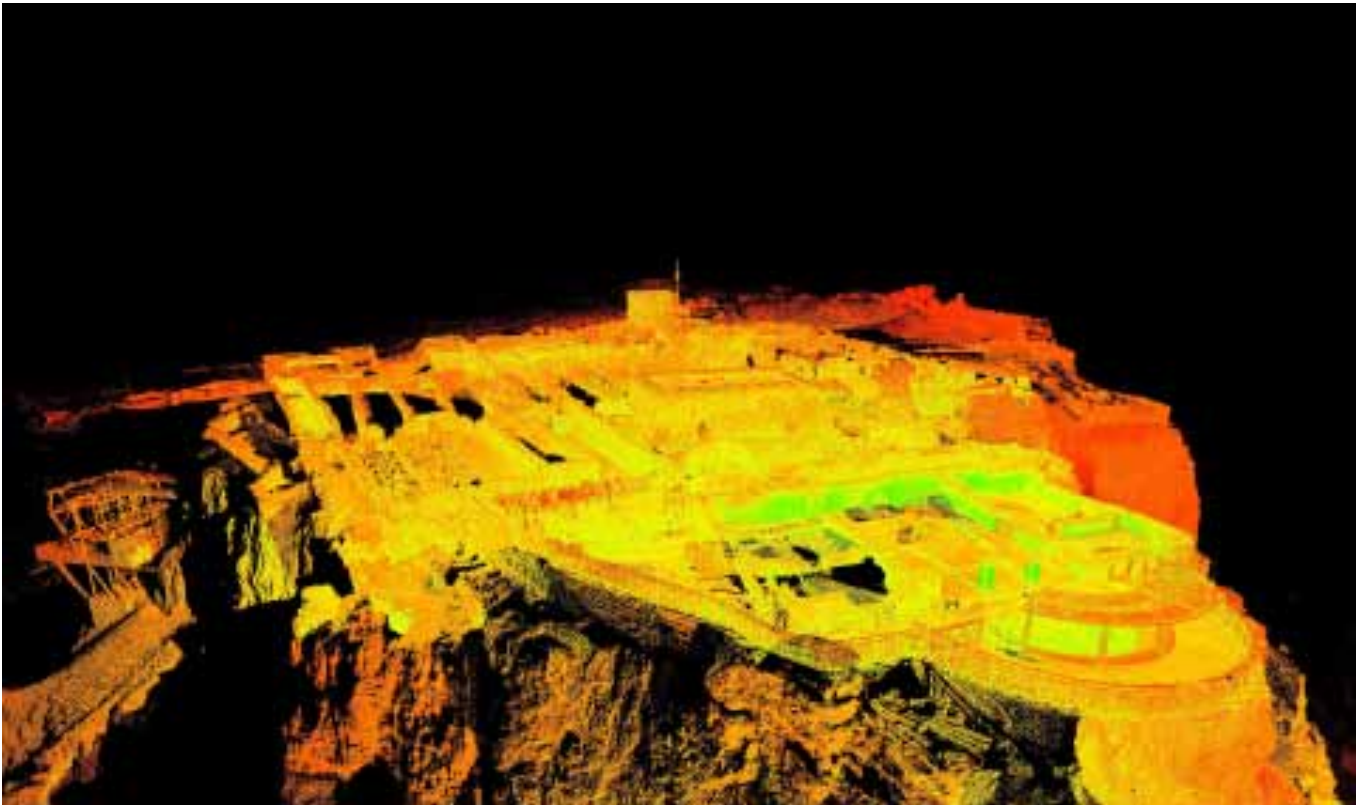
In conclusione il lavoro di standardizzazione è ancora in fase di definizione, ma è molto utile per sottolineare la necessità di cooperazione con la committenza nel fissare tutti i requisiti che influenzeranno il rilievo e le relative operazioni di elaborazione che determineranno il prodotto finito.

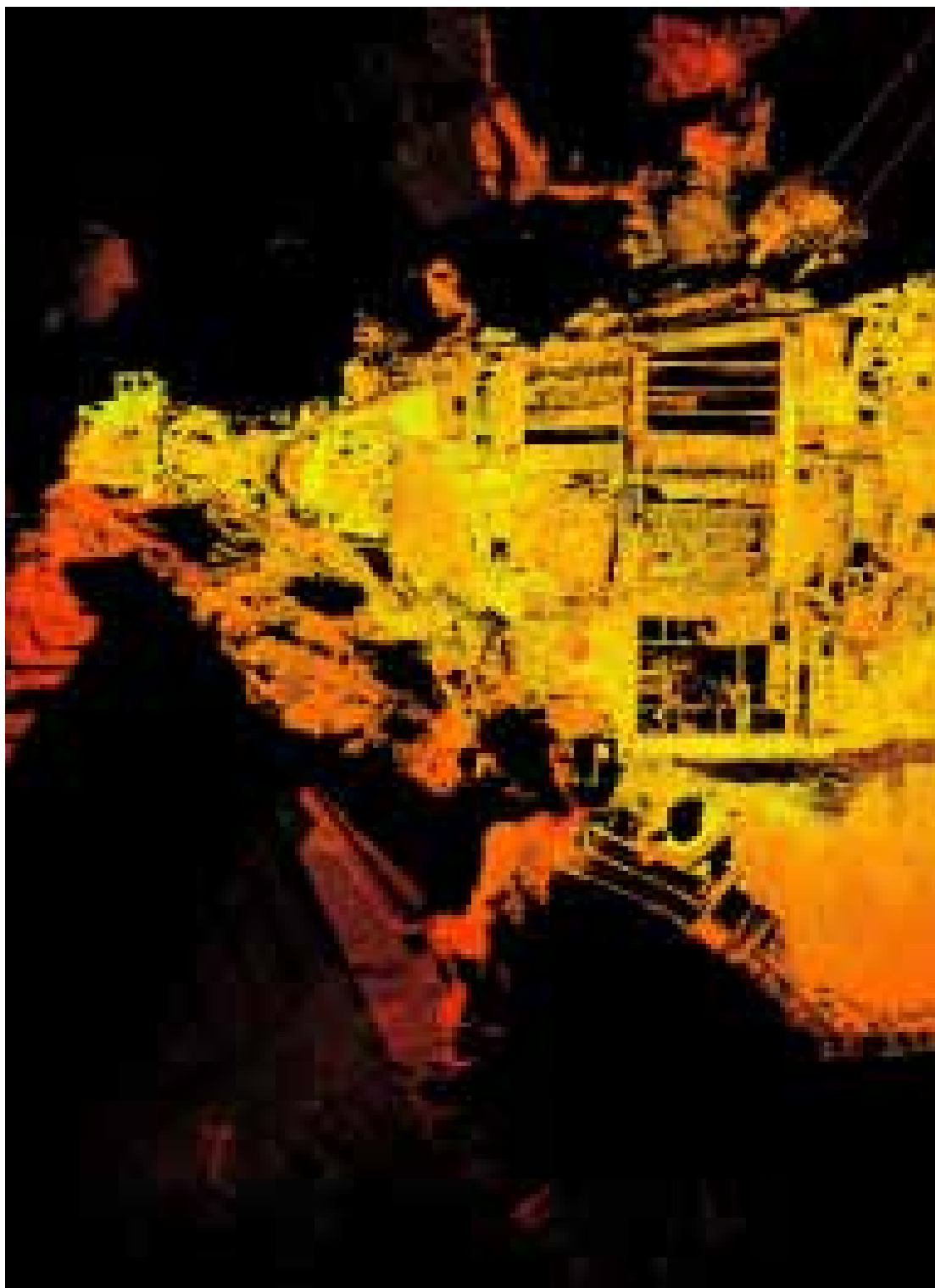
Note

1. Cignoni, Scopigno, 2008.
2. Porzilli, 2013.
3. Parrinello, 2013.

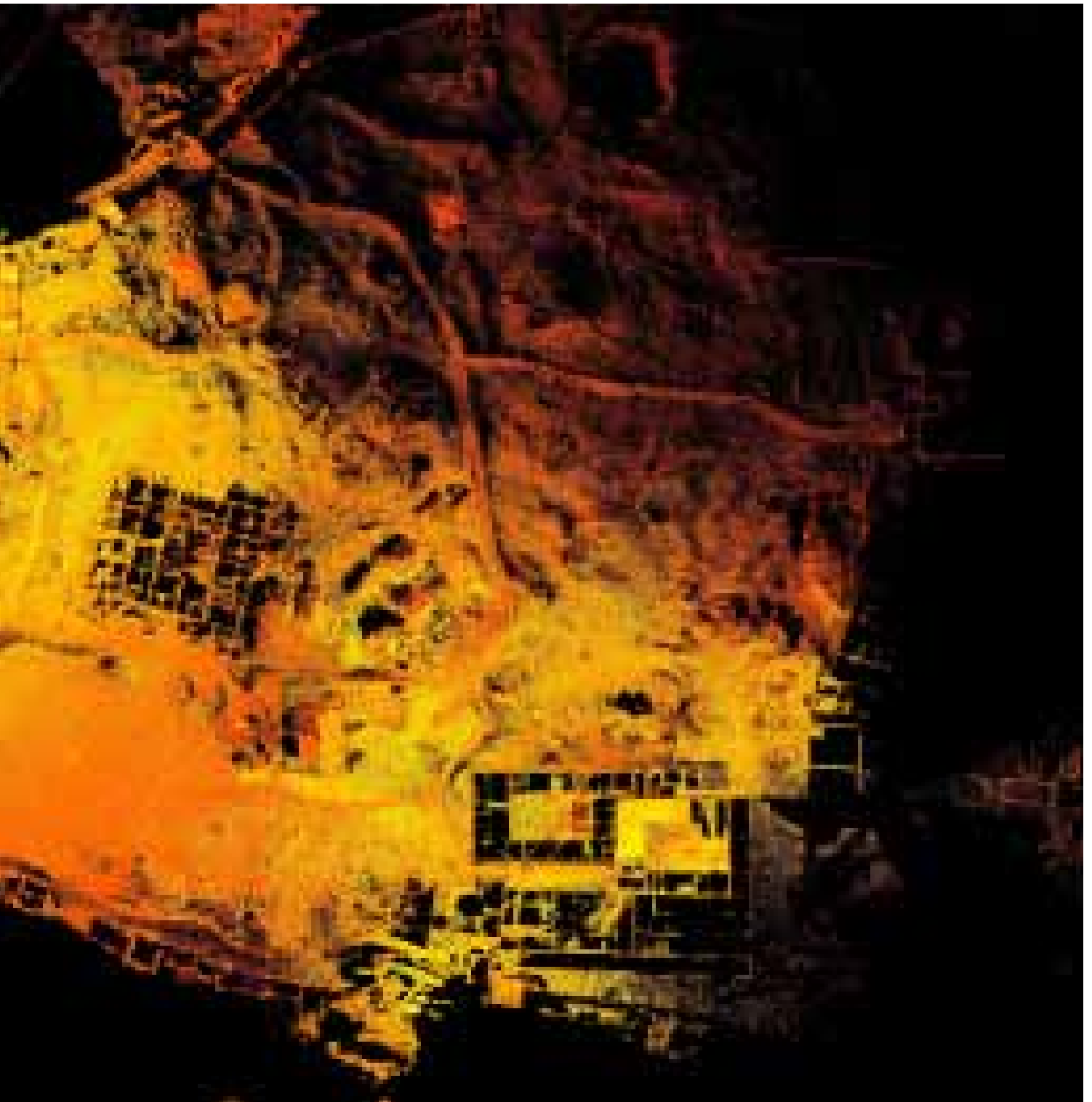


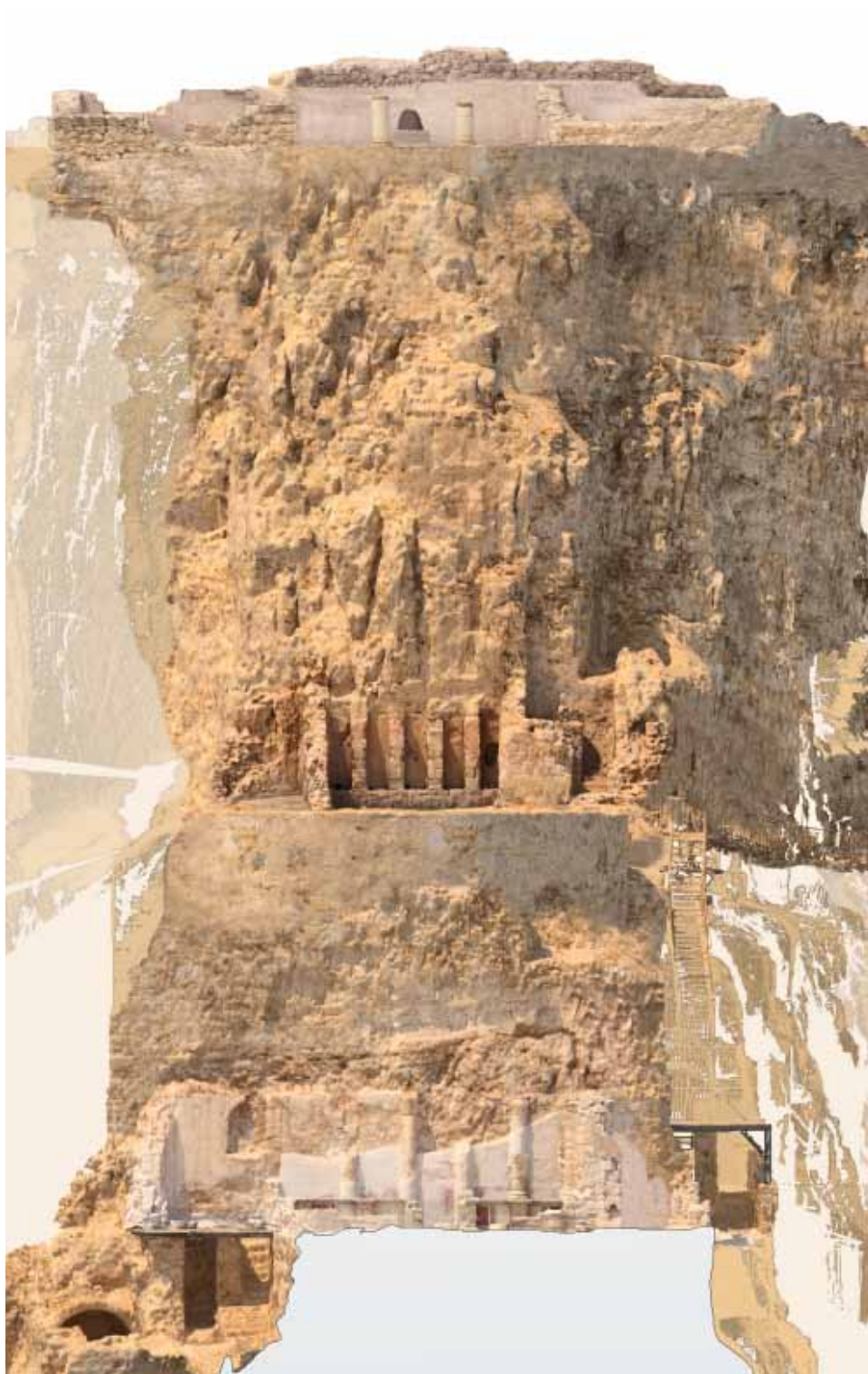






A fianco e nelle pagine precedenti viste prospettive della nuvola di punti, risultante dalla registrazione in un unico database, delle prime due campagne di rilevamento.





Modellazione Tridimensionale, del Palazzo di Erode a Masada, da nuvola di punti, acquisita mediante laser scanner e fotogrammetria aerea e terrestre.

CAPITOLO 3

L'acquisizione del dato metrico: *metodi image based*

La fotogrammetria è la scienza che consente di ottenere misure accurate da fotografie (immagini) acquisite con sensori terrestri, aerei o satellitari¹. Partendo da diversi punti omologhi individuati nelle immagini, la tecnica fotogrammetrica consente di determinare informazioni metriche sulle dimensioni, forma e posizione di un oggetto o scena. La fotogrammetria pertanto stabilisce una relazione geometrica fra le immagini e la scena reale al momento della ripresa fotografica. Una volta ricostruita questa relazione mediante l'utilizzo del modello matematico della collinearità, è possibile ottenere informazioni metriche sull'oggetto attraverso l'impiego di almeno due immagini.

La fotogrammetria viene spesso associata al *Remote Sensing*, che però impiega immagini principalmente satellitari per l'analisi o il rilevamento di cambiamenti sul terreno o per la sua classificazione. Con l'avvento dei satelliti ad alta risoluzione (risoluzione geometrica inferiore al metro) le due tecniche ovviamente si avvicinano sempre più, anche se la fotogrammetria rimane sempre dedicata al trattamento geometrico delle immagini.

In fotogrammetria, analogamente a quanto avviene nella visione umana, se un oggetto viene ripreso in almeno due immagini prese da punti di vista differenti, le diverse posizioni dell'oggetto nelle immagini (la cosiddetta parallasse) consentono di ottenere viste stereoscopiche e derivare informazioni 3D dalle aree di sovrapposizione nelle immagini. La fotogrammetria è utilizzata in molti campi, dal tradizionale impiego industriale ai video giochi, alle produzioni cinematografiche, alla documentazione del patrimonio culturale sino al campo medico.

La fotogrammetria è per tradizione considerata come una procedura lunga, manuale e ormai obsoleta, soprattutto dopo l'avvento dei laser scanner. Ma i recenti

sviluppi di questa tecnologia ne hanno aumentato le prestazioni e automatizzato molte procedure di restituzione, riportandola come tecnica di base anche per il rilievo architettonico e archeologico.

Attualmente, per la restituzione di un modello completo, preciso e dettagliato, l'intervento manuale di un utente all'interno della pipeline di modellazione fotogrammetrica è ancora necessario.

Paragonata ad altre tecniche *image-based* per ottenere informazioni 3D (come computer vision, shape from shading, shape from texture, etc.), la fotogrammetria non mira ad una completa automazione delle procedure di restituzione, ma ha come obiettivo primario l'acquisizione di informazioni metriche accurate (precise e affidabili) e dettagliate dal punto di vista geometrico. Il monoplottaggio è invece una tecnica di digitalizzazione che consente di restituire oggetti in 3D partendo da un'immagine (o ortofoto) e il rispettivo modello digitale della scena.

La fotogrammetria si basa sul principio della collinearità che stabilisce come il centro di proiezione della fotocamera, un punto P' sull'immagine e il suo corrispondente punto P nello spazio, devono giacere su una linea retta. Quando molteplici raggi di collinearità vengono intersecati per calcolare le coordinate 3D di un punto identificato in almeno due immagini, si parla di triangolazione fotogrammetrica.

3.1 Obiettivi e strumentazione

Il ruolo della fotogrammetria come moderna e rigorosa tecnica di rilievo nel campo dei Beni Culturali è indiscusso³.

Le possibilità offerte sono numerose ed estremamente flessibili, sia per quanto riguarda l'acquisizione del dato, che per le procedure di elaborazione e i prodotti finali ottenibili, e proprio

la flessibilità è forse la caratteristica che più ne ha decretato il successo in questo campo di utilizzo, che può divenire complesso proprio per l'enorme varietà di casi e problematiche. Inoltre l'acquisizione delle immagini è rapida, non richiede contatto con l'oggetto e può oggi avvenire anche con camere a medio-basso costo, fattori questi importanti in questo settore, in cui

talvolta le risorse economiche e temporali a disposizione sono scarse.

Le possibilità oggi offerte dal digitale hanno accresciuto la già ampia diffusione delle tecniche fotogrammetriche nel rilievo di aree, edifici ed oggetti di interesse storico, archeologico ed architettonico, permettendo flessibilità di impiego, ottima precisione nella determinazione metrica della forma e della geometria di oggetti di ogni tipo ed una larga scelta nelle procedure e nei prodotti finali di rappresentazione.

Gli interventi di rilievo possono avvenire a scale diverse: si passa dall'utilizzo della fotogrammetria aerea a tutte le scale per il rilievo di siti archeologici, centri storici urbani, complessi monumentali e di fortifica-



Nelle figure, sopra e nella pagina successiva, un esempio di rappresentazione tridimensionale multiscala. In questo esempio si passa da modelli meno dettagliati dell'edificio ai modelli del singolo particolare dove non è stata effettuata decimazione delle mesh. Questo permette di ottenere modelli leggeri, interrogabili anche su piattaforme web, che conservano tutte le caratteristiche metriche e qualitative, via via sempre più dettagliate.

zione, edifici di interesse, fino a giungere alla descrizione di singole facciate di edifici, particolari architettonici, strutture e reperti grazie all'utilizzo della fotogrammetria close-range.

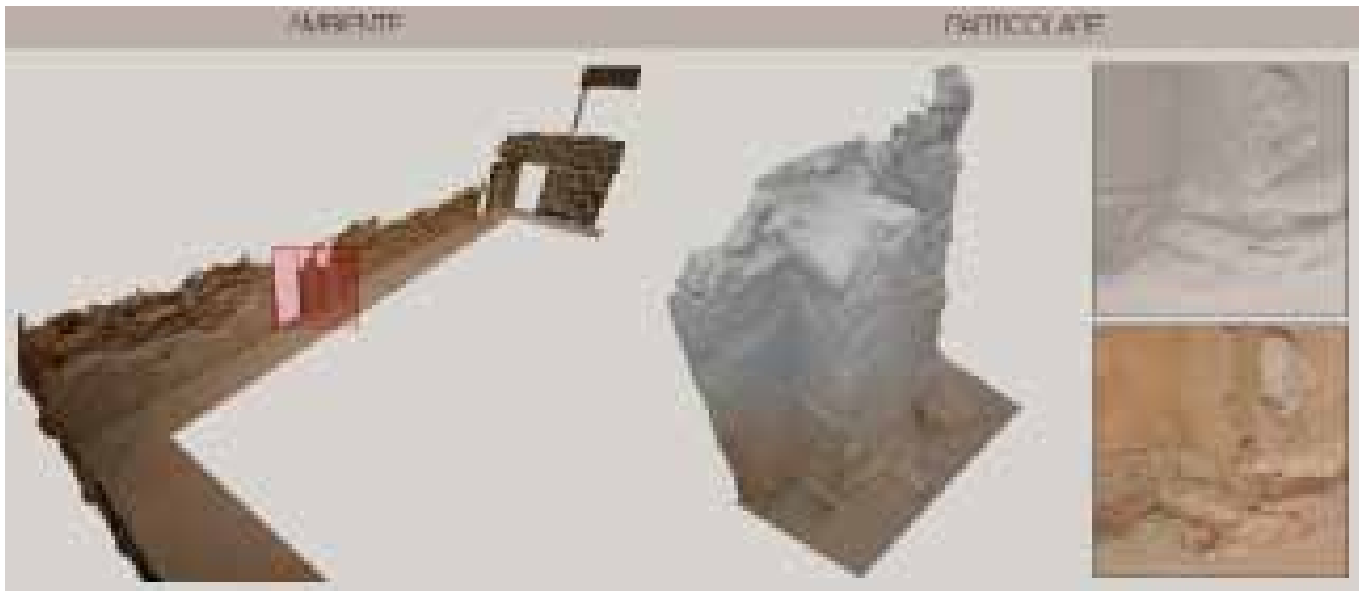
Quest'approccio multiscala permette quindi la lettura e la rappresentazione del caso di studio in esame non solo come oggetto a se stante, ma come elemento del contesto territoriale in cui si trova inserito, facilitandone lo studio e l'interpretazione storica.

Le tecniche e le sperimentazioni che negli ultimi anni sono esplose in ogni fase del processo fotogrammetrico sono numerosissime e difficili da catalogare ed elencare; le scelte che il fotogrammetra si trova ad affrontare di fronte ad ogni reale caso di studio talvolta non sono semplici e dipendono fortemente dalle specificità e caratteristiche dell'oggetto da rilevare, dalla tipologia e precisione dei prodotti finali che si desidera ottenere, dalle risorse a disposizione, dai vincoli organizzativi e logistici del rilievo stesso.

La fotogrammetria aerea riveste senza dubbio un ruolo fondamentale nella generazione di cartografie per cen-

tri storici urbani, aree archeologiche e complessi edificati più o meno estesi, ma le scale fotogrammetriche tipiche della fotogrammetria da aereo o elicottero possono non essere sufficienti per un accurato livello di dettaglio; in questi casi e qualora un rilievo classico non sia possibile per motivi logistici politici, militari o economici, possono essere usati per l'acquisizione delle immagini metodi meno convenzionali, ma di enorme efficacia, come gli aquiloni o i palloni, ma una scelta di questo tipo a sua volta comporta altre problematiche legate ad un'eventuale difficile geometria delle prese, dovuta ad esempio a problemi ambientali, come il vento, all'utilizzo di camere amatoriali, più leggere, invece che metriche o semimetriche, alla necessità di utilizzare per l'elaborazione strumenti software capaci di gestire progetti che si discostino dai classici rilievi nadirali aero-fotogrammetrici.

Anche nel campo della fotogrammetria close-range l'approccio scelto varia in funzione delle condizioni in cui ci si trova ad operare ed in base alle esigenze di ogni singolo rilievo; se lo scopo del rilievo di una



facciata di un edificio è la sola rappresentazione o documentazione, si potranno usare scale fotogramma di un certo tipo (ad esempio 1:50) e strumenti e pratiche di lavoro che consentano una buona leggibilità e strutturazione del prodotto finale, ma se lo scopo è anche il restauro o lo studio delle condizioni strutturali, il dettaglio e la precisione dovranno essere senz'altro maggiori e le scelte relative al tipo di camera, allo schema di acquisizione, allo strumento restitutore da utilizzare possono divenire più difficili e presupporre una certa cultura tecnica.

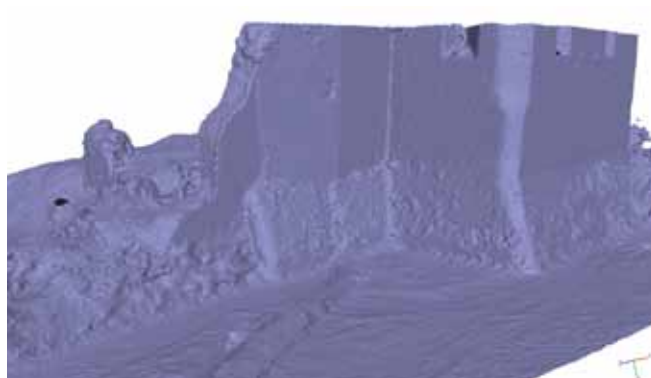
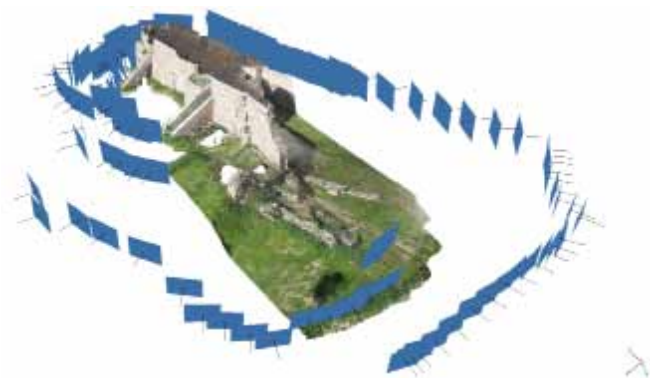
La vera esplosione di nuove tecnologie per i Beni Culturali si è assistita soprattutto nell'ambito della fotogrammetria terrestre.

Senza pretese di completezza, si elencano alcuni degli strumenti e procedure nel moderno rilievo fotogram-

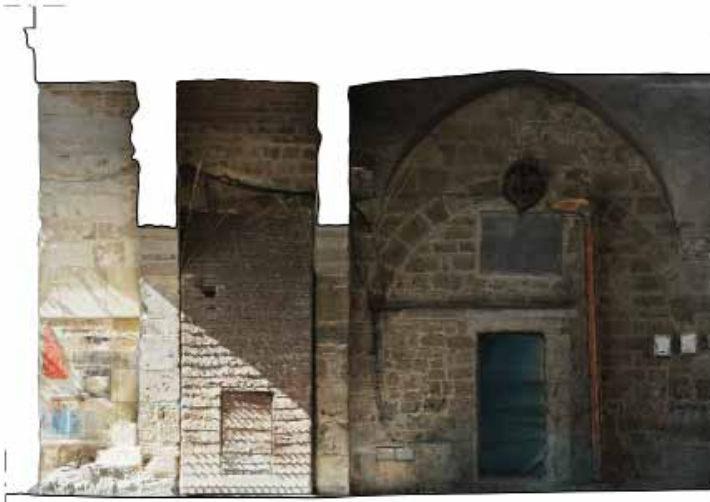
metrico terrestre; alcuni di essi sono stati utilizzati anche per alcuni reali casi di studio trattati e descritti in seguito. L'Image based Modeling, quindi, è una tecnica di rilevamento indiretto che restituisce un modello geometrico di un manufatto a partire da una serie di fotografie in formato digitale.

L'output principale di questa tecnica è quello di creare un modello digitale a fil di ferro (wireframe), ma anche un modello numerico mappato con texture del colore apparente del manufatto rilevato, oppure ancora un modello matematico.

La forza di questa tecnica di rilevamento è la sua scalabilità, poiché permette di ottenere informazioni puntuali su di un determinato elemento, oppure consente la costruzione di elaborati più vasti come un modello digitale completo di un edificio: questa versatilità è



Rilievi fotogrammetrici di elementi architettonici della Old City di Acre, Israele. Anche in questo caso il cambio di scala permette di ottenere modelli ottimizzati per la fruizione.



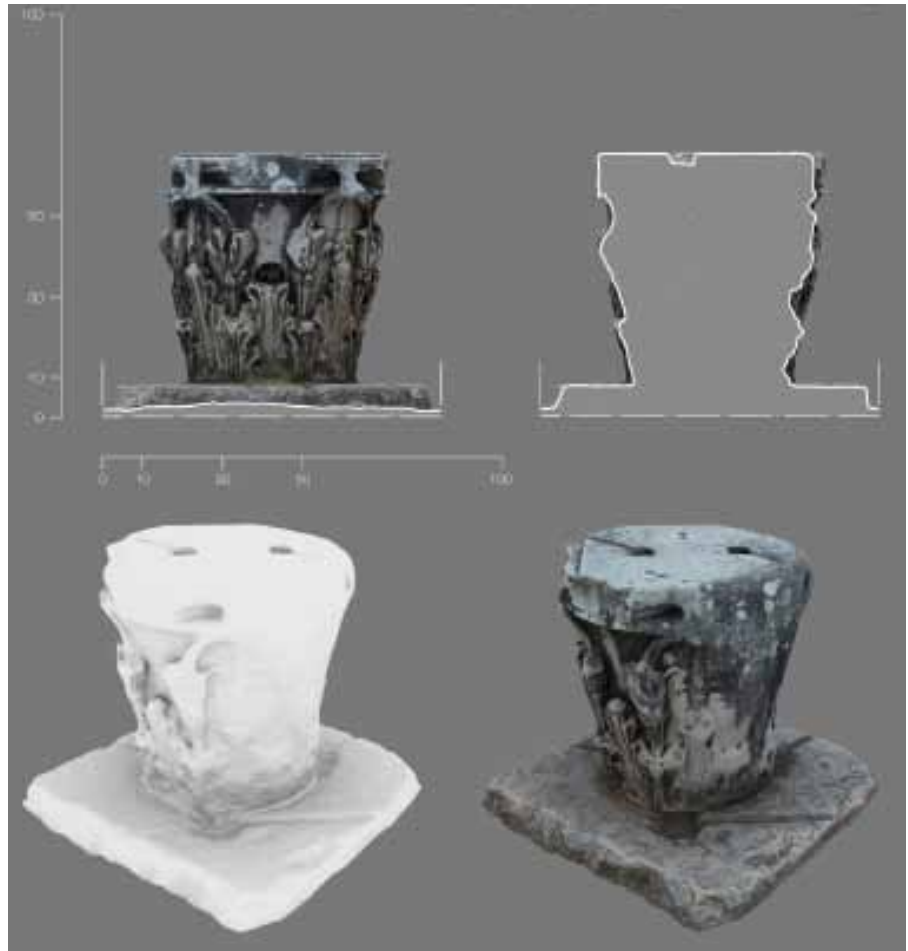
permessa dall'uso combinato di tecniche di fotogrammetria "classica" con tecniche di modellazione geometrica che costituiscono il potente binomio alla base di tali applicativi. Pur essendo una tecnica di rilevamento indiretto è necessario, per completare il processo di restituzione, prendere una serie di misure attraverso rilevamento diretto o strumentale per conferire al modello 3D la scala adeguata visto che i fotogrammi scattati con comuni reflex digitali non incamerano questo genere di informazioni.

I sensori e le fotocamere digitali in grado di acquisire immagini sono normalmente utilizzati da terra oppure

montati su piattaforme aeree (aeroplani, palloni, aquiloni, elicotteri, UAV, droni, etc.) o satellitari (Ikonos, World-View, Spot, Quickbird, etc.).

Si possono quindi distinguere:

- fotocamere terrestri: attualmente sul mercato ci sono a disposizione diversi tipi di fotocamere (o macchine fotografiche) digitali. Le due principali tipologie di camere digitali terrestri sono denominate "compatte" (o amatoriali) e "reflex" (SLR professionali) che si distinguono a seconda del tipo di sensore (CCD o CMOS, a matrice o lineare), ottica (fissa o intercambiabile), stabilità, costo, utilizzo, etc. Esistono anche



Rilievo fotogrammetrico di uno dei capitelli del Ninfeo di Palazzo, a Villa Adriana. L'utilizzo di questa metodologia di rilievo permette di documentare dettagliatamente anche resti archeologici dalla morfologia complessa.

camere panoramiche (con sensori lineari) in grado di acquisire immagini sferiche ad alta risoluzione (geometrica e radiometrica);

- camere avio-trasportate: vengono normalmente distinte in piccolo, medio e grande formato e acquisiscono immagini con sensori digitali lineari oppure frame. Le camere aeree analogiche che acquisivano fotografie con le marche fiduciali sono ormai state completamente abbandonate;

- sensori montati su piattaforme satellitari: sono generalmente di tipo lineare, accoppiati ad un'ottica che permette di acquisire immagini da 400-700 km d'altezza con elevate risoluzioni geometriche (<1 m) e ra-

diometriche (8-16 bit).

Nel caso di riprese terrestri, l'operatore deve cercare di acquisire le immagini in modo da ricoprire l'intera superficie dell'oggetto da rilevare, evitando le zone d'ombra e garantendo sempre un sufficiente grado di sovrapposizione tra le diverse immagini. Un punto viene restituito tridimensionalmente solo se è visibile (e misurabile) in almeno due immagini, riprese da punti di vista differenti. In applicazioni terrestri c'è molta più flessibilità nelle acquisizioni, mentre immagini aeree e satellitari sono tutte acquisite con assi di prese paralleli.



3.2 Metodologia

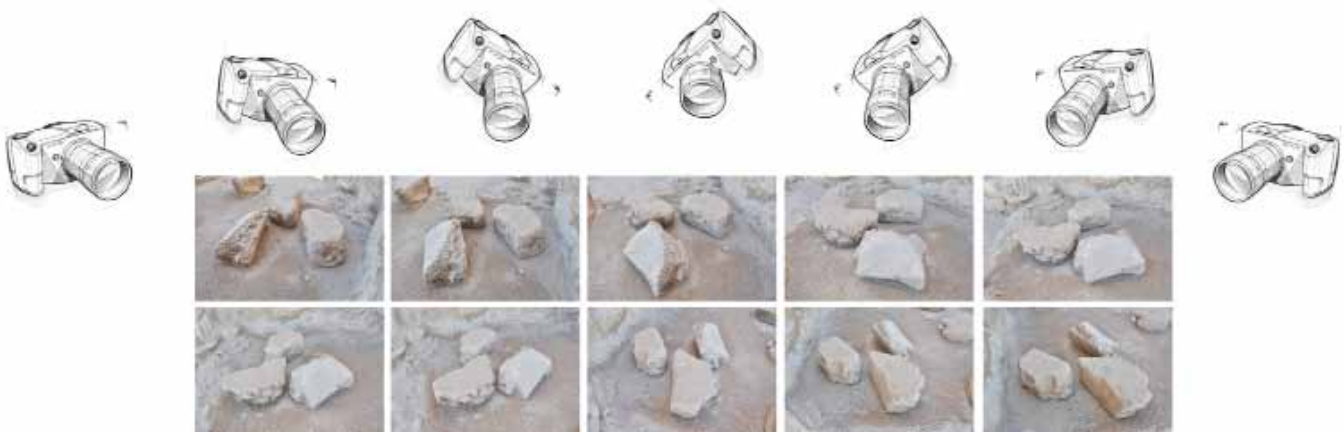
L'accuratezza del risultato ottenibile mediante i programmi per la fotomodellazione è funzione della qualità della fotocamera e dell'obiettivo impiegato, ma anche e soprattutto dalla cura con cui si è eseguita la calibrazione.

Tale processo può richiedere vari tentativi e svariate ore di lavoro fino a che non si perviene alla soluzione ottimale che consente di utilizzare la maggior parte possibile del fotogramma per il riconoscimento dei punti omologhi sulle foto.

In linea di massima fotocamere compatte e bridge sono sconsigliabili a causa degli automatismi che sovente le caratterizzano. Le fotocamere di tipo bridge presentano l'inconveniente dell'obiettivo non intercambiabile, e dimensioni del sensore paragonabili a quelle delle compatte, il che le porta ad escludere quale soluzione ottimale per una fotomodellazione che abbia la pretesa di un buon livello di affidabilità. Le reflex dotate di un obiettivo a focale fissa, come ad esempio un 35 mm,

risultano la soluzione più adeguata per gli scopi prefissati: questo genere di fotocamere presenta una dimensione del sensore superiore alle precedenti categorie (in genere in formato APS-C e sempre più frequentemente in formato "full frame" ovvero delle stesse dimensioni del classico 24x36mm della fotografica chimica tradizionale) e una flessibilità maggiore rispetto al settaggio dei parametri alla base dello scatto.

La campagna fotografica deve essere eseguita, così come per la calibrazione, utilizzando un cavalletto, inoltre è meglio effettuare le prese tramite comando a distanza, onde evitare eventuali movimenti della fotocamera che abbasserebbero la nitidezza del fotogramma. Le foto devono essere eseguite in modo tale che ciascun lato di un oggetto venga documentato in modo da permettere il riconoscimento di un numero minimo di tre punti omologhi fra una immagine e la successiva. È evidente che il numero di punti da individuare per una restituzione di qualità deve essere superiore

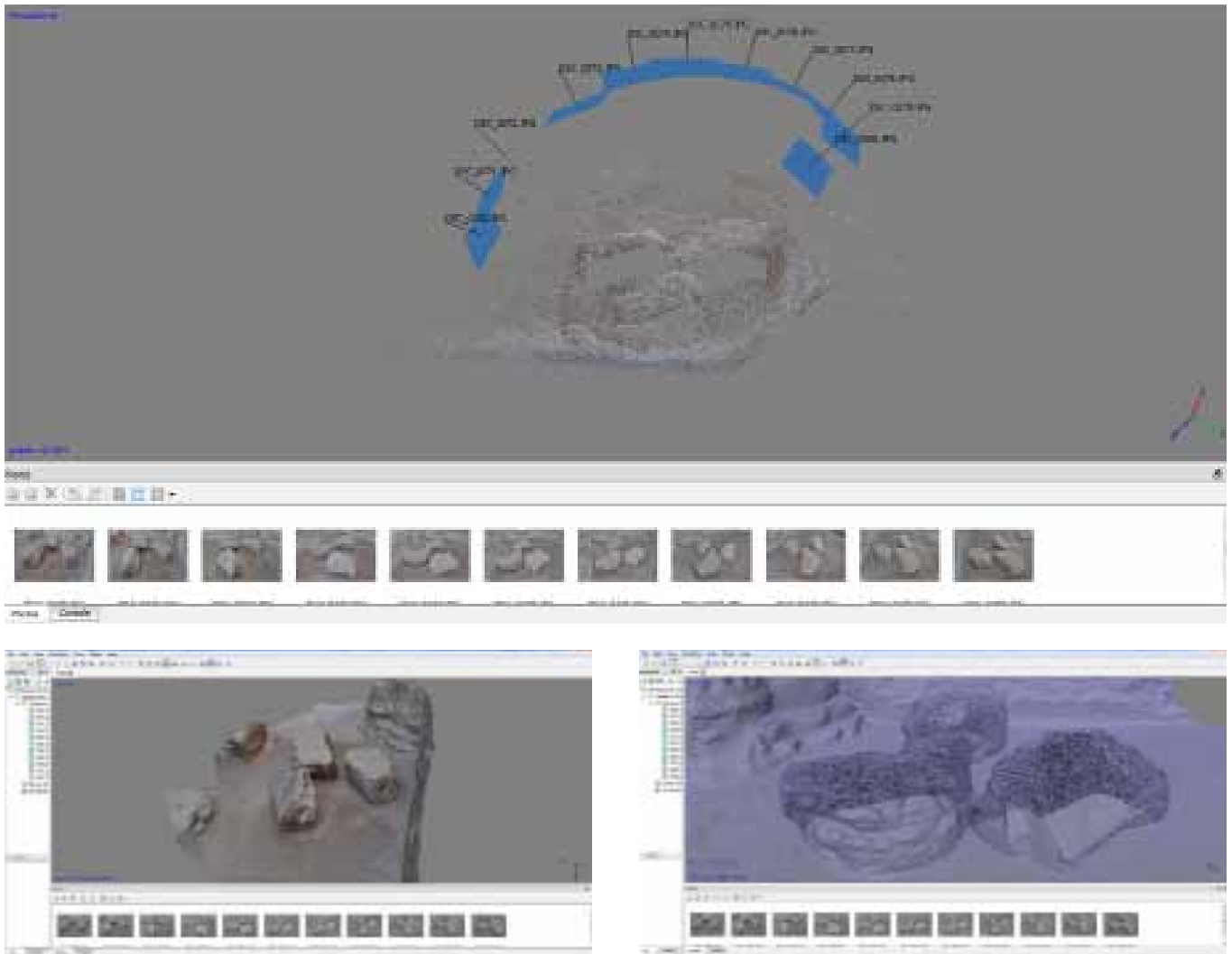


Nelle immagini sopra e nella pagina affianco gli scatti fotografici e l'elaborazione per la documentazione di resti archeologici di capitelli ubicati nella terrazza inferiore del Palazzo di Erode del sito di Masada.

rispetto ai punti strettamente indispensabili, non solo per ottenere una documentazione più ampia dell'oggetto rilevato, ma anche per poter ripartire l'errore su un numero maggiore di punti. Dato che le distorsioni maggiori dei fotogrammi si presentano in prossimità dei bordi è buona regola cercare di mantenere il soggetto delle fotografie nel centro dell'immagine affinché i punti omologhi rientrino nell'area affidabile per le successive fasi di riconoscimento.

La campagna fotografica vera e propria, come si è precedentemente accennato, va eseguita in parallelo ad

un rilevamento diretto o strumentale di alcune delle misure fondamentali che caratterizzano l'oggetto studiato. Tali misurazioni, nel caso di un rilevamento topografico, possono essere impiegate per referenziare rispetto ad un'unica terna cartesiana, non solo le foto, ma anche ulteriori rilevamenti (tradizionali o strumentali): questo aspetto è assai importante dato che permette l'integrazione della fotomodellazione con altre metodologie di acquisizione dei dati che possono alla fine convivere in un unico ambiente 3D.

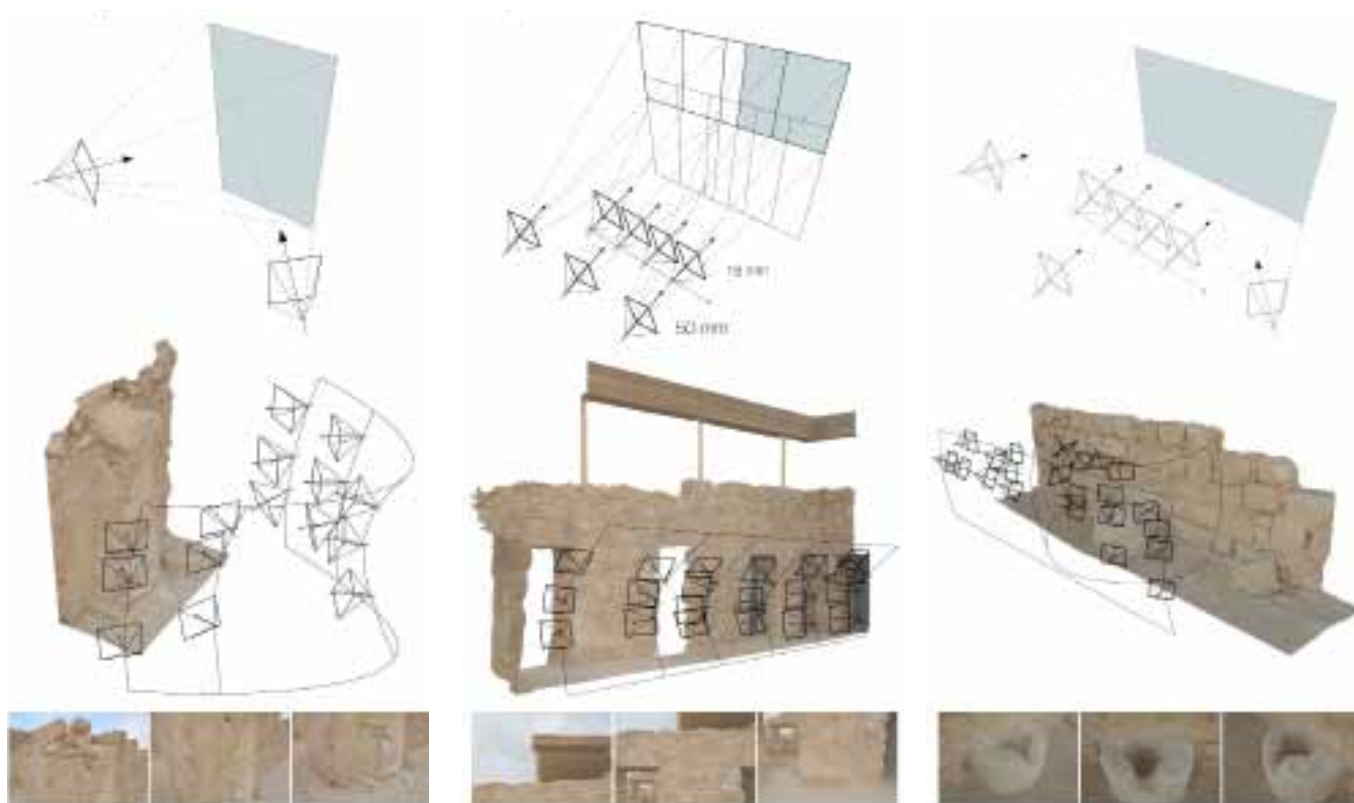


3.3 Rilievo fotogrammetrico del sito archeologico di Masada

I recenti progressi tecnologici nel campo delle fotocamere e dell'elaborazione basata sul cloud fanno sì che questo tipo di attività possa oggi essere svolta a diversi livelli, da quello basilare a quello avanzato, sfruttando le potenzialità offerte dalla fotocamera stessa e da alcuni programmi che ne applicano i principi di corrispondenza tra punti. Software open source e software proprietari, permettono di applicare in maniera estremamente intuitiva e rapida la tecnologia adottata nel campo della fotografia tridimensionale, utilizzando una tecnica che rimanda al processo di reverse modeling, per triangolare le misurazioni all'in-

terno di uno spazio 3D. Questi software individuano punti di riferimento comuni tra le diverse fotografie dell'oggetto rilevato.

Quindi partendo dall'oggetto reale e scattando una serie di fotografie in modo tale che ogni punto dell'oggetto sia presente in almeno tre foto, tramite regole di triangolazione cloud computing è possibile conoscerne l'esatta posizione di un determinato punto dell'oggetto all'interno dello spazio tridimensionale.

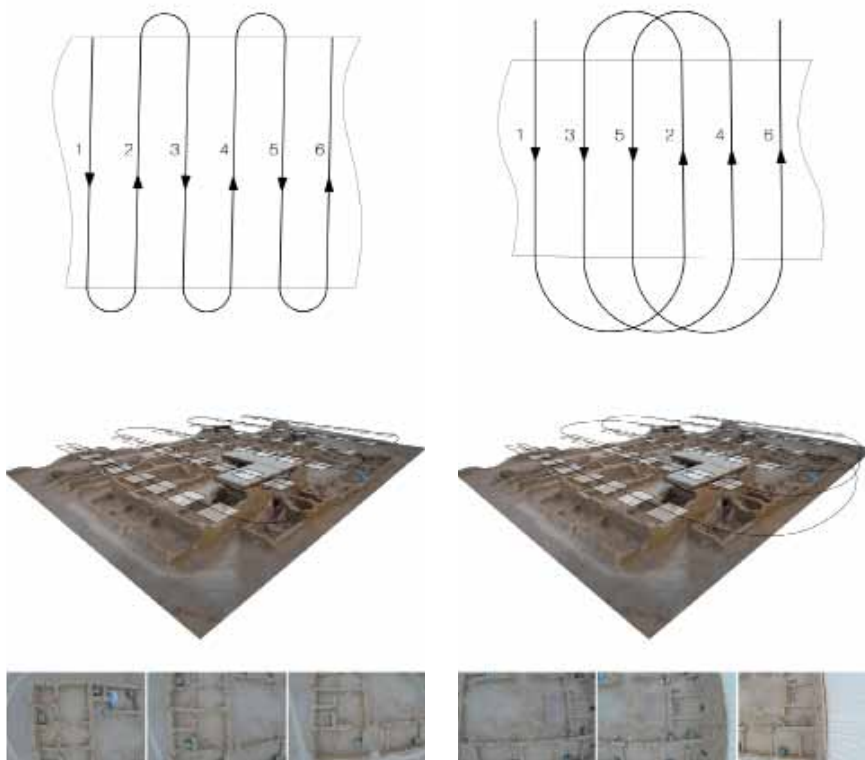


3.4 La ripresa fotografica

Uno dei principali fattori che incidono sull'esito finale del modello 3D riguarda la ripresa fotografica. Esattamente come avviene per un rilievo laser scanner, la posizione dello strumento (in questo caso la fotocamera) incide sull'acquisizione dei dati finalizzati alla completa copertura dell'oggetto. Per questo, per strutturare una buona ripresa fotografica è necessaria una preliminare organizzazione di quelle che saranno le operazioni necessarie alla corretta acquisizione del dato. Durante una preventiva ricognizione del luogo è necessario comprendere le caratteristiche formali e spaziali dell'ambiente che si va ad acquisire foto-

graficamente, quali siano gli elementi che per le loro qualità decorative o strutturali meritano un'attenzione maggiore di altre e quali siano gli ostacoli alla corretta disposizione della camera intorno all'oggetto.

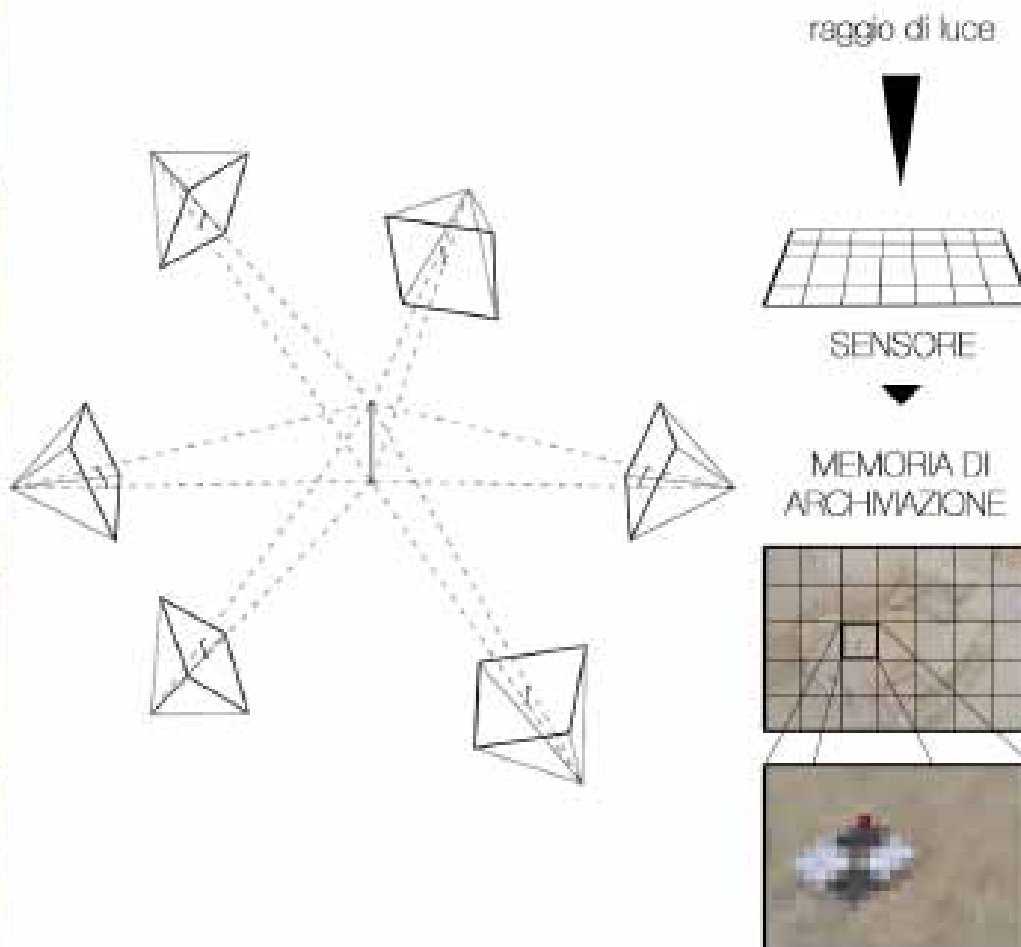
Solo dopo la fase di ricognizione è possibile progettare quelli che saranno i movimenti e gli scatti attorno ai singoli oggetti per acquisirli totalmente e documentarne interamente la superficie. Un secondo aspetto che deve emergere dal sopralluogo è il fattore di illuminazione dell'ambiente: per eseguire una campagna fotografica con esposizione omogenea è fondamentale analizzare a quale ora del giorno concentrare una parte



Nelle cinque immagini sono schematizzati le tecniche di ripresa fotografica.

Le prime tre sono riferite a riprese terrestri, le altre due sono riferite a riprese aeree a bassa quota.

Da sinistra: esempio di rilievo ad assi convergenti, ad assi paralleli, misto, strisciate continue e strisciate alternate.

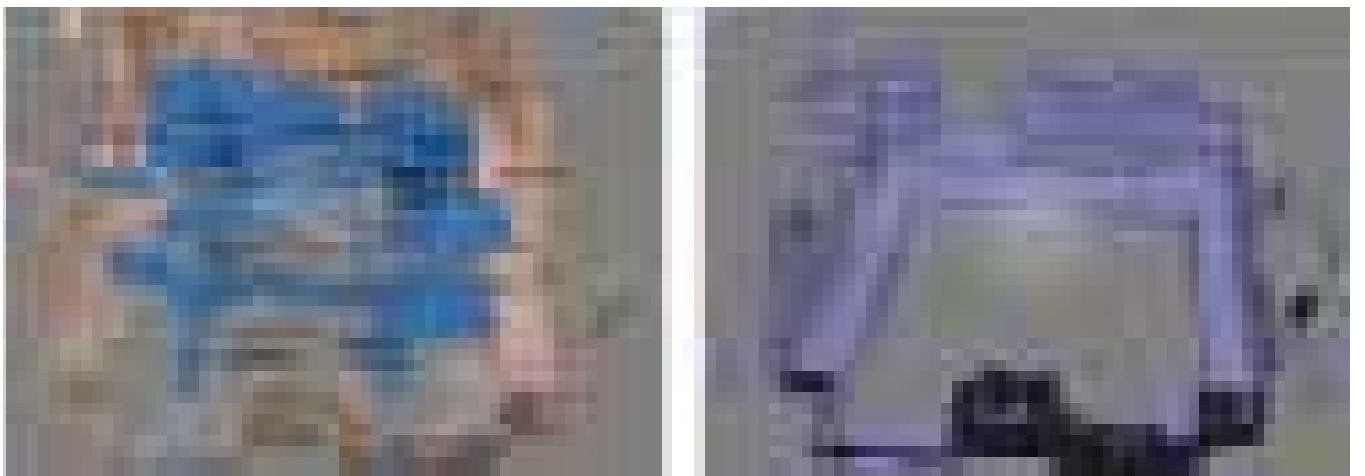
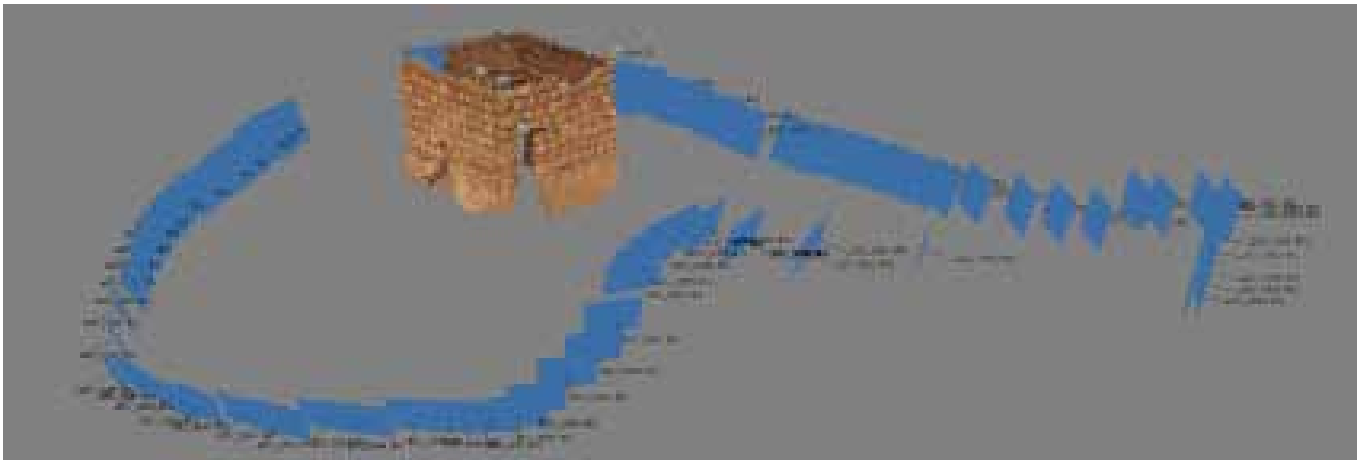


Nelle immagini, riferite al rilevamento fotogrammetrico dei resti del basamento di una colonna e di una vasca di purificazione, ubicata nella corte interna del Palazzo Occidentale di Masada. Sui resti archeologici sono stati applicati target bianco/nero per il riconoscimento e allineamento degli scatti, in fase di generazione del modello tridimensionale. Di seguito, schema delle prese fotografiche ed esemplificazione del processo di acquisizione.

della ripresa e a quale ora è necessario tornare per eseguire l'altra. Le fotografie devono essere il più omogenee possibili per non alterare l'immagine cromatica del manufatto e non devono presentare ombre nette sulle superfici. Per questo buona parte della ripresa fotografica si è concentrata durante la prima mattina, quando l'inclinazione dei raggi solari provenienti dal versante opposto rispetto all'ambiente oggetto di studio consentiva una ripresa omogenea di tutti gli elementi dello spazio, in modo da ottenere un'ombreggiatura costante, criterio indispensabile per la successiva

fase di ricostruzione e analisi del dato dal punto di vista del materiale costituente.

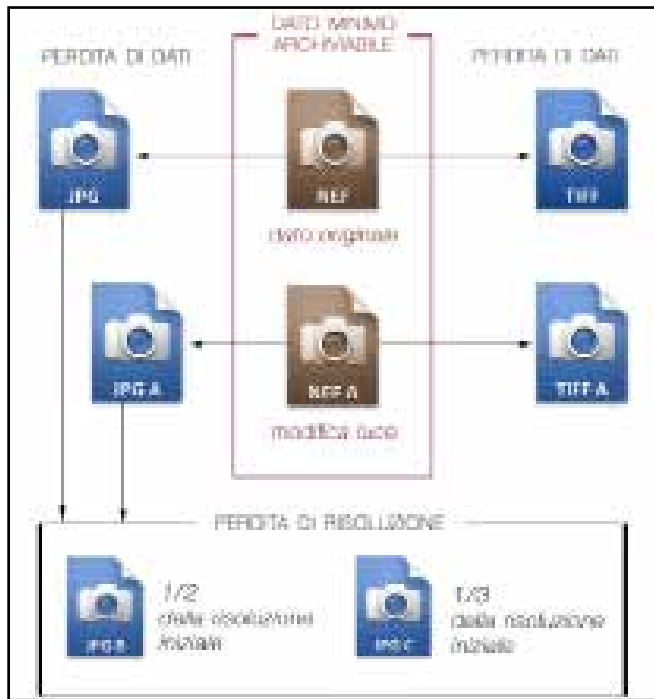
Durante l'esperienza di rilievo del complesso del Palazzo di Erede, la ripresa laser scanner è stata accompagnata da quella fotografica, sia finalizzata alla realizzazione di elaborati descrittivi dello stato di fatto delle superfici lapidee del manufatto, sia finalizzata alla sperimentazione delle procedure di modellazione automatica, concentrando l'attenzione, durante la prima missione, soprattutto sulla sala delle colonne, collocata nella terrazza situata al livello più basso dell'al-



Nelle immagini prima fase della costruzione del modello tridimensionale. I rettangoli blu siboleggiano la posizione delle fotografie.

topiano roccioso.

La complessità spaziale e la presenza di ambienti caratterizzati da elementi colonnari di cui restano porzioni di capitelli o basamenti per buona parte ancora in buone condizioni, ha portato ad una consapevolezza comune delle potenzialità offerte in questa missione di ricerca dalla strumentazione a nostra disposizione e dalla possibilità, in genere non troppo frequente, di poter confrontare gli output provenienti dai due sistemi di rilievo molto diversi.



Nell'immagine in alto si schematizzano i formati di acquisizione e archiviazione delle immagini.

Nell'immagine a destra le tre caratteristiche fondamentali dell'immagine. Infatti, è importante prima di procedere all'acquisizione dell'intera campagna fotografica, calibrare la camera secondo dei parametri specifici, per un'acquisizione ottimale. Successivamente sarà possibile apportare delle variazioni migliorative, grazie al formato Raw.

Il Raw (in inglese crudo, grezzo) consiste in un particolare metodo di memorizzazione dei dati descrittivi di un'immagine. Viene usata per non avere perdite di qualità della registrazione su un qualsiasi supporto di memoria, rispetto ai segnali catturati dal sensore e successivamente composti per interpolazione dal processore d'immagine della fotocamera nelle sue tre componenti fondamentali RGB (Red, Green, Blue).

Lungo tutte le superfici lapidee sono state scattate una serie di fotografie, in modo che per ogni elemento decorativo in sporgenza rispetto alla superficie gli scatti seguissero una semicirconferenza di raggio regolare e costante con centro sull'asse centrale dell'oggetto, in modo da mantenere la stessa distanza tra la fotocamera e l'oggetto da riprendere interamente, senza lasciarne parti occluse.

Un principio analogo è stato seguito per acquisire fotograficamente i resti archeologici di elementi archi-



tettonici come capitelli e basi di colonna, situati nei pressi della loro originale collocazione.

Per la loro collocazione relativamente distante rispetto alla parete, è stato possibile rilevarle nella loro totalità per descriverne totalmente la geometria. Un intervallo regolare di 10° circa è stato tenuto per ogni coppia di scatti in successione, considerando un minimo di 20 fotografie per ogni oggetto tridimensionale fotografato.

Con questi criteri si ottiene una sovrapposizione di superfici tra ogni coppia di scatti decisamente notevole e favorevole per la fase di postproduzione, tali che il programma sul quale vengono successivamente caricate riesce con facilità a riconoscere tutti i punti in comune.

L'alto livello di affidabilità richiesto in ambito archeologico ha costretto a predisporre numerose riprese fotografiche a ciascuno dei dettagli lapidei, implicando una duplice accortezza nell'esecuzione: la ripresa è avvenuta a due diverse distanze dall'oggetto e con almeno due differenti impostazioni di esposizione della fotocamera per lo stesso scatto. Scattare ogni fotografia due volte a distanza diversa può agevolare l'individuazione dei punti comuni tra i singoli scatti, mentre variare l'esposizione può risultare utile per evidenziare con maggior contrasto i dettagli dei bassorilievi o di altri elementi decorativi.

Così come affrontato per il rilievo del Palazzo di Erode nel corso della missione 2013, anche nella missione 2014 alla campagna di rilievo laser scanner è stata affiancata la metodologia di acquisizione dati structure from motion, ovvero un sistema di rilevamento per il quale da una sequenza fotografica viene generato direttamente un modello 3D altamente affidabile e dotato delle informazioni materiche provenienti dalle fotografie. Le modalità con le quali vengono acquisiti i manufatti architettonici variano in funzione delle condizioni al contesto (meteorologiche e di accessibilità in prossimità dell'oggetto), e della morfologia dell'oggetto stesso.

A differenza dalla prima missione, dove l'oggetto, per quanto articolato fosse, era comunque tutto concentrato in un sistema morfologicamente racchiuso dalla conformazione dell'altopiano, l'area del sito analizza-



3 scatti fotografici dei 327 appartenenti al rilievo fotogrammetrico del Palazzo Occidentale, attraverso utilizzo di GoPro HERO+3 installata su drone.

Il rilievo fotogrammetrico terrestre del Palazzo Occidentale ha visto l'utilizzo di 7020 scatti.

ta il secondo anno, per la vastità presentata, non ha consentito di acquisire interamente la superficie in un unico progetto di sequenza fotografica. In questa fase sono stati acquisiti tramite fotogrammetria 3D da terra i complessi che potevano essere considerati nuclei a se stanti (come la chiesa bizantina, il palazzo del Capitano e il Palazzo Occidentale) mentre tramite fotogrammetria 3D aerea è stata acquisita l'ampia superficie di calpestio dell'altopiano sulla quale tali edifici sono dislocati.

L'acquisizione degli ambienti interni ed esterni degli edifici presenti sul sito è stata finalizzata alla completa copertura fotografica di tutte le superfici del manufatto, dalla singola muratura all'inquadramento generale

(che comprende in una ripresa di più superfici murarie insieme).

Comprendere più superfici all'interno di una stessa sequenza fotografica consente di ottenere in postproduzione dati un modello più generale del complesso e di controllare maggiormente le rotazioni relative tra i singoli setti murari. In questo modo il programma di fotomodellazione sarà facilitato nel riconoscere punti omologhi tra modelli generali e porzioni più dettagliate degli stessi, e pertanto la fase di postproduzione non necessiterà di particolari accortezze, come ad esempio il dover riconoscere manualmente punti corrispondenti tra modelli, quali target o geometrie stesse dell'architettura⁴.



Nell'immagine la pianificazione del rilievo fotogrammetrico. I colori rappresentano la suddivisione in UT dell'intero edificio, invece i numeri rappresentano la nomenclatura di ogni singolo ambiente e dettaglio nel caso che il numero è preceduto dalla lettera "P".

Per esempio, per il Palazzo Occidentale, la cui finalità è la sperimentazione di una metodologia che utilizza totalmente la fotografia come strumento primario del rilievo per la realizzazione dei modelli tridimensionali, la fase dell'acquisizione ha seguito un cronoprogramma ben preciso. L'intera acquisizione fotografica è avvenuta nell'arco di 5 giorni: il lavoro complessivo è stato suddiviso in macroattività che, da un livello più generale dei primi giorni al livello di dettaglio della fase finale, potessero ottenere la quantità e la qualità necessaria dei dati per la formazione dei modelli.

La divisione delle porzioni degli ambienti per la corretta gestione dell'archivio non ha presentato particolari problematiche: il Palazzo ha una forma regolare, le stanze sono ben definite, e la possibilità di effettuare sequenze fotografiche dal perimetro esterno a livello rialzato rispetto al piano di calpestio aumenta la possibilità di ottenere modelli completi e esaustivi.

Le problematiche riscontrate sono dovute al gran numero di turisti che durante le ore della giornata affollavano il sito archeologico, compromettendo la qualità del prodotto della ripresa. Altro fattore sono le condizioni di luce: questo parametro va attentamente analizzato in loco e, a seguito di una ricognizione diurna, va stabilito il momento migliore della giornata per riprendere ciascuna porzione muraria non esposta alla luce diretta del sole.

Una buona e omogenea condizione di luce sulle sequenze fotografiche finalizzate a generare modelli garantisce di ottenere elaborati in cui la componente materica risulti ottimale, e in cui sia possibile affrontare una serie di considerazioni sull'affidabilità legate allo stato di fatto dell'oggetto.

Al termine della giornata della campagna di acquisizione è stato verificato il dato caricando le fotografie scattate durante il giorno sul software di elaborazione dati (Agisoft Photoscan) per verificare il corretto allineamento del modello.

L'unione dei singoli modelli è stata poi eseguita a posteriori, date le tempistiche elevate di elaborazione dati. I tempi di processamento e la pesantezza dei file sono purtroppo un inconveniente di questa metodologia di rilievo. È importante stabilire a priori quale sarà

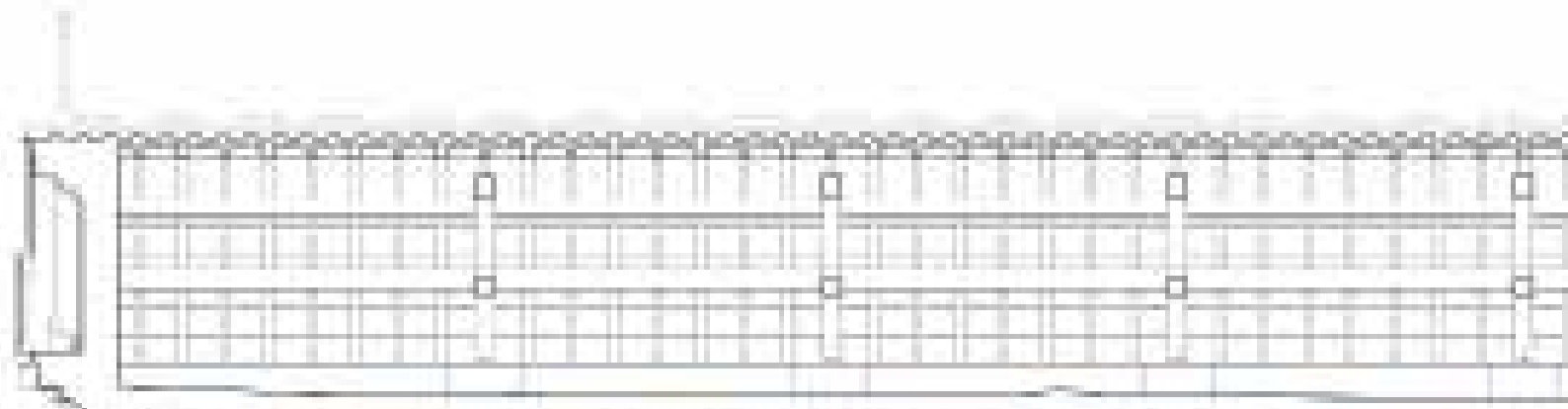
l'output finale del modello, ovvero quale è il fine della restituzione del manufatto. Questo è fondamentale per ottimizzare i tempi di elaborazione e finalizzare la gestione del dato ad uno scopo specifico.

Inoltre è importante sottolineare come, nonostante sia stata utilizzata la stessa metodologia di rilievo per la fase di acquisizione in entrambe le missioni, le sperimentazioni effettuate attraverso software specifici capaci di elaborare il dato proveniente dalle scansioni o dai modelli fotografici abbiano portato a metodologie di gestione, spinte da differenti finalità, molto diverse tra loro.

La metodologia *shape from motion* è stata ampliata all'intera area dell'altopiano da rilevare, compresi gli edifici ed il piano di calpestio di una buona porzione della superficie. La possibilità di valutare i risultati ottenuti dalla prima campagna del 2013 ha permesso al team di strutturare una metodologia di rilievo ultraspeditiva basata sul solo utilizzo dell'immagine fotografica e di migliorarla nel corso della missione 2014.

Note

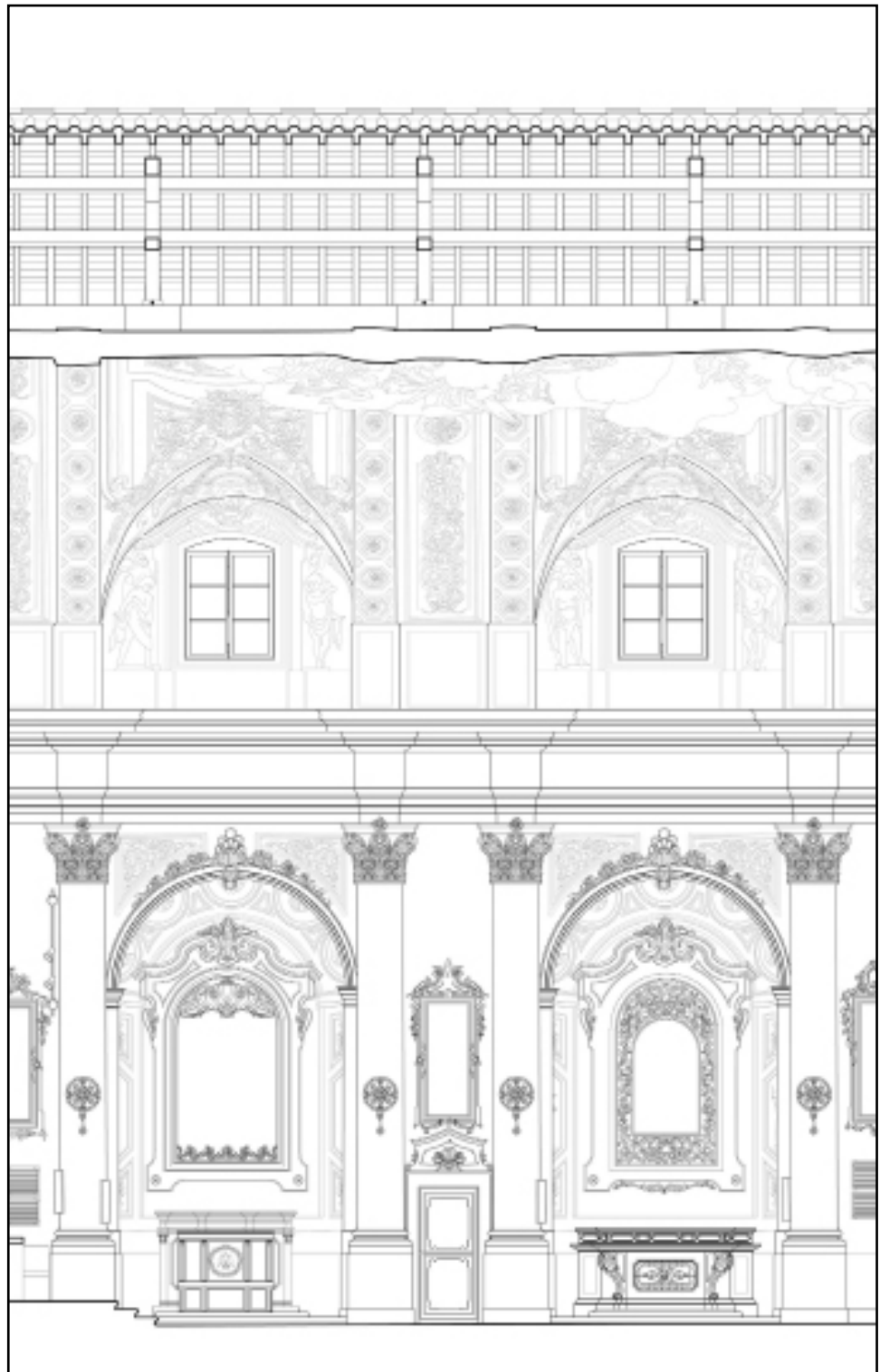
1. Mikhail, Bethel, McGlone 2001.
2. Gruen, Remondino, Zhang 2004.
3. Bitelli, 2002.
4. Picchio, 2014.





PARTE III

LA RAPPRESENTAZIONE DELL'ARCHITETTURA



Rappresentazione bidimensionale della sezione longitudinale BB' della Chiesa dei SS. MM. Donato e Ilarino a Camaldoli (AR).

Il rilievo è stato restituito attraverso la lucidatura delle sezioni ricavate dalla nuvola di punti e dettagliato attraverso la restituzione fotogrammetrica.

CAPITOLO 4

La rappresentazione bidimensionale: prodotti vettoriali e raster

La corretta gestione delle fasi operative di un rilievo digitale rappresenta un aspetto fondamentale per la creazione di elaborati grafici bidimensionali affidabili e utili alla lettura completa di un oggetto architettonico. Per fasi operative si intendono tutte quelle attività che in un primo tempo sono connesse all'acquisizione strumentale e quindi alla creazione della banca dati tridimensionale e, successivamente alla elaborazione grafica o vettorializzazione degli elementi architettonici e delle sezioni che vogliamo restituire in forma bidimensionale dell'oggetto d'indagine¹.

Il risultato che si ottiene da un rilievo laser scanner permettere di avere un controllo dimensionale e morfologico dell'oggetto in uno spazio virtuale tridimensionale; spesso però la grande quantità di dati ottenuti è difficilmente gestibile per una sintesi grafica bidimensionale che individui solo quello che serve rappresentare in funzione alle esigenze ed alle finalità del rilievo stesso. Dopo aver registrato una nuvola di punti, integrando tutte le scansioni eseguite per ottenere la copertura desiderata dell'intero oggetto da rilevare, quello che si presenta nell'ambiente virtuale trasmette l'impressione di poter ottenere un totale controllo dell'oggetto architettonico; tuttavia è necessario conoscere le strategie operative e le metodologie necessarie per mantenere questo controllo fino al completamento della fase di restituzione grafica. La tecnologia Leica Geosistem in sinergia con Autodesk fornisce alcuni strumenti utili a questo tipo di operazioni: è possibile infatti aprire la nuvola di punti, ottenuta dalla registrazione delle singole scansioni eseguite, direttamente in ambiente CAD. Questa procedura permette, nelle fasi di restituzione e di discretizzazione dei dati, di effettuare letture con minor grado di approssimazione e di ottenere quindi restituzioni maggiormente affidabili o che comunque siano in grado di mantenere un grado di affidabilità compatibile

con quello delle sorgenti. Per una maggiore affidabilità del rilievo è necessario mantenere una congruenza fra l'errore che si produce durante la fase di acquisizione, (sia l'errore strumentale che di messa a registro delle scansioni che rientra in una tolleranza definita dalle caratteristiche dello strumento e dalle impostazioni delle scansioni stesse) e l'errore di interpretazione del dato che si produce nella relativa fase di restituzione, interpretando correttamente la morfologia dell'oggetto rilevato ora visualizzato come una nuvola di punti.

Nella restituzione del rilievo il problema del passaggio di scala viene affrontato solo nella successiva fase di stampa mentre, durante tutta la fase di restituzione vettoriale, l'oggetto viene elaborato concettualmente in scala 1:1 mantenendo un'assoluta affidabilità metrica sul disegno nel formato .dwg.

La gestione del livello di dettaglio richiesto, ovviamente relazionata al livello di densità della maglia dei punti acquisiti strumentalmente, è demandata totalmente al disegnatore che, libero di muoversi all'interno dell'ambiente dinamico della nuvola di punti, è costretto a mantenere una coerenza grafica funzionale alle possibilità di stampa richieste dalla scala rappresentativa del disegno o alle specifiche esigenze grafiche richieste dal rilievo. Con la possibilità di gestire successivamente differenti scale di rappresentazione senza modificare l'oggetto sorgente, che nel nostro caso è individuato dalla nuvola di punti stessa e non da una immagine statica di quest'ultima definita ed elaborata a priori in funzione di una sola possibilità di scala rappresentativa, questa procedura conferma un vantaggio procedurale nella costruzione di una coscienza grafica fondata nel disegno.

4.1 La rappresentazione bidimensionale dell'architettura e dell'archeologia

In architettura con il termine “rappresentazione” si fa riferimento ad un insieme di documenti aventi lo scopo di mostrare e far comprendere il bene oggetto di studio (Saint Aubin, 1999). Questo tipo di rappresentazione si presenta usualmente sotto un aspetto particolarmente sintetico che ha lo scopo di facilitare la percezione istantanea dell'oggetto.

E' sicuramente difficile poter catalogare e descrivere tutte le forme adottate nella rappresentazione architettonica, dal momento che questa comprende numerose forme espressive, alcune non propriamente di interesse per il rilevatore, come testi letterari e relazioni, pitture, incisioni, ed altre che invece sono di interesse per chi si occupa di rilievo, come stampe, piante, prospetti, raddrizzamenti e ortofoto, fino a veri e propri modelli tridimensionali in scala.

Rispetto al disegno di progetto, che mostra un universo ideale e immaginario, in quanto esprime un'idea non ancora concretizzata, la rappresentazione manifesta lo stato di fatto di un edificio, di un'area archeologica o di un reperto e quindi tutta l'imperfezione che c'è in un atto costruito, che in sé contiene le modificazioni, i rimaneggiamenti e i danni impressi dal tempo e dall'uomo.

Questo non deve essere dimenticato da chi si occupa di rilievo, a maggior ragione nell'ambito dei Beni Culturali; la rappresentazione costituisce infatti la fase ultima e fondamentale dell'intero processo, che parte dalla pianificazione del rilievo stesso e giunge alla generazione dei prodotti finali, che devono essere mirati, nella tipologia e nelle caratteristiche, allo scopo per cui il rilievo è stato condotto.

Quanto detto aiuta a comprendere perché la fotogrammetria abbia da sempre un ruolo fondamentale e indiscusso come moderna e rigorosa tecnica di rilievo nel campo dei Beni Culturali; infatti il documento che si

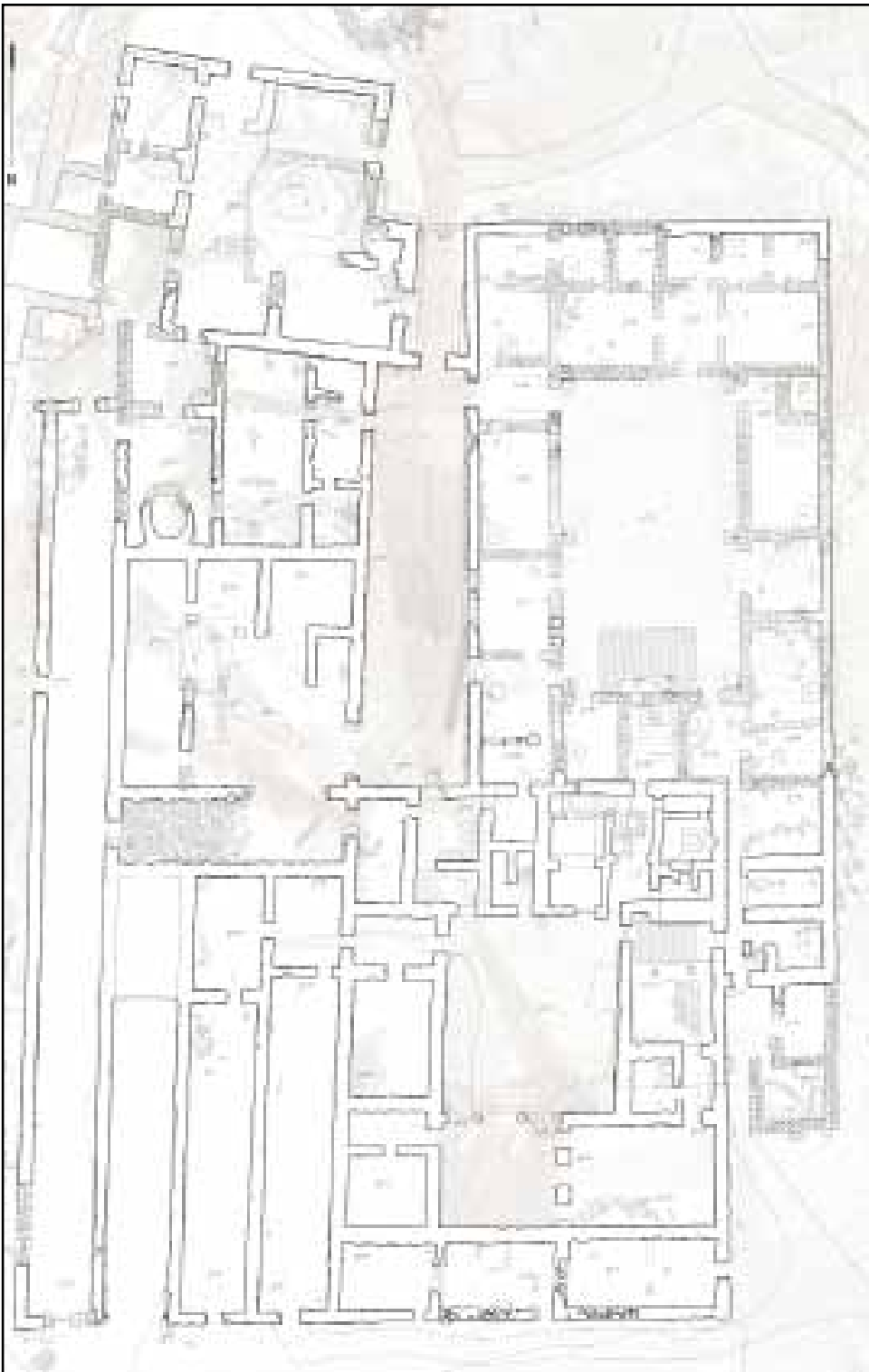
deve redigere come risultato del rilievo deve non solo fissare le forme dell'oggetto, le sue dimensioni e proporzioni e dichiarare le molteplici relazioni che legano tra loro le diverse parti dell'oggetto e che le riuniscono in un unico organismo, ma deve anche metterne in luce i dettagli dello stato di fatto e diagnosticarne il degrado, per poter chiamare in causa gli strumenti di intervento per la salvaguardia.

Dal punto di vista concettuale, il vantaggio che la fotogrammetria offre nella rappresentazione dei Beni Culturali è di unire la fotografia con il disegno metrico accurato.

Infatti, rappresentare l'architettura attraverso un rilevamento affidabile significa coglierne gli aspetti geometrico-morfologici e trasferirli all'interno di un sistema di rappresentazione spaziale bidimensionale e tridimensionale, discretizzando il dato a seconda del fine stesso della rappresentazione.



Curve di livello estrapolate dal modello tridimensionale mesh, del Palazzo Occidentale di Masada.



Rappresentazione bidimensionale della planimetria del Palazzo Occidentale del sito di Masada.

Il rilievo è stato restituito attraverso la creazione di piani di sezione del modello mesh realizzato attraverso il rilievo fotogrammetrico aereo a bassa quota.

La restituzione di dettaglio degli elementi lapidei e delle creste è stata realizzata attraverso la lucidatura della nuvola di punti ed il rilievo fotogrammetrico terrestre di dettaglio.

4.2 La restituzione vettoriale

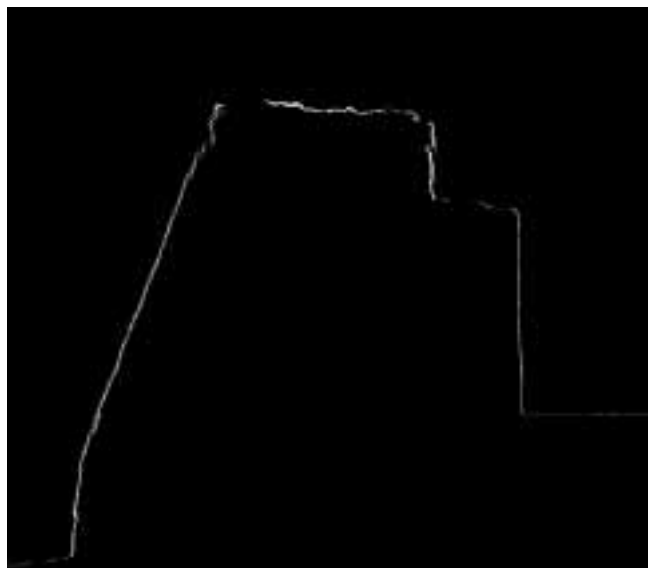
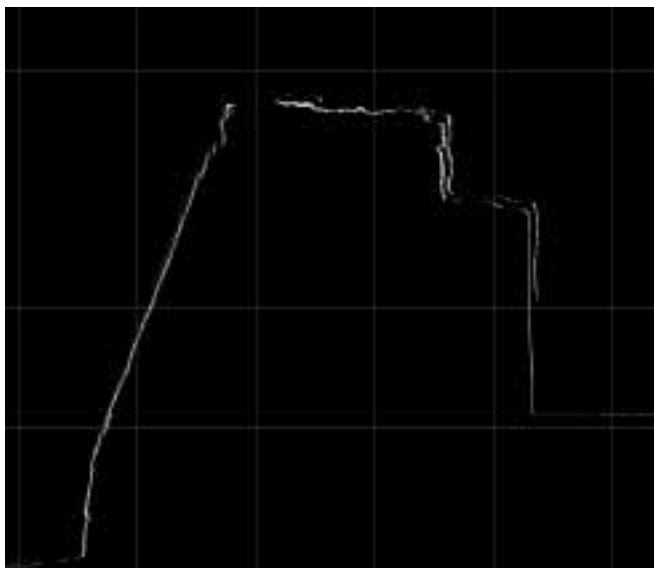
La scelta di rilevare la Chiesa dei S.S. M.M. Donato e Ilarino del Monastero di Camaldoli a Camaldoli e il Palazzo di Erode del Sito Archeologico di Masada in Isdraele, utilizzando tecnologia laser scanner ha permesso di acquisire un'elevata quantità di informazioni sulle condizioni spaziali del monumento e del relativo contesto in un tempo relativamente breve, demandando alla successiva fase di elaborazione dei dati, le considerazioni più propriamente connesse con il disegno e la rappresentazione del sistema architettonico.

Questioni come, ad esempio, la definizione della scala grafica opportuna per lo sviluppo di elaborati descrittivi statici, in grado di inquadrare le complessità del sistema architettonico e, allo stesso tempo, esprimere le qualità

materiche delle architetture e delle decorazioni presenti, così come il posizionamento idoneo allo scopo dei piani di sezione, sono aspetti che hanno riguardato la progettazione del rilievo e la scelta delle procedure messe in atto nella post produzione per l'elaborazione finale dei dati acquisiti.

Prima di avviare le operazioni di restituzione del rilievo, in ambiente AutoCAD, si procede con alcune operazioni preliminari sulla nuvola di punti, all'interno del software Cyclone, tra le quali particolare attenzione va prestata al controllo finale dell'allineamento delle singole scansioni ed alla pulitura della nuvola da punti di elementi estranei all'architettura rilevata.

Il controllo di eventuali errori di allineamento delle



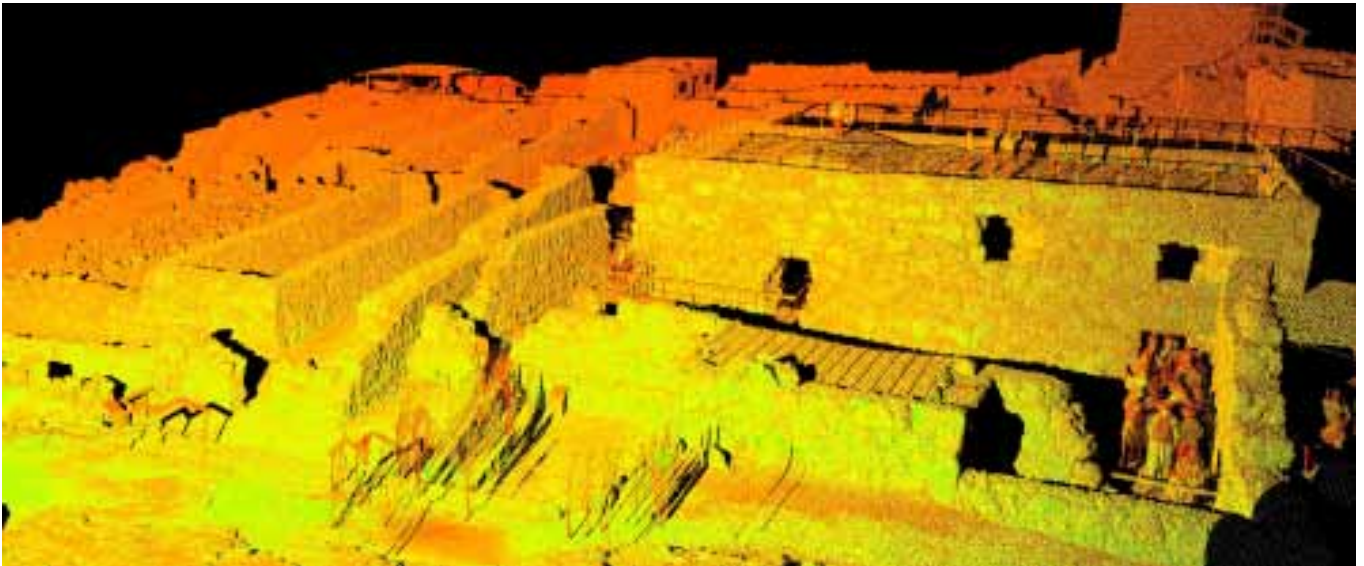
Nelle immagini sotto verifica manuale dell'errore: in Cyclone viene inserito un piano sezionante la nuvola per controllare l'eventuale rototraslazione delle scansioni. Nella prima immagine si può osservare l'errore di allineamento che viene corretto effettuando una nuova registrazione. Nella seconda immagine la stessa porzione di punti allineati correttamente.

scansioni è la prima operazione effettuata sulla nuvola di punti, successivamente alla registrazione delle singole scansioni. Questa operazione, che in parte viene effettuata anche durante tutto il processo di registrazione, si configura come un ulteriore ma necessario controllo di verifica sull'affidabilità del rilievo finale prima di procedere con le operazioni che porteranno alla restituzione grafica del rilievo. Per questa verifica, che risulta essenziale per ovviare a problemi di rototraslazione delle singole scansioni, si procede con la creazione di un piano di sezione che permette di osservare nel dettaglio quei punti che, prossimi a quest'ultimo, intendono descrivere una specifica superficie. Ponendosi con la vista perpendicolarmente alla superficie e parallelamente rispetto al piano di sezione è possibile verificare che la slice della sezione risulti unica, ovvero che le scansioni che compongono l'oggetto siano allineate in modo da non avere sfalsamenti delle medesime porzioni rilevate. Questa verifica è necessaria specialmente quando i target sono posizionati molto vicini allo strumento e, in caso di errori anche minimi sull'allineamento dei tar-

get, si generano poi sfalsamenti molto evidenti su quelle porzioni di ambiente rilevato che risultano invece più distanti ed al di fuori delle geometrie di controllo degli allineamenti stessi. Nel caso che si osservino problemi di questo tipo è necessario eseguire nuovamente la registrazione includendo nei parametri di allineamento, oltre ad i target, anche le superfici degli elementi architettonici.

Verificata la correttezza dei processi di registrazione si procede con una pulitura accurata della nuvola complessiva; in questa fase vengono eliminati dal database i punti ritenuti estranei (rumore), generati accidentalmente da oggetti mobili presenti al momento dell'acquisizione o da incidenze del raggio laser con condizioni di luce particolari.

Durante le fasi di rilievo del sito si è provveduto alla chiusura parziale al pubblico dell'area in prossimità della zona interessata dalla rilevazione, ciò nonostante durante le scansioni realizzate dalle posizioni più alte (ad esempio dalle coperture di alcuni edifici), sono state accidentalmente acquisite alcune siluette di visitatori in



Nella porzione in basso a destra dell'immagine si osserva la presenza di siluette estranee all'architettura. Queste siluette dovranno essere eliminate in maniera definitiva dalla singola scansione, per evitare che i punti che le descrivono, possano essere presenti nel database completo. Questo tipo di operazione è lunga e richiede molta precisione, infatti più questa operazione sarà precisa, minore sarà il disturbo sulla registrazione finale.

transito nelle aree prossime a quelle interdette. Queste, in viste ortogonali della nuvola utilizzate per la realizzazione del disegno bidimensionale, possono sovrapporsi all'architettura creando problemi di lettura e problemi di comprensione dell'oggetto rilevato.

Ultimata l'operazione di pulitura la nuvola di punti è pronta per essere utilizzata per la restituzione bidimensionale e tridimensionale del rilievo.

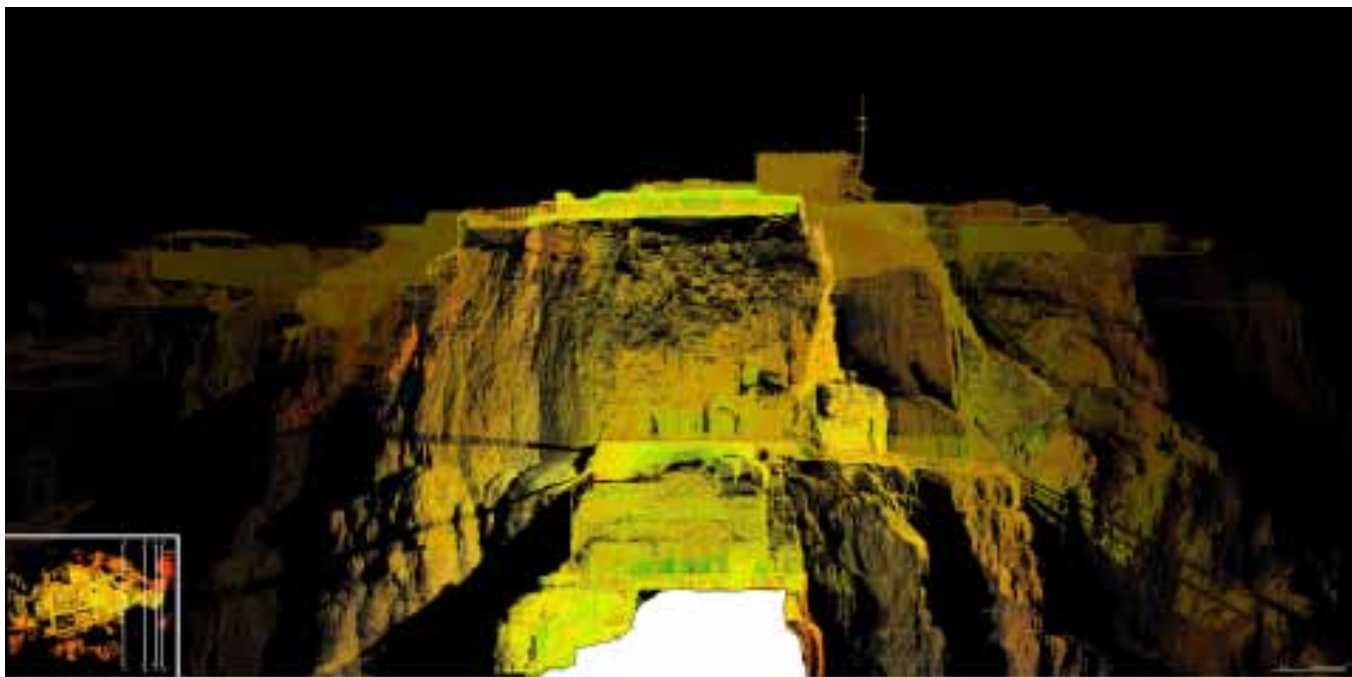
Tra le diverse modalità di gestione e di editing della banca dati tridimensionale in ambiente Cyclone, è possibile definire, mediante strumenti come limit box e l'inserimento di piani, visualizzazioni parziali della nuvola di e, di conseguenza, definire quali sezioni grafiche simulare per descrivere al meglio l'architettura.

La scelta del posizionamento dei piani sezionanti è fondamentale in quanto comporta una prima discretizzazione del dato acquisito nella costruzione di un sistema di riferimento attraverso il quale veicolare il racconto del luogo. La visualizzazione dell'ambiente virtuale in proiezione parallela (assonometria) consente poi di pro-

gettare la restituzione bidimensionale del rilievo dando la possibilità di comparare le diverse sezioni e optando per quelle che descrivono in modo più esaustivo la complessità del sito.

Nello specifico della porzione del sito studiato sono stati prescelti quattro piani di sezione orizzontali, posti a diverse quote, per poter descrivere compiutamente la complessità dello sviluppo planimetrico dell'area del palazzo; in particolare si è scelto di posizionare un piano per ognuna delle tre terrazze che degradano verso la vallata ed il quarto disposto in modo da sezionare gli ambienti dei depositi ed il complesso delle terme che giacciono sul pianoro superiore per la planimetria. Per il disegno degli alzati le sezioni verticali sono state impostate longitudinalmente e trasversalmente all'asse di sviluppo principale del complesso palazzo in maniera da ottenere la migliore visualizzazione possibile della maggior parte degli elementi presenti.

Qualora nello sviluppo della ricerca sia necessario realizzare altre sezioni per dettagliare in modo appropriato



Sopra e nella pagina a fianco, sezioni trasversali e sezione longitudinale del Palazzo nord di Erode a Masada.

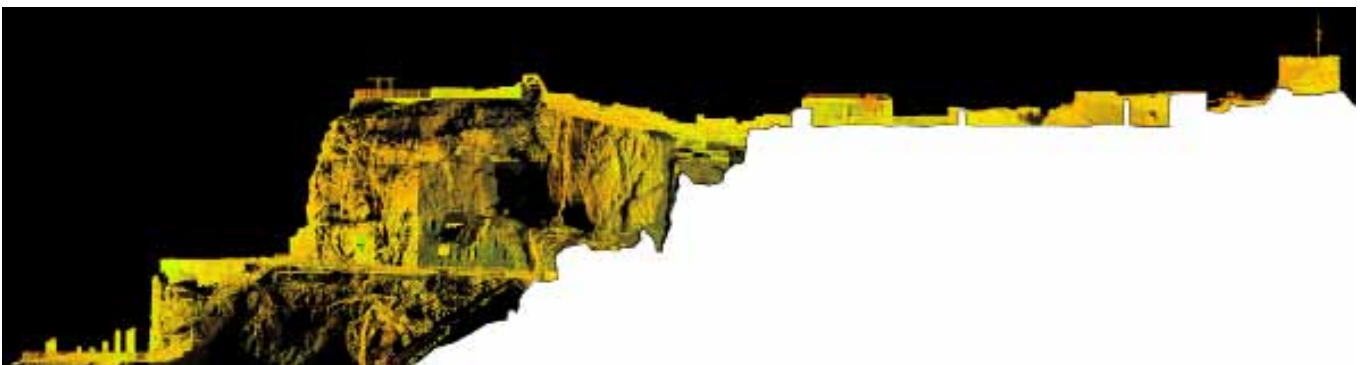
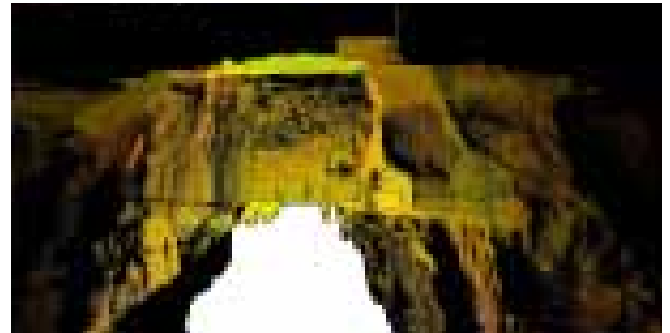
la documentazione di alcune aree e per incrementare la restituzione delle informazioni del sito, sarà possibile, in qualsiasi momento, individuare ed inserire nuovi piani sezionanti.

L'utilizzo del programma AutoCAD e del plug-in Cloudworx, che permette di importare la nuvola di punti in ambiente CAD, consente, in fase di restituzione, di effettuare interpretazioni sulle strutture in elevato valutando direttamente l'immagine generata dalle scansioni e interpretando le forme degli elementi rilevati dallo scanner.

La possibilità di importare il database direttamente in ambiente CAD permette di mantenere un'affidabilità del dato metrico compatibile a quella dell'oggetto rilevato, riducendo possibili errori dimensionali, dati ad esempio da processi di mosaicatura delle snapshot create in Cyclone, dove il riposizionamento delle diverse immagini che compongono la sezione viene effettuato manualmente utilizzando processi di sovrapposizione delle immagini che possono causare una, se pur mini-

ma, approssimazione del posizionamento e un inevitabile errore metrico.

Questi errori possono essere ovviati anche con l'utilizzo di metodi di estrapolazione dei dati con altre funzionalità. ad esempio la realizzazione di Ortho image, ma l'utilizzo di Cloudworx permette di lavorare in maniera più fluida e veloce all'interno del CAD mantenendo, in ogni fase della restituzione, permettendo un più affidabile controllo delle rispettive porzioni delle singole sezioni. Infatti, impostati i piani di sezione su Cyclone, impostata la vista ortogonale da restituire ed impostata la quantità di punti da visualizzare, le diverse sezioni, aperte all'interno del CAD, vengono visualizzate con la stessa definizione di dettaglio apprezzabile su Cyclone grazie alla rigenerazione dei punti della nuvola ogni qualvolta sia necessario visualizzarla in posizione diversa.



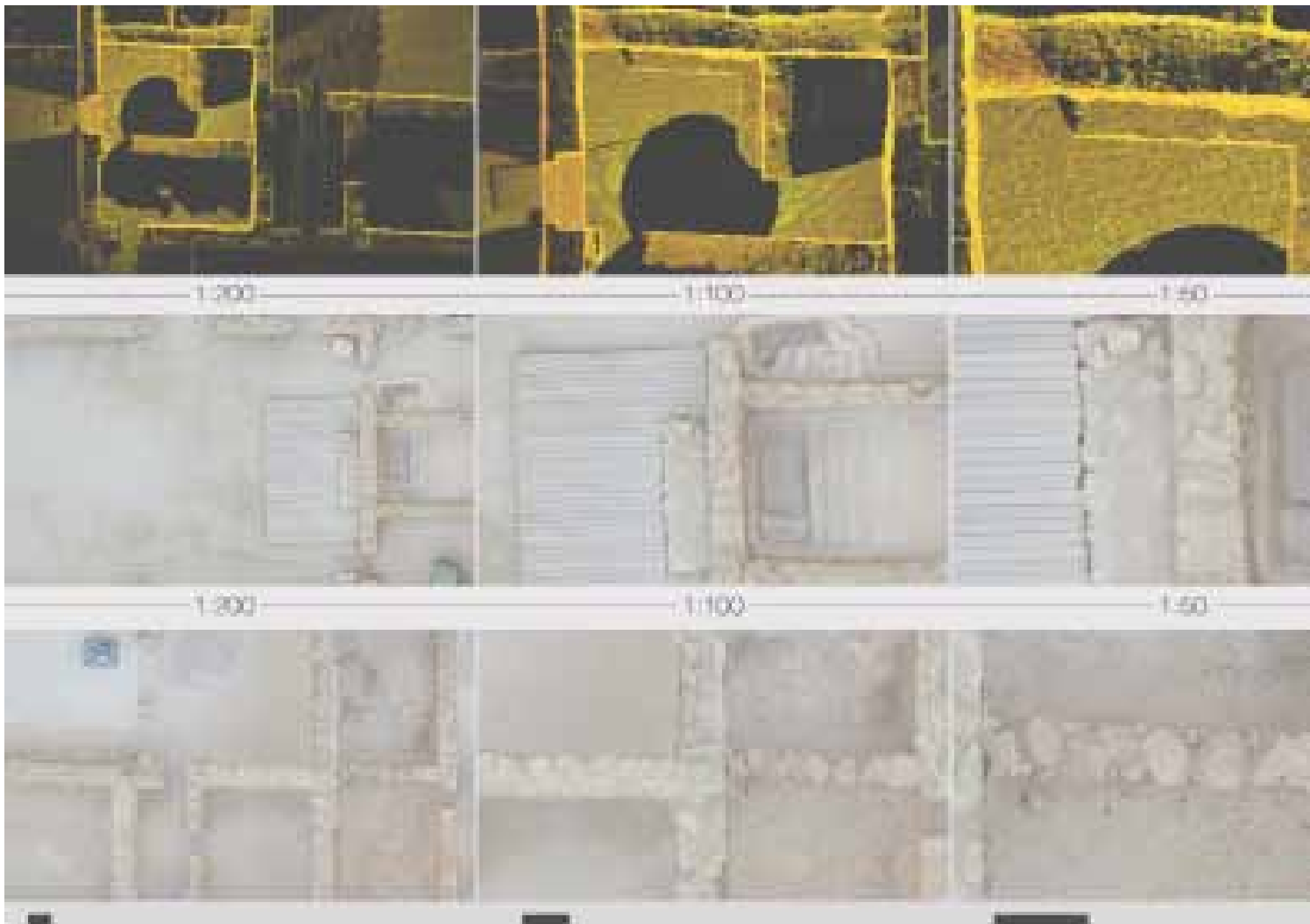
4.2.1 Le operazioni di lucidatura della nuvola di punti

Per discretizzazione del dato si intende la scelta degli elementi da rappresentare e del trattamento che viene applicato ad essi nel disegno, in funzione della scala di rappresentazione scelta per il rilievo.

Infatti, lo scopo del ripasso è di ottenere un disegno bi-

dimensionale nel quale ogni elemento dell'architettura oggetto di studio, sia riconoscibile, conservando le caratteristiche morfologiche proprie e quindi misurabile.

Con questa operazione si ottiene quello che viene chiamato "fil di ferro", ovvero un disegno formato da linee



che rappresentano tutte le parti che compongono l'architettura e che ne disegna i contorni lasciando in bianco ogni aspetto legato alla tessitura e al materiale.

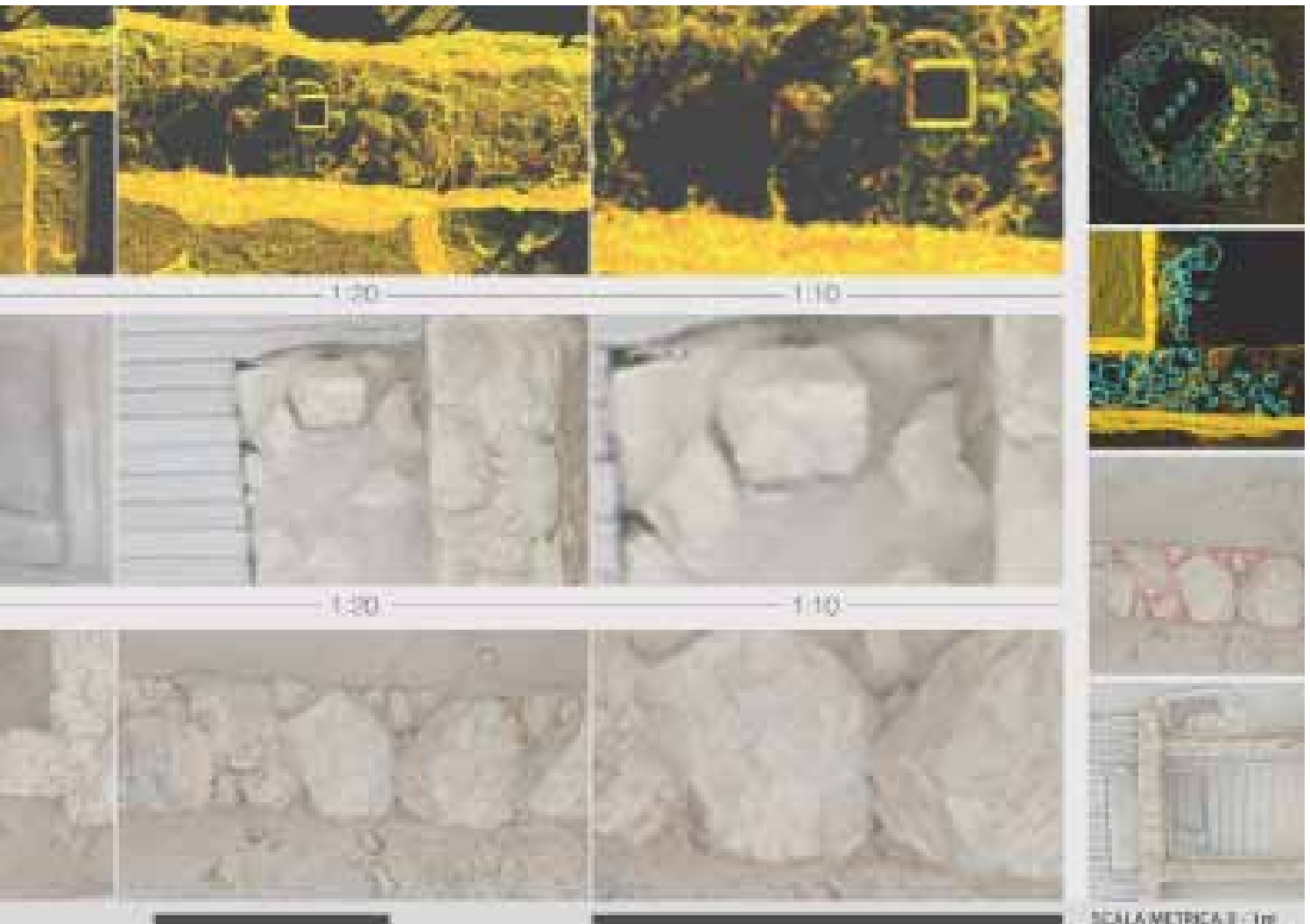
La rappresentazione bidimensionale dalla nuvola di punti permette di rimandare ad una fase successiva la scelta della scala di rappresentazione, grazie alla possibilità, una volta scelta l'unità di misura metrica, di disegnare concettualmente in scala 1:1 mantenendo una corrispondenza con l'architettura reale.

Questo implica un controllo maggiore nella rappresentazione del dettaglio che comunque non può prescindere dalla scelta della scala al quale si intende stampare.

Infatti, la rappresentazione ad esempio del tessuto murario o delle decorazioni presenti sarà tanto più dettagliata tanto più la scala sarà grande.

La restituzione del rilievo avviene mediante la lucidatura dalla nuvola dei punti, ovvero in ambiente CAD vengono ripassate con il comando polilinea gli elementi che compongono l'architettura.

Per effettuare questa operazione è indispensabile conoscere l'architettura tenendo sotto controllo l'elemento che si sta graficizzando. Infatti, per la quantità di informazioni contenute all'interno del database tridimensionale e a causa della natura stessa della nuvola di punti,



è importante avere ben chiara la porzione di architettura che si sta restituendo per ovviare a problemi di errata interpretazione dei punti visualizzati. Questo controllo avviene osservando le foto statiche e foto panoramiche QTVR, realizzate durante la campagna di rilievo, e osservando da diverse angolazioni la stessa nuvola di punti, direttamente in ambiente Cyclone.

La restituzione del rilievo avviene principalmente seguendo un iter composto da tre step:

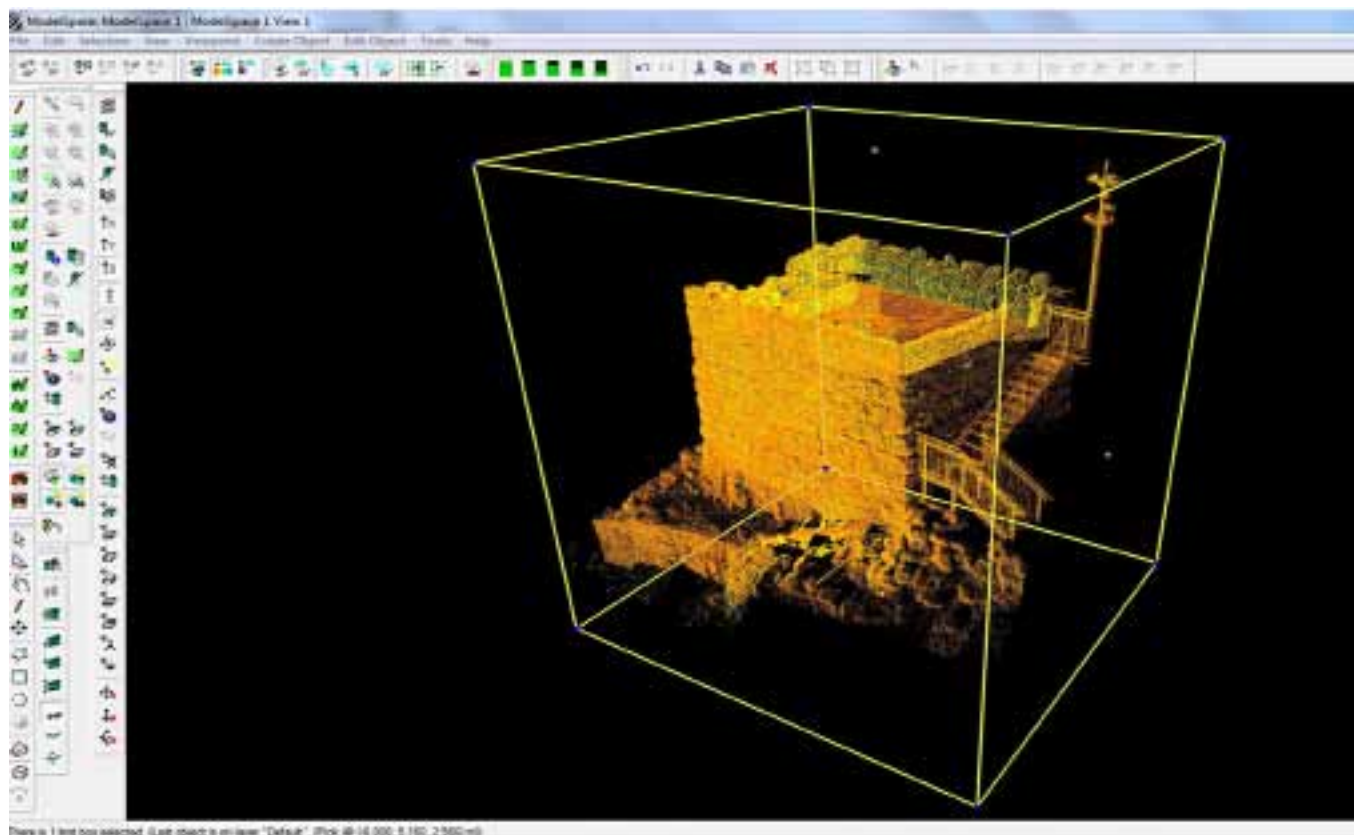
- Nel primo viene effettuata una lucidatura preliminare della linea di sezione, dei contorni dell'architettura e degli elementi lapidei più evidenti, oltre al disegno di eventuali altri elementi rilevanti presenti. In questa fase si realizza un disegno che costituirà la base per la realizzazione dei fotopiani, ovvero si disegnano quanti più elementi consentano la mosaicatura delle immagini

che compongono l'architettura, quindi si rappresentano tutte le bucatore di diversa natura presenti sull'architettura, le scale, le linee di contorno degli intonaci o di altri materiali e in maniera sommaria le modanature.

- Successivamente, sul disegno di base vengono unite ed uniformate le singole foto raddrizzate attraverso l'ausilio di software come Archis o RDF che sfruttano le regole della fotogrammetria per l'eliminazione della prospettiva all'interno delle singole immagini.

Affinchè la mosaicatura sia realizzata correttamente, sul disegno saranno riportate oltre ad un numero sufficiente di elementi che compongono il rilievo, anche le mire bianco/nero, utilizzate per la fotogrammetria, che sono state sovrapposte ai prospetti durante la campagna fotografica.

- Il terzo step è caratterizzato dal completamento della

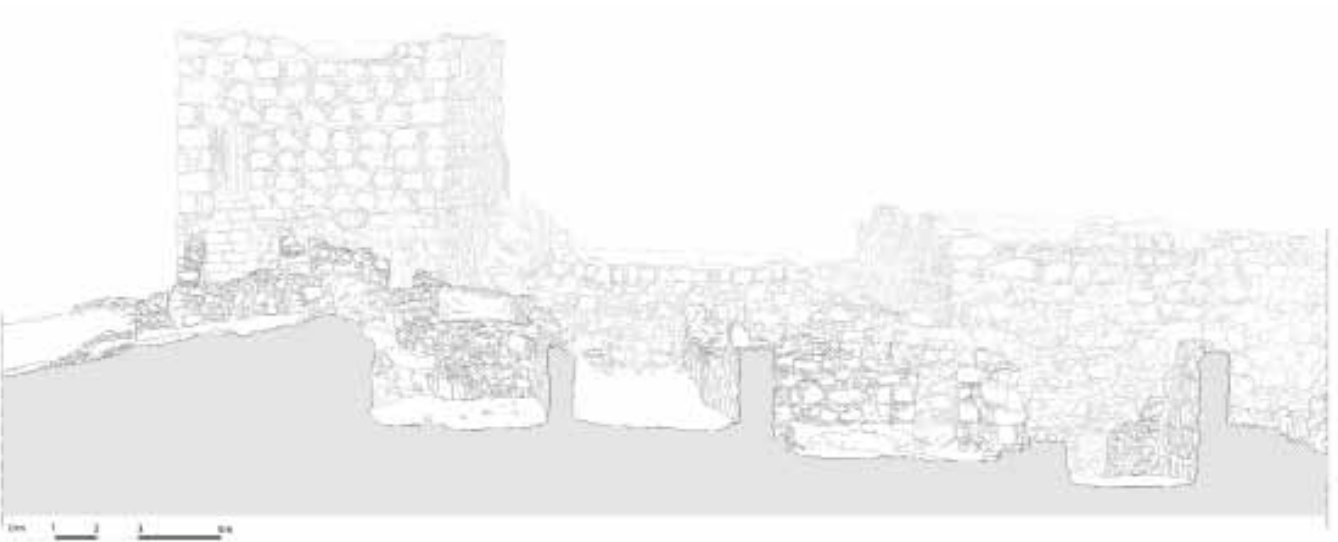


Selezione di una porzione della nuvola di punti, per l'elaborazione dell'elaborato bidimensionale.

rappresentazione del rilievo in CAD, sovrapponendo il disegno vettoriale di base all'immagine raster che costituisce il fotopiano.

Questa sovrapposizione consente, grazie alla quantità maggiore di informazioni contenute all'interno del fotopiano, di dettagliare maggiormente il disegno architettonico verificandolo ed eventualmente rettificandolo,

qualora si verificasse qualche errata interpretazione della nuvola.



Fotopiano e sezione di una porzione del sito di Masada.

4.3 La restituzione vettoriale al tratto: esempi dal rilievo della Chiesa dei SS. MM. Donato e Ilarino del Monastero di Camaldoli

Anche se oggi i sofisticati algoritmi di image matching presenti nelle moderne stazioni fotogrammetriche digitali hanno reso semi-automatiche o automatiche sia alcune procedure di orientamento che alcune pratiche di restituzione, la classica restituzione vettoriale al tratto viene eseguita in modalità manuale dall'operatore che realizza la misura di coordinate, in modo da ricostruire la geometria dell'oggetto da rilevare, seguendo le discontinuità principali dell'oggetto, profili, sezioni, ecc. In ogni caso, a prescindere dalla metodologia adottata, ogni elemento "restituito" viene registrato mediante l'uso di una codifica in livelli logici, caratterizzati da attributi e parametri di vestizione caratteristici. Il risultato della restituzione vettoriale può essere un file di dati, un file disegno (gestibile in ambiente Cad) o può essere rappresentato su supporto cartaceo.

In particolare nell'ambito dei Beni Culturali e dell'archeologia la restituzione vettoriale sulla base delle informazioni offerte dai rilievi, fornisce una rappresentazione che può contenere numerose notizie:

- materiali e dei periodi cronologici costituisce generalmente la fase preliminare di una restituzione archeologica;
- restituzione archeologica: sulla base degli elementi ancora in opera, viene restituita in pianta ed in prospetto l'immagine delle costruzioni precedenti; a volte è possibile restituire la successione storica degli edifici sorti sullo stesso luogo, in questo caso è opportuno eseguire una rappresentazione per ogni periodo.

Nei restitutori analogici e nei moderni restitutori digitali la restituzione vettoriale può essere eseguita direttamente in ambiente 3D: dopo aver eseguito le fasi di orientamento interno ed esterno dei fotogrammi, l'operatore può, movendosi in stereoscopia sul modello tridimensionale orientato, effettuare le misure delle coordinate di punti.

Il risultato è un modello vettoriale tridimensionale che può essere esportato in formati standard per essere supportato da comuni programmi GIS e CAD.

Sulle restituzioni vettoriali è possibile per esempio effettuare:

- l'inserimento di nuove entità relative ad elementi difficili o impossibili da restituire;
- l'aggiunta di riempimenti o vestizioni particolari a entità di tipo chiuso;
- l'inserimento di scritte esplicative;
- la variazione di livello a particolari entità per classificarle diversamente;
- la modifica della tipologia e/o degli attributi (ad esempio codice identificativo, tipologia dell'entità, colore del tratto, tipo del tratto, spessore) ad entità specifiche;
- la realizzazione in maniera indiretta di sezioni, profili e misure.

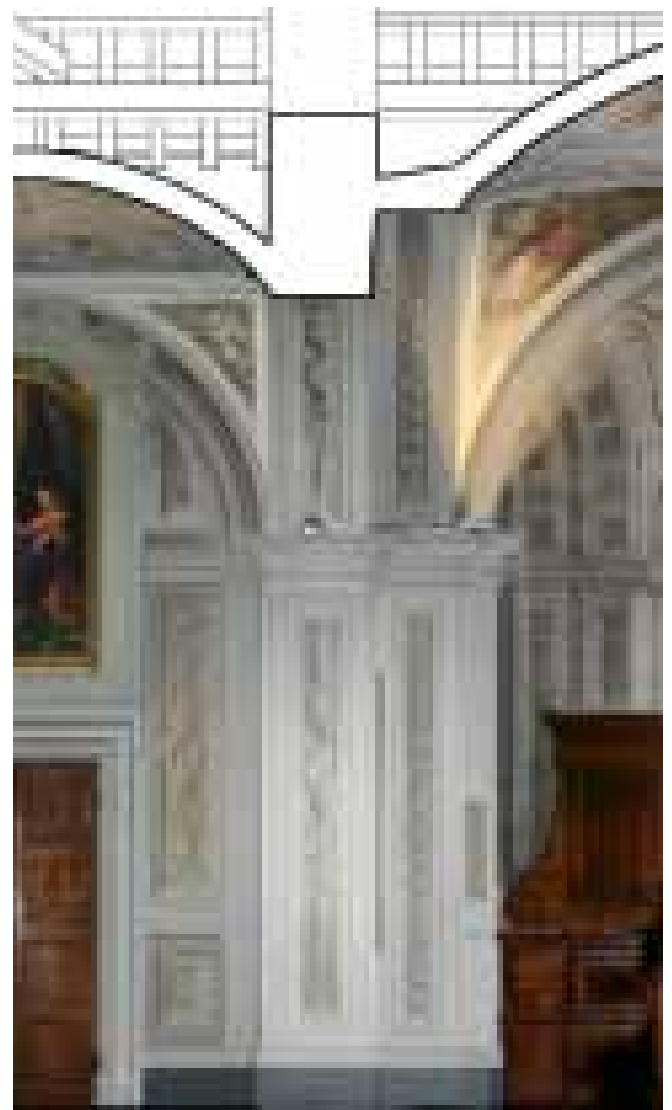
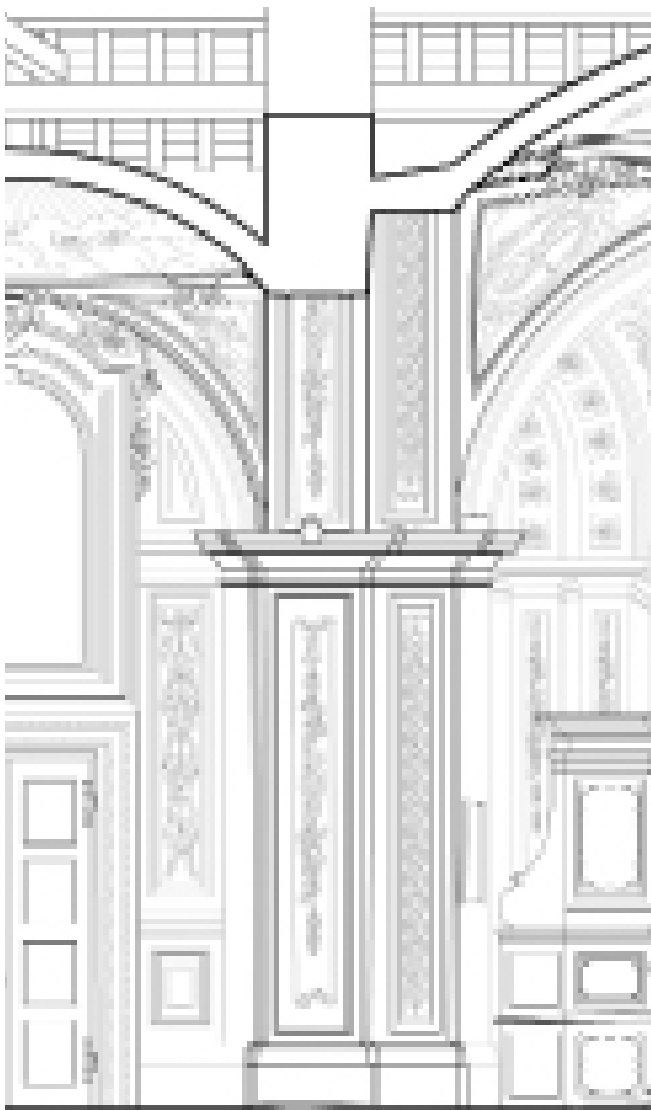
A tale proposito è utile sottolineare che solitamente in fotogrammetria terrestre è necessario, soprattutto quando si lavora con l'approccio stereoscopico, che ogni facciata dell'edificio in oggetto venga orientata in un proprio sistema di riferimento locale, avente il piano XY vincolato sulla facciata e l'asse Z uscente, secondo la consueta regola della mano destra. Questo implica che si svolga una trasformazione nello spazio fra il sistema di riferimento topografico e il sistema fotogrammetrico e che la stessa trasformazione venga poi applicata all'indietro per portare tutti i prodotti della restituzione nello stesso sistema, quello topografico.

È ovvio che ad ogni restituzione è associata una scala, che non è solo il rapporto dimensionale fra la rappresentazione dell'oggetto e l'elemento reale, ma rappresenta anche la precisione della restituzione; come per le carte topografiche questa è data dall'entità dell'errore di graficismo alla scala della rappresentazione; generalmente la scala che più si adatta alla rappresentazione

dei grandi complessi architettonici è 1:100, che se da un lato limita il grado di informazioni offerto, dall'altro consente di ridurre la maggior parte degli edifici in formati facilmente archiviabili. Il passaggio ad una scala maggiore viene riservato a quelle rappresentazioni di dettaglio in cui la quantità di elementi significativi e la loro densità dovessero rendere incomprensibili sia la rappresentazione che la sua leggibilità; in questo caso

si scelgono scale di rappresentazione per esempio 1:20, 1:10 che agevolano la misura e il cui errore di graficismo si avvicina il più possibile all'errore di misura.

Se l'oggetto da rilevare può considerarsi piano, l'elaborato raster più semplice da realizzare, a valenza metrica, è dato dal procedimento del raddrizzamento semplice. Con tale procedura si può effettuare la restituzione di un oggetto piano a partire da un singolo fotogramma, dato



Estratto della rappresentazione bidimensionale a fil di ferro e fotopiano, dalla sezione longitudinale della chiesa di Camaldoli.

che in tal caso si ha una ben individuabile e biunivoca corrispondenza di tipo proiettivo fra punti immagine e coordinate metriche rilevate direttamente sull'oggetto. Riguardo i punti fotogrammetrici di appoggio sono date le seguenti indicazioni:

- devono essere distribuiti sull'oggetto in numero superiore a quello minimo (+50%) in modo da poter stimare i parametri con il metodo dei minimi quadrati e valutare così l'incertezza dei risultati ottenuti;

- devono essere distribuiti esternamente all'area di interesse lungo il contorno del poligono che definisce l'area da raddrizzare, possibilmente a coppie, disponendone se possibile 1 o 2 al centro per controllo; per la loro determinazione è sufficiente la misura delle distanze relative.

Dal punto di vista procedurale il raddrizzamento in ambiente digitale passa attraverso le seguenti fasi:

- Applicazione della procedura di orientamento interno volta alla eliminazione degli errori sistematici indotti dalla fase di presa ed eventualmente dal procedimento di scansione.

- Calcolo dei parametri di orientamento esterno attraverso il modello matematico della trasformazione omografica.

- Applicazione della trasformazione omografica per la definizione della nuova immagine digitale raddrizzata.

- Ricampionamento dei pixel che compongono l'immagine. Se si prescinde dagli errori derivanti dall'apparecchiatura di raddrizzamento e dalle deformazioni del fotogramma, la causa più rilevante degli errori sistematici nel raddrizzamento deriva dagli scostamenti della superficie effettiva dell'oggetto, rispetto al piano assunto come riferimento: le immagini dei punti che non giacciono esattamente sul piano oggetto risulteranno spostate in direzione del punto principale PP.

Nel caso del monastero di Camaldoli, la facciata principale per la sua particolare morfologia prettamente piana consentiva una restituzione tramite raddrizzamento fotogrammetrico, per questo le prese effettuate sono state fatte il più possibile centrali. L'acquisizione fotogrammetrica è stata eseguita con camera 50D-Canon, dotata di obiettivo 18/200 mm. Il rilievo d'appoggio è stato eseguito con Laser Scanner Leica 6100.

Il raddrizzamento è stato eseguito col software open source RDF; la dimensione del pixel selezionata per il



Dettaglio della restituzione grafica della decorazione del paramento murario all'interno del coro della chiesa di Camaldoli.

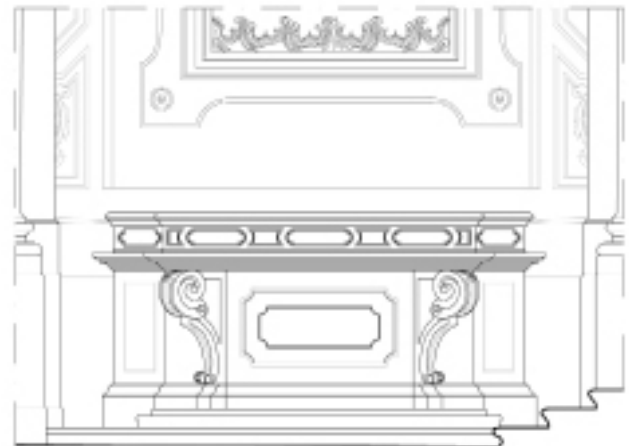
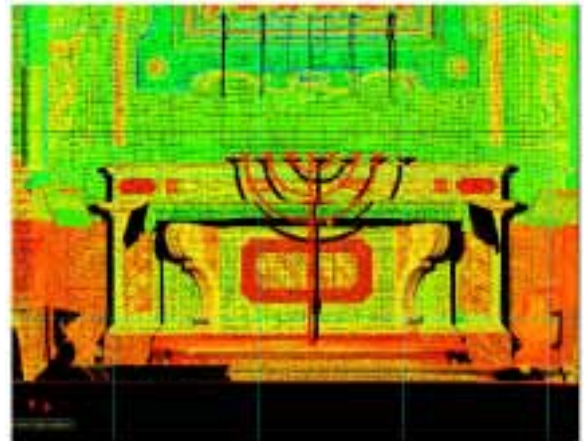
prodotto finale è stata pari a 2mm. L'esecuzione effettiva del raddrizzamento, con relativo ricampionamento dell'immagine originale e sua proiezione sul piano prescelto ha richiesto un tempo molto breve.

Dalla tecnica e strumentazione adottata, nonché dalla verifica di distanze reali misurate in campagna con quelle rilevate sul fotopiano, si può considerare la precisione del prodotto finale compatibile con una scala nominale 1:25.

Il fotopiano ottenuto costituisce una rappresentazione fotografica metrica che comprende vari aspetti dell'oggetto, come ad esempio il colore, i materiali, la presenza di macchie d'umidità o di parti d'intonaco danneggiato,

ed ogni altra informazione sul danneggiamento della struttura, come crepe e cedimenti.

D'altra parte è altresì evidente che la classica restituzione vettoriale al tratto è una rappresentazione sintetica dell'oggetto in cui si possono mettere in risalto i principali elementi architettonici e strutturali, essendo anche organizzabile in livelli tematici differenti. Per realizzare la restituzione vettoriale il fotopiano è stato quindi importato in una piattaforma CAD; la restituzione è stata effettuata cercando di mettere in evidenza le diverse tessiture e strutture che compongono la facciata e che possono rivelare in modo molto interessante il susseguirsi di diversi stili ed interventi nel tempo.



Nelle immagini, da sinistra: foto di dettaglio di uno degli altari laterali della chiesa di Camaldoli, snapshot dalla nuvola di punti, fotopiano e fil di ferro.

4.4 La restituzione fotogrammetrica

L'immagine fotografica, raccogliendo una complessa quantità di informazioni, rappresenta senza dubbio uno strumento insostituibile per chi, nel campo dei Beni Culturali, si trova a dover studiare le forme, le tecniche costruttive e tutti i fenomeni che hanno attinenza con la storia, l'arte, la sociologia dell'ambiente e dell'urbanistica.

La fotografia però, pur prestandosi a molteplici analisi e costituendo una fonte mnemonica importante, è soggetta alle leggi della luce e delle deformazioni prospettiche, che le impediscono di essere utilizzata, così com'è, come strumento di misura e di reperimento di informazioni metriche accurate.

Il disegno invece seleziona e dà forma all'informazione geometrica, registrandola e rappresentandola in modo più o meno complesso a seconda dello scopo della rappresentazione.

Riunendo i vantaggi descrittivi della fotografia con la possibilità di ottenere diverse informazioni metriche, la fotogrammetria risulta indispensabile per documentare l'archeologia e l'architettura; inoltre non va dimenticato che un'immagine è una memoria globale di cui si può sempre disporre per produrre, attraverso un ampio ventaglio di elaborazioni numeriche e grafiche, un'analisi più o meno accurata delle forme, dimensioni e proporzioni di un oggetto, in certi casi senza simbolismi e interpretazioni soggettive, anche nel caso estremo in cui questo non esista più.

Rispetto ai sensori attivi, i rilievi fotogrammetrici utilizzano immagini che contengono tutte le informazioni (geometria e tessitura) utili alla restituzione di modelli 3D. Inoltre con la fotogrammetria è possibile rilevare, impiegando immagini di archivio, oggetti o scene che non sono più disponibili o sono state danneggiate². Gli strumenti fotogrammetrici (camere e software) sono generalmente meno costosi (è possibile utilizzare camere

digitali commerciali, oltre che telefoni cellulari), portatili e semplici da utilizzare.

La fotogrammetria può essere applicata utilizzando una singola immagine (ad esempio per applicazioni quali il fotoraddrizzamento e il monoplottaggio), o coppie (stereo) o più immagini (bundle-block adjustment). Per applicazioni di fotoraddrizzamento, una singola immagine viene rettificata rispetto ad un piano di riferimento utilizzando una trasformazione proiettiva e conoscendo le coordinate di almeno 4 punti.

La fotogrammetria, nasce come applicazione della topografia per il rilievo di zone impervie e inaccessibili e si sviluppa dalla metà dell'800, quando il fisico Arago presentò all'Accademia francese un trattato sull'utilità delle fotografie nel rilievo dei monumenti e nell'esecuzione dei lavori topografici.

Dopo qualche anno gli italiani Porro e Paganini con l'aiuto di altri stranieri diedero un contributo ulteriore al suo sviluppo impiegando camere fotografiche costruite per lo specifico impiego.

La restituzione del terreno graficamente veniva fatta per punti eseguendo le misure con regoli e settori graduati e risolvendo i problemi di livellazione trigonometrica e di intersezione in avanti.

Con l'avvento del digitale le operazioni fotogrammetriche si sono fortemente semplificate, ma in definitiva che cosa è cambiato con l'introduzione del digitale? Sintetizzando, potremmo così definire quanto è avvenuto: è stato "semplicemente" sostituito il supporto di registrazione delle immagini, si è passati dalla pellicola, ai sensori al silicio, lasciando che i supporti emulsionati con sali di argento venissero utilizzati solo per alcuni grandi formati o per un impiego riservato agli amanti del genere.

Nella fotografia l'immagine si realizza per mezzo della registrazione di una radiazione su di un supporto,

quando avviene attraverso la reazione di sali di argento, spalmati su pellicola o su carta, è detta analogica, quindi si realizza attraverso un processo di tipo chimico. Mentre, quando la registrazione avviene attraverso un “chip”, è detta digitale, il sensore infatti è deputato a convertire le onde luminose in cariche elettriche che vengono trasformate in informazioni digitali, attraverso un processo elettrico, pertanto fisico. E' questa, in estrema sintesi, la grande differenza fra la fotografia

analogica e la fotografia digitale.

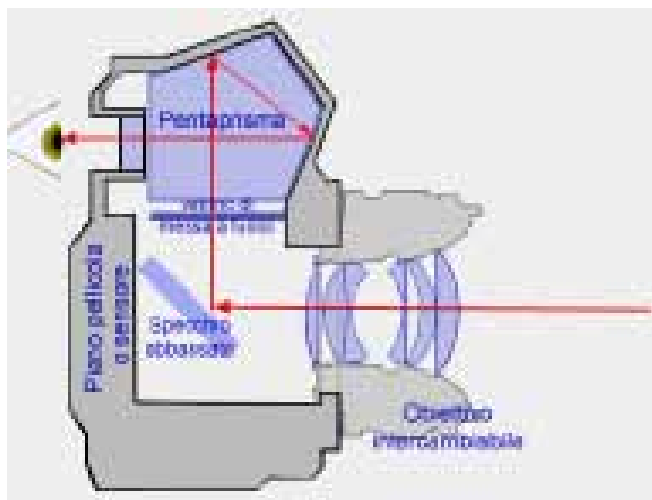
I sensori digitali hanno rivoluzionato la fotografia andando a sostituire la quasi totalità delle pellicole e lastre presenti sul mercato. Il loro funzionamento si basa sulla capacità di cui dispongono i “fotodiodi” di convertire l'intensità della luce in una carica elettrica di modesta entità. Ogni fotodiode corrisponde ad un elemento di immagine, ovvero un pixel. Ogni sensore per fotografia è formato da un certo numero di pixel,



Fotopiani della Sala dei Pilastri Dorici a Villa Adriana, Tivoli.

nel numero di qualche milione, a seconda della tipologia di fotocamera utilizzata. Quindi maggiore sarà il numero di pixel presenti sul sensore migliore sarà la definizione delle immagini che sarà in grado di fornire. E' comunque necessario specificare che a formare la qualità dell'immagine non è solo il numero dei pixel ma anche la loro dimensione, assieme alla tipologia di sensore ed al processore e gli algoritmi che utilizzati per elaborare l'immagine.

Il componente principale del sensore è il fotodiodo, anzi i fotodiodi, che costituiscono la superficie del sensore. Per indirizzare meglio la luce verso la sua superficie sensibile ogni fotodiodo è provvisto di una microlente. Inoltre nel sensore sono presenti i circuiti elettronici per la trasmissione e la prima elaborazione del segnale. Con questa architettura un sensore sarebbe capace di restituire immagini in bianco e nero, ma non a colori, pertanto anche i sensori hanno necessità di filtrare la luce secondo i colori in cui questa è scomponibile: il rosso, il verde e il blu (Red Green Blue RGB). A tal fine è stato adottato un filtro posto davanti al sensore che dispone di un filtro mosaicato RGB dove sono filtrati con il colore verde il 50% dei pixel e con i colori blu e rosso per il 25% ciascuno, tale filtro è detto filtro Bayer³. Ad imitazione delle pellicole a

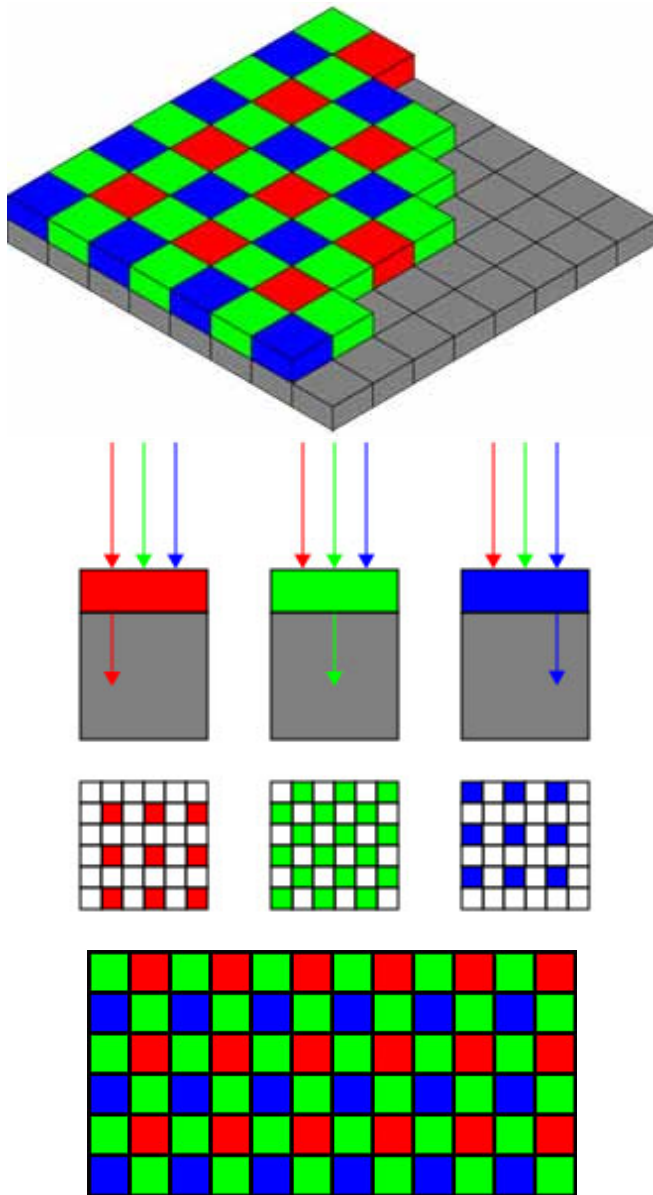


Schematizzazione dei componenti di una macchina fotografica reflex.

colori, è stato sviluppato un sensore che come la pellicola ha sovrapposto tre strati di pixel, il "foveon"⁴, che riesce a produrre immagini molto definite con estesa gamma dinamica e di grande qualità, ma ha bassa sensibilità ISO e soffre le alte sensibilità.

Il segnale elettrico emesso dal fotodiodo deve comunque essere convertito in immagine, pertanto necessità di essere elaborato. Alcune elaborazioni avvengono direttamente nei circuiti del sensore mentre altre sono effettuate dal processore che governa la fotocamera. A questo fine è opportuno specificare che esistono due tipologie ben distinte di sensori, i CCD (Charge-Coupled Device) ed i CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), la principale caratteristica che li differenzia, è che i primi hanno i circuiti di elaborazione a valle del sensore mentre per i secondi la prima elaborazione del segnale avviene singolarmente per ogni pixel, ne consegue che i CCD avranno un numero minore di circuiti elettrici al loro interno, mentre i CMOS ne hanno un numero maggiore, è evidente pertanto che la luce dovendo raggiungere l'elemento sensibile del fotodiodo che è posto sotto i circuiti risulti maggiormente ostacolata nei sensori CMOS. Per ovviare a questo problema è stata messa a punto una nuova generazione di sensori CMOS nei quali si è riusciti a spostare i circuiti sotto l'elemento sensibile del fotodiodo. Grazie alla loro possibilità di gestire meglio gli alti ISO, i sensori CMOS, hanno ormai quasi saturato il mercato delle fotocamere reflex e delle compatte, mentre i CCD rimangono ancora leader del mercato di dorsi digitali e fotocamere di medio formato.

Il segnale ricevuto dal fotodiodo viene amplificato e convertito in codice binario: 1 (acceso), 0 (spento), dove 0 è il nero e 1 il bianco. Ma con una conversione a un bit come quella appena descritta, si perdono tutti gli eventuali toni intermedi, pertanto è necessario un convertitore che permetta di ottenere un maggior numero di toni di grigio: con 4 bit si può disporre di 16 tonalità di grigio, con 8 bit 256 e con 12 bit 4096, quest'ultima rappresenta una scalatura ottimale fra il bianco ed il nero, ragion per cui i produttori sono orientati a produrre fotocamere con elaborazioni a 12 e 14 bit.



4.5 La restituzione della fotogrammetria non convenzionale monoscopica

Con la diffusione capillare del computer e delle fotocamere digitali, nella pratica del rilievo architettonico trovano sempre più impiego le tecniche della fotogrammetria non convenzionale monoscopica, ovvero quelle tecniche che usano fotogrammi isolati anziché coppie di fotogrammi, e sempre più spesso, immagini digitali o digitalizzate anziché fotogrammi tradizionali e procedure informatiche anziché costruzioni grafiche o ottico meccaniche. Ma va ricordato che la fotogrammetria monoscopica, nelle sue procedure grafiche tradizionali, è stata in uso per moltissimi decenni, sin quasi dall'invenzione della fotografia, avvalendosi di metodi direttamente derivati dalla geometria descrittiva e di complesse costruzioni grafiche eseguite manualmente. Attualmente queste ultime procedure, nella pratica professionale e di ricerca, sono del tutto desuete, tuttavia costituiscono ancora oggi parte integrante della base teorica dei processi (esclusivamente analitici) che vengono impiegati per la elaborazione informatica di rilievi architettonici che si basano sul raddrizzamento di fotogrammi isolati. Solo in determinate condizioni è possibile ricavare dati metrici da fotogrammi isolati, ovvero, queste condizioni consistono in sostanza nel fatto che si trattino esclusivamente superfici piane (o schematizzabili come tali) e che si abbia la conoscenza di alcune misure dell'oggetto da restituire.

Nell'immagine il filtro di Bayer è formato da una matrice di punti colorati della stessa dimensione del sensore e con una disposizione ben precisa. Il rapporto sono 2 punti verdi per 1 punto o rosso o blu, perché l'occhio umano è più sensibile al colore verde: è proprio in quella zona dello spettro visibile che riusciamo a riconoscere un numero maggiore di dettagli e di sfumature.

Quindi la luce attraversa il filtro, colpisce il sensore ed esso registra il valore di luminosità di un solo colore: se levassimo il filtro di Bayer il nostro sensore registrerebbe immagini in bianco e nero.

4.6 Fotopiano e fotomosaico da fotogrammi isolati

In architettura, e quindi nel rilievo architettonico, può essere molto utile una particolare applicazione della fotogrammetria: il “fotopiano” ed il “fotomosaico”. Questa metodologia non convenzionale si serve di fotogrammi isolati.

Data una sola presa fotografica generica di un elemento supposto piano, ossia di un elemento che si ipotizza giacere su un piano, si può operare una “trasformazione omografica”, detta anche “raddrizzamento” che porti il piano rappresentato da una posizione generica (generalmente prospettica) alla sua proiezione ortogonale rispetto all’asse ottico della presa stessa.

In altre parole, data ad esempio l’immagine di una facciata piana o di un qualsiasi elemento piano di un edificio rappresentato prospetticamente (ossia con l’asse ottico dell’obiettivo inclinato rispetto al piano dell’elemento rappresentato) è possibile, tramite una trasformazione omografica di ortogonalizzazione, ottenere un prospetto dell’elemento rappresentato, ossia una sua proiezione ortogonale.

L’“omografia” è una trasformazione fra due “spazi piani” governata analiticamente da 8 parametri che rappresentano le coordinate X e Y di 4 punti, di cui tre non allineati.

La sua formulazione analitica è la seguente:

$$\begin{aligned} x' &= (a_1x + a_2y + a_3) / (c_1x + c_2y + 1) \\ y' &= (b_1x + b_2y + b_3) / (c_1x + c_2y + 1) \end{aligned}$$

dove a, b, c sono le costanti che particolarizzano l’omografia.

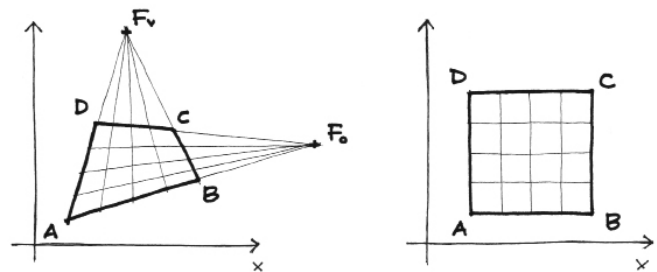
La conoscenza delle coordinate x e x' e y e y' di 4 punti omologhi permette di scrivere 8 equazioni in 8 incognite e conoscere quindi gli 8 parametri a1, a2, a3, b1, b2, b3, c1, c2.

Anche in questo caso, come nella fotogrammetria tra-

dizionale, vi sono tre metodi di restituzione, in altre parole esistono tre tipi di procedure per ottenere la figura “reale” ABCD (ovvero in vera grandezza) avendo a disposizione l’immagine fotografica A'B'C'D'.

I metodi sono: grafico, ottico-meccanico e analitico.

Va notato anche che con questi metodi, per ottenere l’immagine in vera grandezza del soggetto piano rappresentato, non occorre, in generale, conoscere la distanza focale dell’obiettivo, ovvero il “cerchio di distanza” della costruzione prospettica. Questa circostanza rende utilizzabili per le operazioni di fotogrammetria monoscopica anche le moderne fotocamere amatoriali digitali che, avendo generalmente la messa a fuoco “automatica”, non indicano con certezza l’effettiva distanza focale con la quale si è formata l’immagine e che, nel caso si voglia conoscere tale parametro, obbligano a ricorrere a specifiche costruzioni grafiche.



Schema della presa fotografica e schema grafico del raddrizzamento.

4.7 Il metodo analitico

Come già ricordato, il grande sviluppo dei calcolatori elettronici ha reso assai diffuso e conveniente il metodo analitico di restituzione delle immagini digitali (o rese tali tramite scannerizzazione).

In tal caso le formule dell'omografia si applicano a fotografie intese come immagini numeriche, elaborate in forma "raster", e costituite da matrici di punti, che saranno trasformate in altrettante immagini numeriche "raddrizzate".

La condizione perché il raddrizzamento possa avvenire convenientemente consiste nella visibilità totale e nella planarità della superficie da rilevare. Inoltre non è inutile sottolineare che, nel caso in cui il soggetto debba essere misurato tramite rilievo diretto, deve essere garantita l'accessibilità di almeno alcuni dei suoi punti.

Va comunque ricordato che questo metodo può essere utilizzato con profitto solo se l'oggetto da rilevare è complesso o se vi sono decorazioni o particolarità importanti da descrivere con grande dettaglio, altrimenti risulta ingiustificato perché molto più oneroso rispetto al rilievo diretto.

Il metodo si articola in varie fasi distinte: il progetto, le riprese fotografiche, il rilievo, la digitalizzazione delle immagini e l'elaborazione digitale. Vediamole distintamente una per una.

1. Il progetto

Per prima cosa vanno individuati i diversi piani da raddrizzare, ovvero le varie porzioni di edificio che possono essere considerate complanari.

Tenendo conto che in ogni fotogramma devono essere rappresentati di regola almeno 4 punti di coordinate note, visti gli spazi a disposizione e la focale dell'obiettivo, si deve programmare il numero dei fotogrammi che, eventualmente mosaicati tra loro, "co-

priranno" ciascun piano da raddrizzare.

Va osservato che pochi fotogrammi possono risultare non esaurienti nei particolari, e troppi fotogrammi aumentano il numero degli errori e comportano un aggravio di lavoro.

2. La ripresa fotografica

Per ottenere i migliori risultati occorre:

- Nel caso di utilizzazione di fotocamere tradizionali, usare pellicole "lente", al massimo 100 ASA, e tempi lunghi di esposizione;
- scattare fotogrammi con luce a favore, buona illuminazione e cielo coperto (per avere meno ombre possibili);
- eseguire inquadrature il più possibile a piano verticale e il più possibile frontali;
- monografare almeno 4 punti misurati per ogni scatto, oltre ad altri 2 di controllo.

3. Il rilievo

Come già detto, per ogni fotogramma occorrono le coordinate di almeno 4 punti. Per verificare e compensare eventuali errori, i punti rilevati devono però essere almeno 5 meglio 6.

I punti prescelti debbono essere il più possibile distanti tra loro, distribuiti in modo omogeneo e riferiti ad un sistema di assi cartesiani x, y , il cui piano sia coincidente con quello della facciata. Il prelievo delle misure può avvenire per "rilievo diretto" o con metodi topografici (generalmente per "intersezione in avanti" con teodoliti, e per coordinate polari se si usano delle stazioni totali). E' inoltre opportuno che siano evidenziate sulle facciate tramite apposite "mire" mobili, sia le linee orizzontali, rilevate con la livella, sia le linee verticali rilevate con il filo a piombo. Infine è sempre utile prelevare anche le misure complessive delle facciate.

4. La digitalizzazione delle immagini

Nel caso si utilizzi una fotocamera digitale, le immagini da elaborare si immettono direttamente in un'apposita "cartella". Nel caso invece di immagini fotografiche tradizionali, la loro acquisizione avviene tramite "scanner" ed il loro salvataggio deve essere in formato "tif" non compresso.

5. Elaborazione digitale

Per il raddrizzamento delle immagini dei casi studio, sono stati utilizzati due programmi Archis 2D e RDF. In Archis 2D, che è uno dei più diffusi, come in altri, una volta creata una cartella con le immagini da raddrizzare, si apre un nuovo progetto che deve essere registrato.

Per raddrizzare le immagini il programma offre due opzioni: il raddrizzamento analitico e quello geometrico.

Nel raddrizzamento geometrico vanno individuate almeno due rette verticali e almeno due orizzontali ed inoltre occorre fornire il valore del rapporto che intercorre tra un segmento orizzontale ed un segmento verticale della superficie piana da rilevare.

Nel raddrizzamento analitico si devono fornire le coordinate di almeno 4 punti della facciata, oltre ai punti di controllo. Il programma indica automaticamente gli "scarti" che danno la misura della precisione dei rilievi eseguiti.

Ottenuto il raddrizzamento di più immagini si è proceduto a mosaicarle tra loro per ottenere così il fotopiano. Le immagini raddrizzate sono state lavorate con un programma di "fotoritocco" per omogeneizzare le varie campiture di colore, tagliare parti dell'immagine, eseguire fotomontaggi inserendo altre immagini, abolire ed inserire ombre proprie e portate, ecc.



Nell'immagine una screenshot esemplificativa delle procedure di raddrizzamento, attraverso il programma RDF.

Va però sottolineato che, i programmi di fotoritocco non sono idonei ad eseguire operazioni di rilievo metrico dato che non offrono le necessarie garanzie di correttezza geometrica nelle trasformazioni, pertanto tali programmi sono stati usati esclusivamente per le operazioni di rifinitura sopra descritte.

Un altro programma per il raddrizzamento assai semplice è “RDF”, programma open source, ideato dalla Facoltà di Architettura di Venezia e disponibile sul sito del Laboratorio di Fotogrammetria di quella Facoltà.

Limitando le mie considerazioni ai casi più comuni di raddrizzamento di immagini di prospetti (verticali) di edifici, va comunque ricordato che, qualsiasi programma si usi, in generale le immagini ottenute sono delle superfici geometricamente “corrette” soltanto per le parti che si possono considerare appartenenti al piano raddrizzato, mentre tutte le altre parti, come i tetti inclinati, i lati visti di scorcio, le parti aggettanti o retrostanti, od altri soggetti che rientrano nell’immagine fotografica ma giacciono su piani diversi, sono rappresentate in modo più o meno distorto. Queste parti sono state perciò isolate ed eliminate, per essere corrette in una seconda fase.

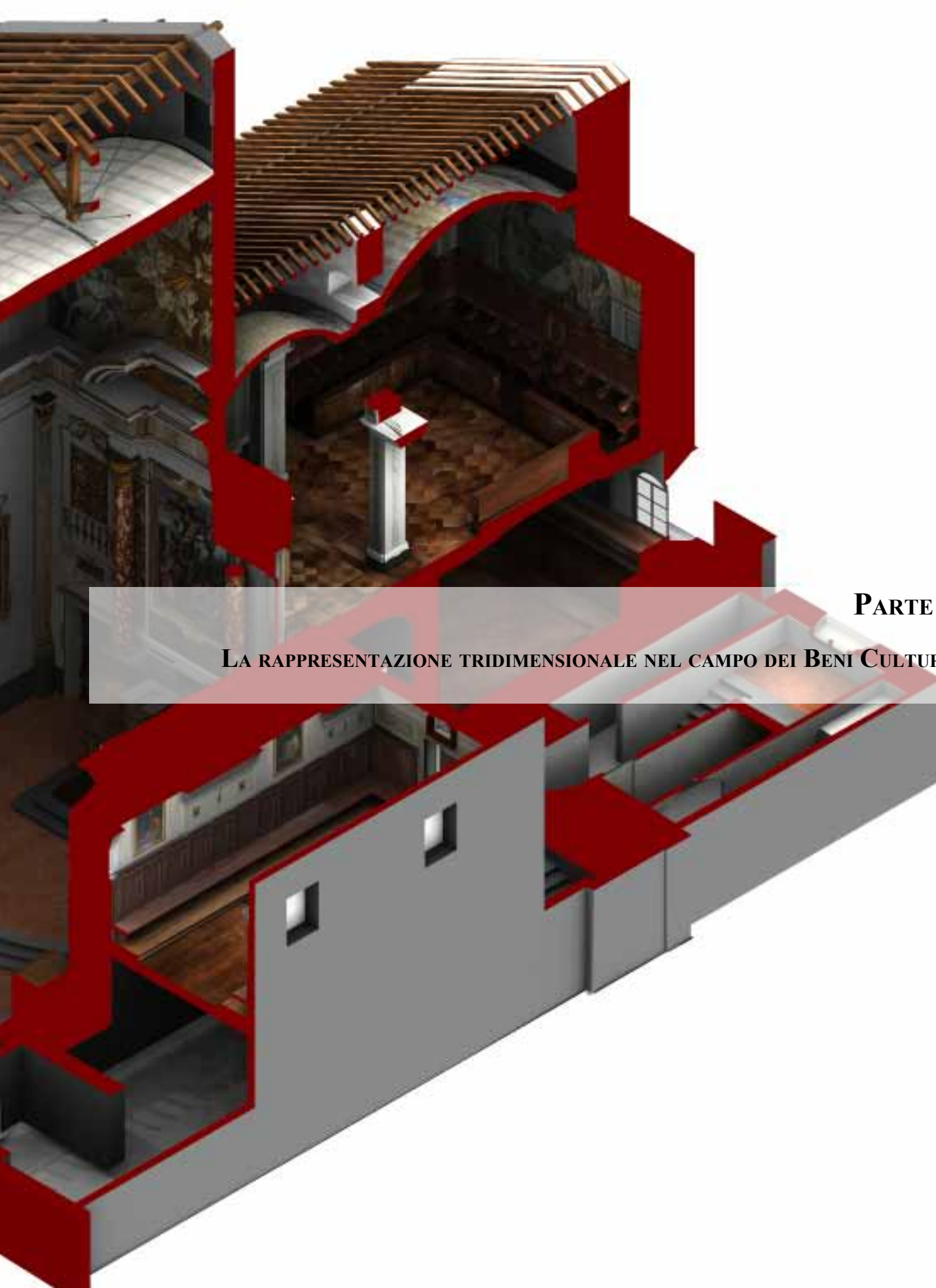
Le correzioni di queste parti secondarie, è stata ottenuta con varie tecniche: ancora per raddrizzamento, quando si è trattato di parti giacenti su piani paralleli a quelli raddrizzati, per “stiramento” con programmi di fotoritocco, quando si tratti di piccole porzioni di edificio, od “ingannando” i programmi di raddrizzamento quando si tratti di parti giacenti su piani inclinati rispetto al piano principale. In quest’ultimo caso si forniscono al programma di raddrizzamento indicazioni sul rapporto tra misure orizzontali e verticali del piano inclinato, ad esempio di una falda di tetto, che tengono conto dello scorcio (ossia si forniscono misure scorciate), ottenendo così l’immagine voluta in proiezione ortogonale. È stato comunque indispensabile ricorrere all’aiuto di programmi di fotoritocco per eliminare e o sostituire le ulteriori piccole parti secondarie rimaste deformate, come camini, mensole e simili, per evidenziare ombre teoriche (proprie e portate) inclinate convenzionalmente a 45°, ed apporre scritte esplicative e cartigli.

Anche le piante e le sezioni sono state elaborate con questa tecnica, con l’ovvia avvertenza di inserire le immagini raddrizzate, rispettivamente su piani orizzontali o verticali, vano per vano, all’interno di un disegno eseguito con le tradizionali procedure CAD. Come nell’elaborazione dei prospetti (non vi è infatti alcuna differenza teorica tra i due casi), particolare cura è stata posta nel rappresentare gli elementi secondari e di completamento, come infissi, pavimenti, gradini, arredi fissi, decorazioni ecc..

Note

1. Bertocci, 2012.
2. Pancani, 2012.
3. La maggior parte dei sensori usati sulle attuali fotocamere digitali è del tipo CCD o CMOS con tecnologia Bayer, dal nome dello scienziato Bryce Bayer della Kodak che la inventò nel 1976.
4. Foveon è la compagnia che produce e sviluppa questo tipo molto speciale di sensore fotografico che attualmente viene montato su fotocamere Sigma.





PARTE IV

LA RAPPRESENTAZIONE TRIDIMENSIONALE NEL CAMPO DEI BENI CULTURALI



Vista planimetrica del modello tridimensionale del Palazzo di Erode a Masada.

Il modello è stato realizzato dalla trasformazione diretta della nuvola di punti, acquisita tramite laser scanner, in mesh.

CAPITOLO 5

La rappresentazione tridimensionale: modellazione 3D poligonale e nurbs

Con il termine modellazione 3D si intende quel processo che parte dall'acquisizione del dato metrico e finisce con un modello virtuale in tre dimensioni visibile in modo interattivo su un computer; il termine comprende quindi un concetto più ampio di quello che si intende usualmente, cioè il passaggio da una nuvola di punti ad una superficie continua, che costituisce quindi in realtà solo uno degli steps dell'intero svolgimento¹.

La modellazione 3D di oggetti e scene è oggi una tematica di grande interesse non solo nell'industria, nella robotica, nella navigazione e nel body scanning, ma anche nell'ambito dei Beni Culturali. Le motivazioni possono essere molte: la documentazione in caso di distruzione o danneggiamento, la creazione di musei e turismo virtuale, la didattica, gli studi strutturali, ecc. Le richieste di questo particolare ambito sono varie: l'alta precisione e la capacità di riprodurre fedelmente i dettagli sono caratteristiche indispensabili, ma ci sono altri requisiti come il basso costo, la maneggevolezza, l'alto livello di automazione nel processo.

La conoscenza, avvenuta per via topografica o fotogrammetrica, delle coordinate dei target o di punti visibili nelle nuvole in un certo sistema di riferimento consente infine la georeferenziazione dell'oggetto in un sistema di riferimento esterno, operazione questa fondamentale se si vuole utilizzare il rilievo in modo integrato con i dati acquisiti con altre metodologie.

Come già detto nei capitoli precedenti, il primo passo nell'impostare un rilievo con strumentazione laser scanner è proprio la scelta dello strumento stesso; nonostante sia sempre presente la possibilità di suddividere gli scanner secondo la loro portata, non esiste un criterio unico nella scelta ma è necessario tenere in considerazione diverse caratteristiche operative, tra le quali assumono grande importanza i parametri di ve-

locità d'acquisizione, la risoluzione di scansione e la divergenza del raggio laser.

Il prodotto della scansione è costituito da una o più nuvole di punti ad altissima densità che descrivono con estremo dettaglio la superficie dell'oggetto. L'acquisizione del dato, però, costituisce soltanto una prima fase del rilievo; vi è una seconda parte del lavoro molto lunga e complessa, la fase di elaborazione, o post processing dei dati acquisiti che diventa l'elemento chiave per la costruzione di un modello tridimensionale corretto.

In questa operazione si possono riassumere tutti quei processi informatici, automatici e manuali, che consentono di passare dalla nuvola di punti "grezza", che costituisce l'output dello strumento, al prodotto grafico finale che si vuole ottenere.

Bisogna sottolineare come l'enorme quantità di dati ottenibili mediante un rilievo laser scanner, rappresenti una forma di rappresentazione dell'oggetto più complessa rispetto alla restituzione classica da rilievo in ambiente CAD.

Per questo motivo una rappresentazione esaustiva che si può ottenere da un modello reale complesso è il relativo modello tridimensionale, che consenta di esplorare l'oggetto ricavando misure e sezioni da qualsiasi punto o posizione dello stesso.

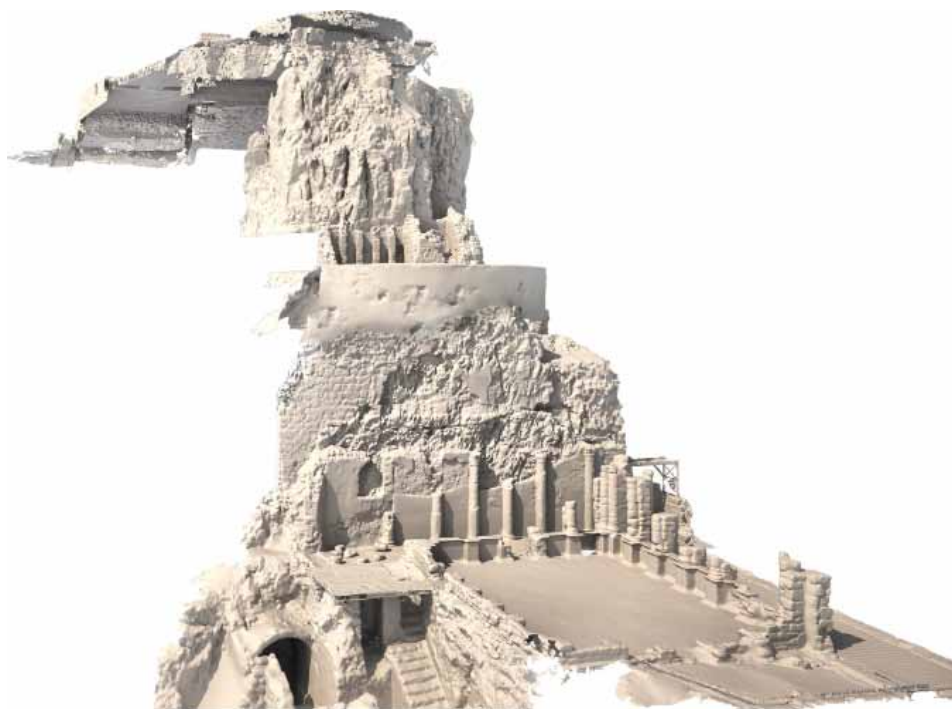
Il modello 3D texturizzato e navigabile dell'oggetto può essere una forma di comunicazione di grande impatto sul pubblico, fornendo una descrizione dell'oggetto molto dettagliata, da cui è possibile ottenere informazioni metriche accurate.

5.1 Dalla nuvola di punti alla restituzione 3D

I nuovi sistemi di rilevamento hanno modificato le tradizionali operazioni di rilievo, basate prevalentemente su operazioni di tipo "diretto".

La descrizione e l'analisi dell'oggetto parte proprio dall'acquisizione del dato; per questo motivo il database non è più un contenitore di raccolta passivo bensì attivo e operativo, funzionale agli operatori incaricati alle rielaborazioni. Nella prima fase della post produzione il materiale viene rielaborato, e si potrà passare dal generale al particolare attraverso un sistema di rielaborazione che abbia una base grafica aggiornabile di supporto. Un rilevamento affidabile permette di cogliere aspetti geografici e morfologici e trasferirli in un sistema grafico tridimensionale.

La tecnologia laser scanner applicata al Palazzo di Erode ha consentito di ottenere un elevato numero di informazioni, sulle condizioni spaziali dell'oggetto studiato e sul suo contesto, in un breve periodo di tempo, posticipando ad un secondo momento considerazioni riguardo il disegno e il sistema architettonico da rappresentare. La definizione della scala grafica per lo sviluppo di elaborati descrittivi statici che consentono di comprendere la complessità del sistema architettonico e la qualità della materia, sono fattori che hanno riguardato il progetto del rilievo e la scelta dei processi di post produzione, per arrivare all'elaborazione finale dei dati ottenuti. Le informazioni ottenute tramite metodo diretto e indiretto, vengono rielaborate fino all'ottenimento



Vista prospettica del modello tridimensionale, ricavato dalla trasformazione in mesh della nuvola di punti, acquisita tramite laser scanner.

di elaborazioni, come abbiamo visto, di tipo bidimensionale e soprattutto di tipo tridimensionale. Il sistema bidimensionale mostra i suoi limiti nella rappresentazione di oggetti quali rovine archeologiche; il metodo tradizionale, infatti, riferisce la misura a una specifica sezione verticale o orizzontale, inscrivendo sempre il manufatto come “estrusione” di una pianta o “proiezione di un alzato”. I tradizionali sistemi sono incapaci di riprodurre in forma astratta il reale con tutte le mancan-

ze e le eccezioni che ne impediscono la trasformazione in forma pura e ne consentono l’inserimento in un contesto. La documentazione tridimensionale, al contrario, memorizza i beni architettonici nella loro situazione attuale, dopo essere stati modellati dal tempo trascorso e crea il background sufficiente per studiarne il passato, il futuro e i metodi di conservazione. Inoltre questa tipologia di rilievo conserva digitalmente il patrimonio qualora ci fossero perdite o danneggiamenti.



Nell'immagine, particolare del modello tridimensionale, ricavato dalla trasformazione in mesh della nuvola di punti, acquisita tramite laser scanner.

Nel modello le porzioni mancanti, sono le porzioni non rilevate dal laser scanner. Queste porzioni sono state integrate tramite rilievo fotogrammetrico aereo.

5.1.1 pre-trattamento della nuvola di punti, per la generazione di una mesh

Una mesh è una superficie frammentata in poligoni triangolari connessi mediante i loro bordi e vertici. La generazione ottimale di questa è un passo fondamentale per la corretta elaborazione della superficie.

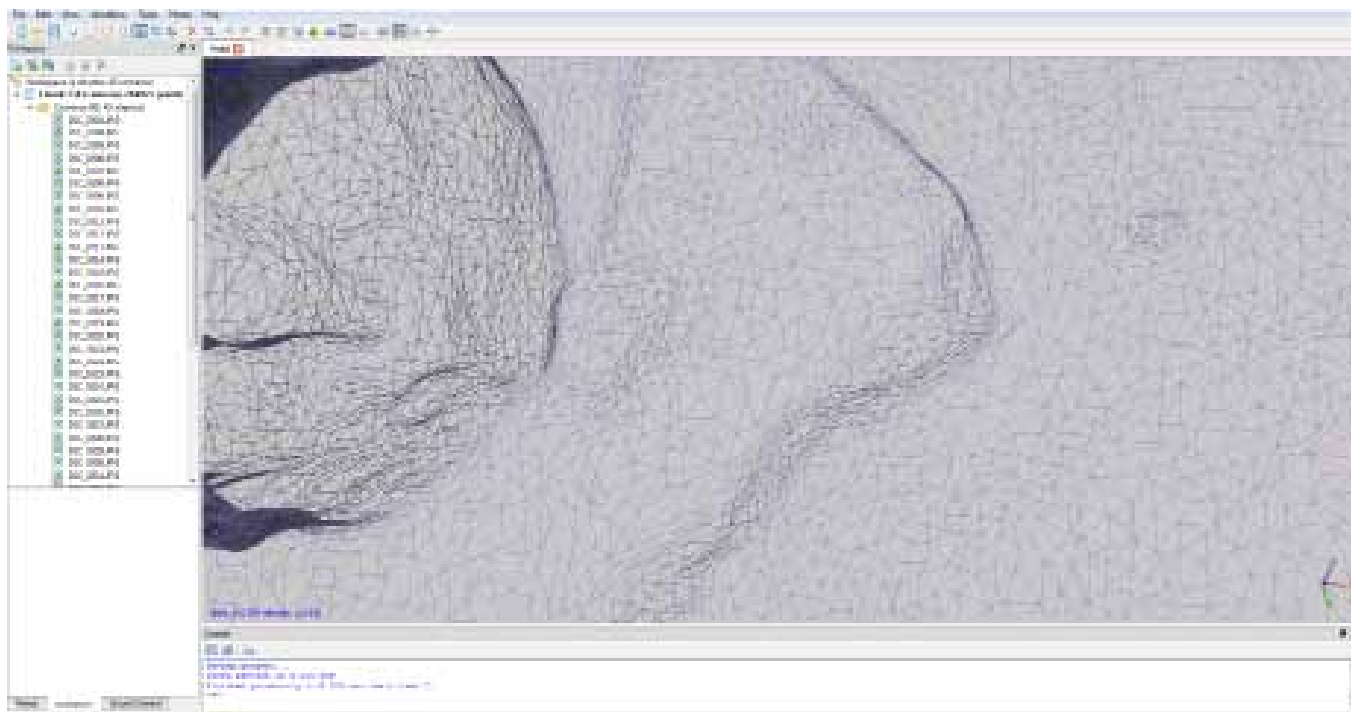
La creazione della mesh ricorre ad una procedura ottimizzata che fa uso dell'algorithmo di Delaunay che opera come se i dati fossero definiti secondo un 2.5-D con l'aggiunta del parametro di profondità.

Vi sono anche altri algoritmi che a partire da generici punti sparsi ricostruiscono una superficie, come quelli di N. Amenta e H. Hoppe, ma in genere si ritiene che essi non siano paragonabili a quello di Delaunay sia in

termini di affidabilità che di velocità.

Per gli oggetti complessi solitamente è necessario suddividere la nuvola di punti in porzioni appartenenti ad entità uniformi tramite la fase cosiddetta di segmentazione; ciascuna entità viene quindi modellata separatamente, mentre il modello complessivo è generato dall'unione delle singole entità modellate.

Solitamente i software in commercio consentono di effettuare l'operazione di segmentazione esclusivamente in modo manuale: l'operatore sceglie e seleziona una porzione della nuvola di punti dallo schermo e lancia il tool di modellazione.



Particolare di una maglia mesh, di un capitello di Villa Adriana, acquisito con fotogrammetria.

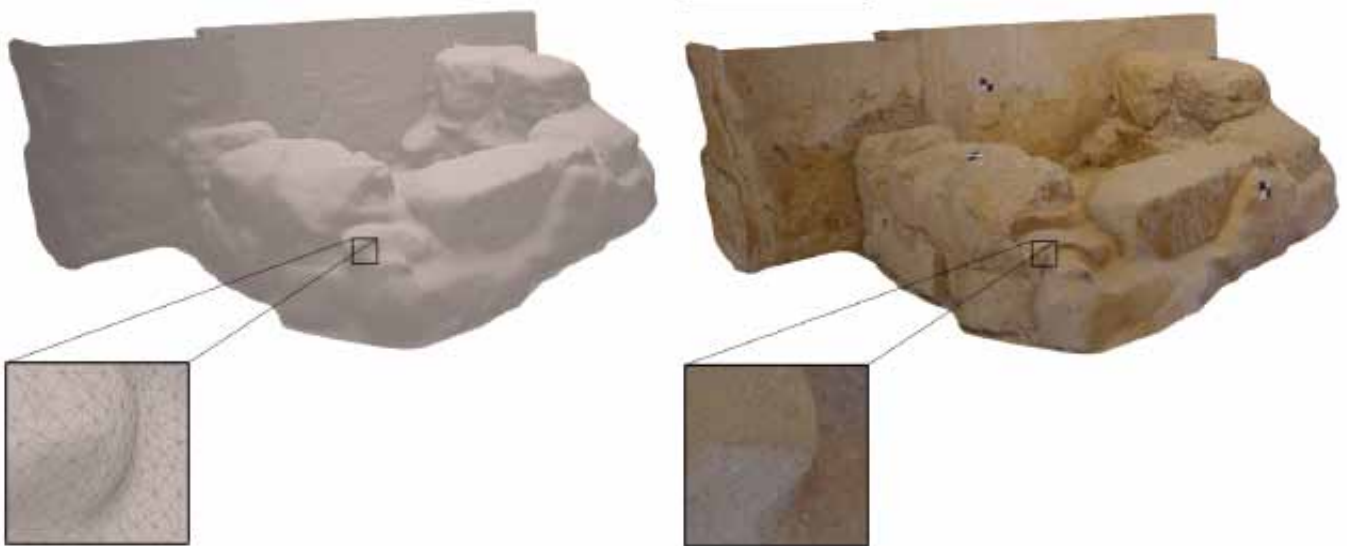
Questa procedura richiede uno sforzo notevole da parte dell'operatore per identificare le porzioni di punti, soprattutto nel caso in cui il modello sia molto denso di informazioni e complesso nella forma.

Come già illustrato, diversi sono i tipi di approccio con cui si può affrontare tale tematica; quelli che più interessano chi si occupa di rilievo sono fondamentalmente i metodi range based e i metodi image based.

Nel primo approccio sensori attivi permettono l'acquisizione diretta di dense nuvole di punti sulla superficie dell'oggetto, ed effettuano la ricostruzione accurata di ogni dettaglio. Delle varie tipologie di sensori attivi si è parlato nei capitoli precedenti. Questi strumenti, solitamente costosi, sono divenuti uno strumento usuale nella comunità scientifica, ma anche per professionisti non esperti di rilievo come ad esempio gli archeologi. È importante sottolineare però che è tuttora ancora problematico per motivi economici e logistici pensare di poter portare su uno scavo archeologico uno di questi strumenti per acquisire oggetti e reperti; inoltre ognuno di questi sistemi ha caratteristiche specifiche che lo rendono adatto a certi ambienti e a certi materiali, ma inadatto ad altri. Alcuni di questi laser presentano una camera digitale accoppiata allo strumento, in modo da

registrare contemporaneamente texture e dato metrico, ma questo approccio potrebbe non portare ai migliori risultati poiché la condizione ideale di acquisizione delle prese potrebbe non coincidere con quella del laser; quindi spesso la generazione di un modello 3D fotorealistico è supportata dall'acquisizione di immagini tramite camere ad elevata risoluzione. In genere più scansioni dell'oggetto sono necessarie al fine di riprodurre l'intera geometria senza buchi e zone nascoste, e nonostante la precisione vari da laser a laser, questi sistemi possono incontrare problemi nell'acquisizione degli spigoli.

Nel secondo approccio sensori passivi (camere e video camere) producono immagini da cui è possibile tramite un modello matematico ben preciso (in fotogrammetria le equazioni di collinearità o la DLT) ricavare le coordinate 3D dell'oggetto in esame. Questo metodo è ampiamente usato per la modellazione delle città e per le applicazioni architettoniche; i sensori possono essere anche a basso costo e il processo di elaborazione dei dati metrici è fondamentalmente interattivo e richiede, nonostante lo sviluppo di numerosi algoritmi che permettono l'estrazione automatica da immagini orientate (vedi paragrafi successivi), l'intervento dell'operatore,



Modello di una vasca di depurazione, all'interno del Palazzo Occidentale di Masada, acquisito con fotogrammetria.

che è ancora fondamentale per la generazione di precisi e affidabili modelli tridimensionali.

L'integrazione dei due metodi risulta fondamentale soprattutto per la ricostruzione di complessi e grandi edifici, in cui ogni metodo usato singolarmente non permette di ottenere risultati accurati; in questi casi si può usare la fotogrammetria per una ricostruzione generale e il laser per i dettagli architettonici più complicati.

I dati ottenuti durante la fase di rilievo vengono portati all'interno del computer tramite il software di elaborazione, dove vengono eseguite le principali operazioni di trattamento della nuvola di punti già precedentemente descritte. Queste operazioni sono valide non solo per l'elaborazione bidimensionale del dato ma soprattutto per una modellazione diretta dalla nuvola di punti acquisita attraverso strumentazione laser scanner.

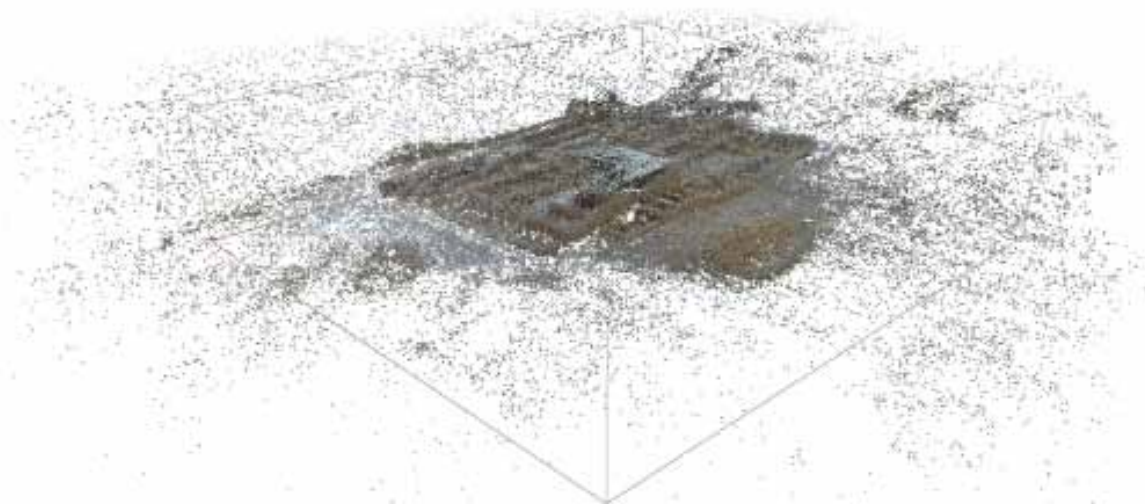
Le prime fasi di elaborazione dei dati riguardano le operazioni di pulizia degli elementi indesiderati presenti nella nuvola grezza, prodotta direttamente dallo scanner o da fotogrammetria.

Questa pulizia dei dati è un'operazione necessaria poiché molte sono le ragioni che possono causare l'acquisizione di punti che non appartengono all'oggetto. La maggior parte di questi punti errati può essere eliminata solo mediante procedimenti iterativi, poiché non esiste un metodo automatico che preveda tutte queste possibilità di errore.

Queste nuvole di punti però sono soggette anche ad un certo rumore di fondo, determinato dall'accuratezza dello strumento e dall'incertezza di misura, che possono renderli di difficile utilizzazione. Per ridurre questo effetto vi sono algoritmi che operano un filtraggio dei dati, migliorando la leggibilità e l'affidabilità della geometria ricavata, sono gli algoritmi di *smoothing*.

In generale possiamo dire che per ottenere un modello rigoroso delle superfici ricavate, con il laser scanner o attraverso la fotomodellazione, bisogna operare una riduzione dei dati acquisiti, attraverso un filtraggio intelligente dei punti rilevati.

L'operazione successiva è l'allineamento, nella quale avviene la scelta dei punti di collegamento all'interno



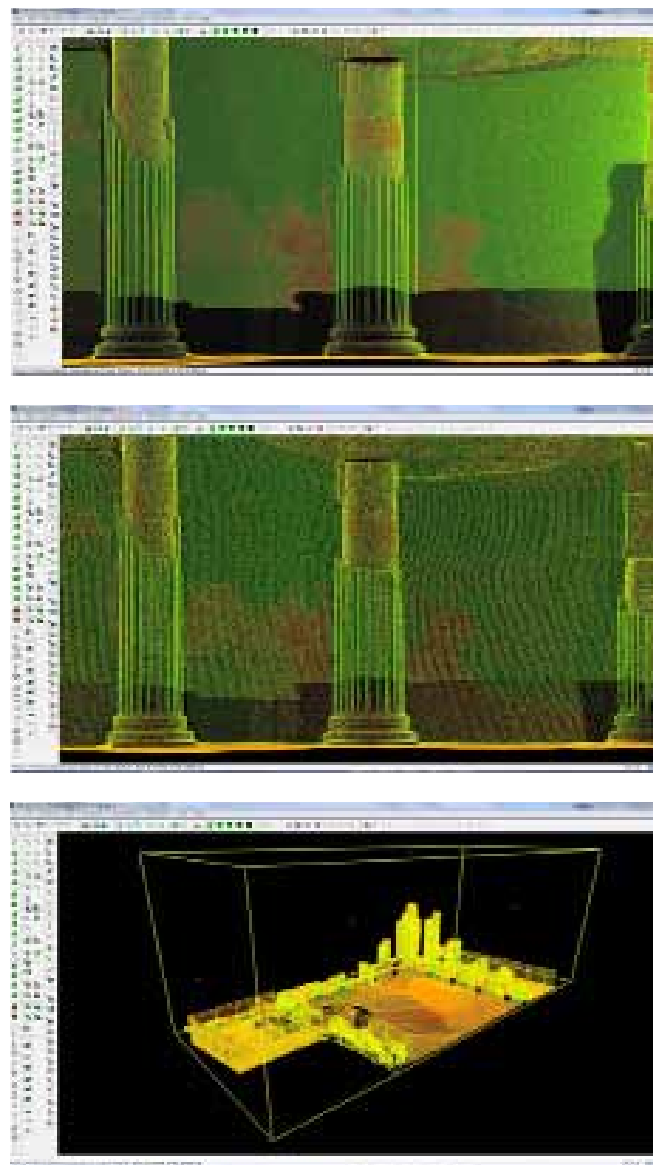
Nuvola dei punti del Palazzo Occidentale di Masada, acquisita mediante fotogrammetria aerea. Nella prima fase di processamento, vengono calcolati anche dei punti che non appartengono all'architettura, ma all'intorno. Questi punti dovranno accuratamente essere eliminati per non recare problematiche durante la generazione della mesh.

delle due scansioni e la scelta dei punti omologhi.

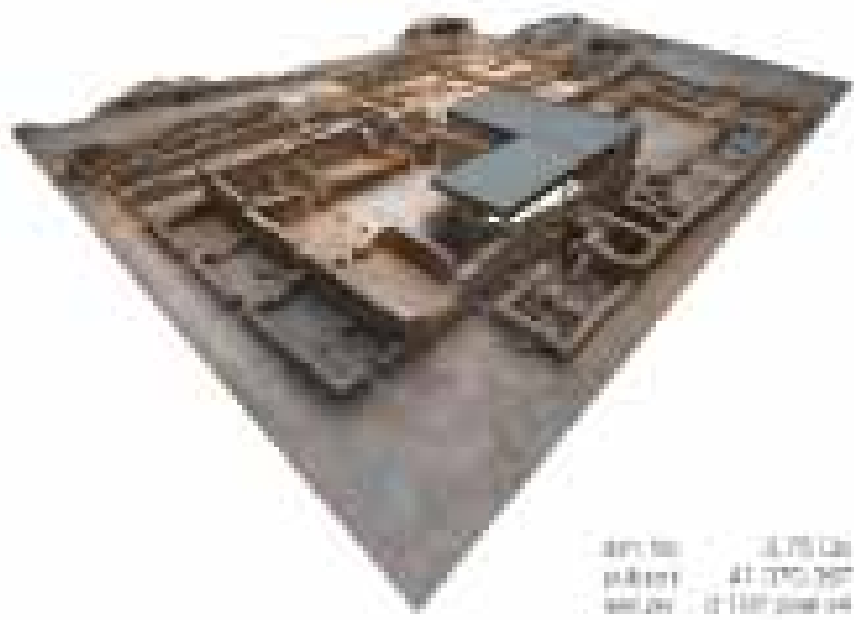
In seguito alla fase di allineamento, già descritta nei capitoli precedenti, ci troviamo di fronte ad una nuvola di punti che rappresenta l'oggetto rilevato; è importante prima di passare alla fase di creazione della mesh tridimensionale, controllare il corretto allineamento della nuvola e la presenza di aree di sovrabbondanza e di sovrapposizione che, se non correttamente adiacenti, creeranno problematiche di creazione errata della mesh. In funzione della tipologia di modello che si andrà a creare, sarà necessario eseguire una fase di decimazione della nuvola dei punti, nelle porzioni dove la complessità e l'elevato livello di informazione possono essere trascurate, ad esempio per la modellazione del costone roccioso dell'attopiano, è stata apportata una decimazione di 4 mm. Questo ha permesso di alleggerire la nuvola senza perdita di dettaglio. Per quando riguarda i resti archeologici, non si è apportata riduzione superiore ad 1 mm. Tale operazione ci consente di creare un modello tridimensionale di elevata affidabilità da una nuvola descritta da un minor numero di punti, quindi più "leggera" e di facile gestione da parte dei diversi software. L'intera nuvola viene poi divisa in diverse parti, tramite l'utilizzo della limit box, le quali vengono successivamente esportate dal sotto forma di file xyz. (file che mantiene le coordinate spaziali) e importate in un programma di modellazione.

Per i casi presi in esame si è utilizzato il software di mesh editing Geomagic.

L'operazione di modellazione vera e propria avviene con la trasformazione della nuvola di punti in una superficie discreta tramite la generazione delle mesh. Nel caso di oggetti dotati di una geometria semplice la creazione del modello avviene con un processo in cui l'operatore interviene in maniera minimale, mentre nel caso di oggetti complessi, caratterizzati da molte discontinuità (per esempio colonne, statue, nicchie o architetture complesse), ottenere un modello corretto richiede tempi di preparazione più lunghi ed un notevole intervento da parte dell'operatore.



Nelle due immagini, in alto, porzione di nuvola di punti dove si apprezza la decimazione. Data la complessità e l'elevato livello di informazione della nuvola del sito di Masada, che ci consente di creare un modello tridimensionale di elevata affidabilità, il dato risulta poco gestibile e pesante, quindi si è optato per una decimazione di 1 mm. Nella terza immagine esempio di divisione in porzione, tramite l'utilizzo della limit box. L'esportazione, dal programma di gestione del data base tridimensionale, sotto forma di file .xyz permette di mantenere le coordinate spaziali, ma non è detto che il programma di modellazione possa gestire l'intera nuvola, quindi è buona regola, per rilievo di una certa entità e per mantenere più informazioni possibili, dividere in modo rigoroso la nuvola, prima di procedere con l'esportazione.



Nelle immagini, modello tridimensionale del Palazzo Occidentale, di Masada. Questo è un esempio di divisione in aree, per la gestione più fluida della restituzione tridimensionale. La progettazione attenta in fase pre-acquisizione, ha permesso un'acquisizione più spedita e organizzata del palazzo, visto le tempistiche molto ridotte, infatti la campagna di rilievo è stata effettuata in quattro giorni. L'elaborazione per porzioni ha permesso un controllo e un'ottimizzazione più accurata.

5.1.2 La generazione della nuvola di punti attraverso la fotografia

Per quando riguarda la modellazione da fotogrammetria, una volta acquisite le immagini, l'intero flusso di lavoro, per derivare informazioni metriche di una scena, deve passare attraverso la procedura fotogrammetrica elencata in preve, di seguito:

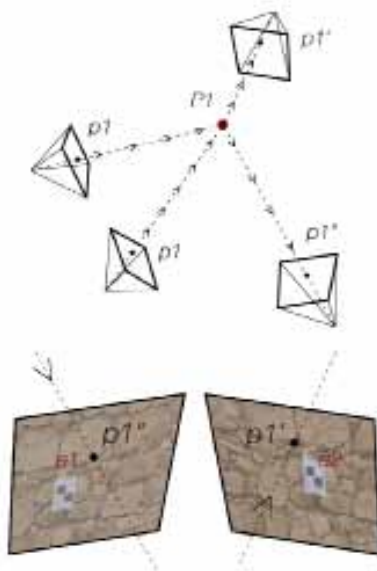
- calibrazione della fotocamera per determinarne l'orientamento interno;
- triangolazione delle immagini per determinarne l'orientamento esterno;
- restituzione 3D della scena per derivarne una nuvola di punti non strutturata;
- creazione di un modello geometrico 3D strutturato;
- texture mapping e visualizzazione del modello 3D finale fotorealistico.

Prima del processamento è però opportuno accertare

che non sia presenti immagini sfocate che comprometterebbero la qualità finale del risultato digitale. In seguito all'allineamento delle foto inserite all'interno dei software, come ad esempio Agisoft PhotoScan utilizzato per la restituzione dei modelli presi come casi studio, abbiamo la restituzione di una mappa delle profondità, ed una mappa relativa alle qualità di ogni immagine: si tratta di parametri a partire dai quali sarà poi possibile ottenere un attributo spaziale e la sua affidabilità, attraverso la comparazione fra i vari fotogrammi.

Dal momento che il modello è strutturato in maniera evidente dalle immagini di partenza, è chiaro che sull'accuratezza del risultato finale influisce positivamente la corretta presa dei fotogrammi.

Nello specifico, è opportuno che l'immagine sia circo-



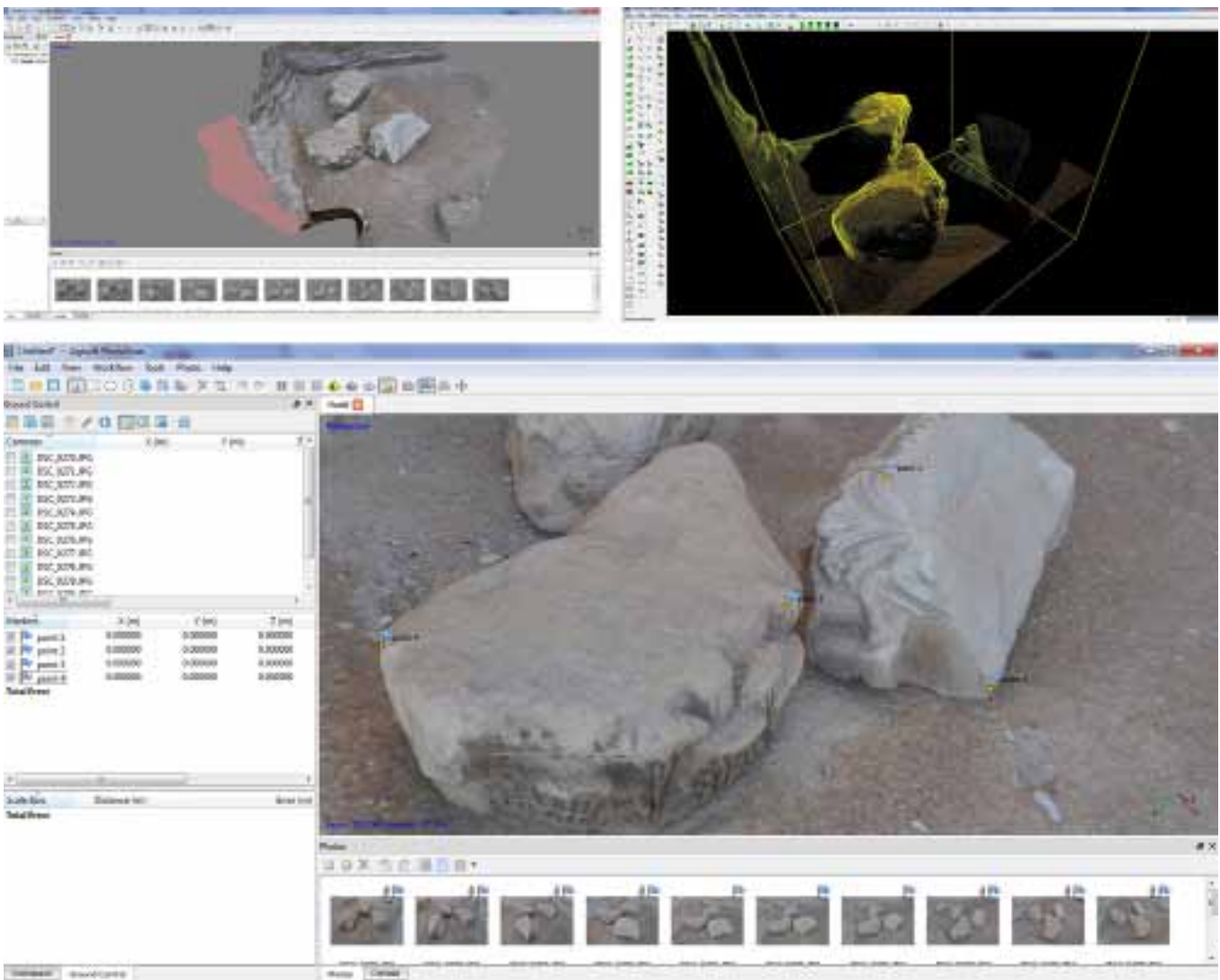
Markers	X (m)	Y (m)	Z (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> point 1	184.379000	-104.513000	0.094000	0.021183	6	0.372
<input checked="" type="checkbox"/> point 2	165.691000	-104.317000	1.140000	0.030299	10	1.146
<input checked="" type="checkbox"/> point 3	156.308000	-106.297000	-6.239000	0.031069	65	0.000
Total Error				0.036518		0.416

Markers	X (m)	Y (m)	Z (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> point 1	184.379000	-104.513000	0.094000	0.016956	6	0.205
<input checked="" type="checkbox"/> point 2	165.691000	-104.317000	1.140000	0.040701	10	0.380
<input checked="" type="checkbox"/> point 3	156.308000	-106.297000	-6.239000	0.025573	65	0.073
Total Error				0.029208		0.163

Nelle immagini, identificazione dei markers ed esempio di errori di individuazione del punto, sia che questo è un punto dell'oggetto o che sia una mira target applicato durante le operazioni di acquisizione.

scritta alla sola area esaminata, e i fotogrammi non devono risultare eccessivamente distanti l'uno dall'altro. Al di là di queste operazioni, i fotogrammi non solo vanno orientati gli uni rispetto agli altri, ma anche rispetto ad un sistema di riferimento generale: è per questo che si parla di orientamento relativo, cioè di un fotogramma rispetto ad un altro e di orientamento assoluto quando, a restituzione ultimata, il modello

ottenuto viene rototraslato per renderlo congruo con un rilevamento topografico e semplicemente per allinearne rispetto a degli assi che ne facilitino le operazioni di restituzione. In definitiva non è molto diverso da quello che avviene nell'ambito delle operazioni di allineamento che caratterizzano i rilevamenti laser scanner nei quali, le singole nuvole di punti o i singoli modelli mesh, subiscono un doppio allineamen-



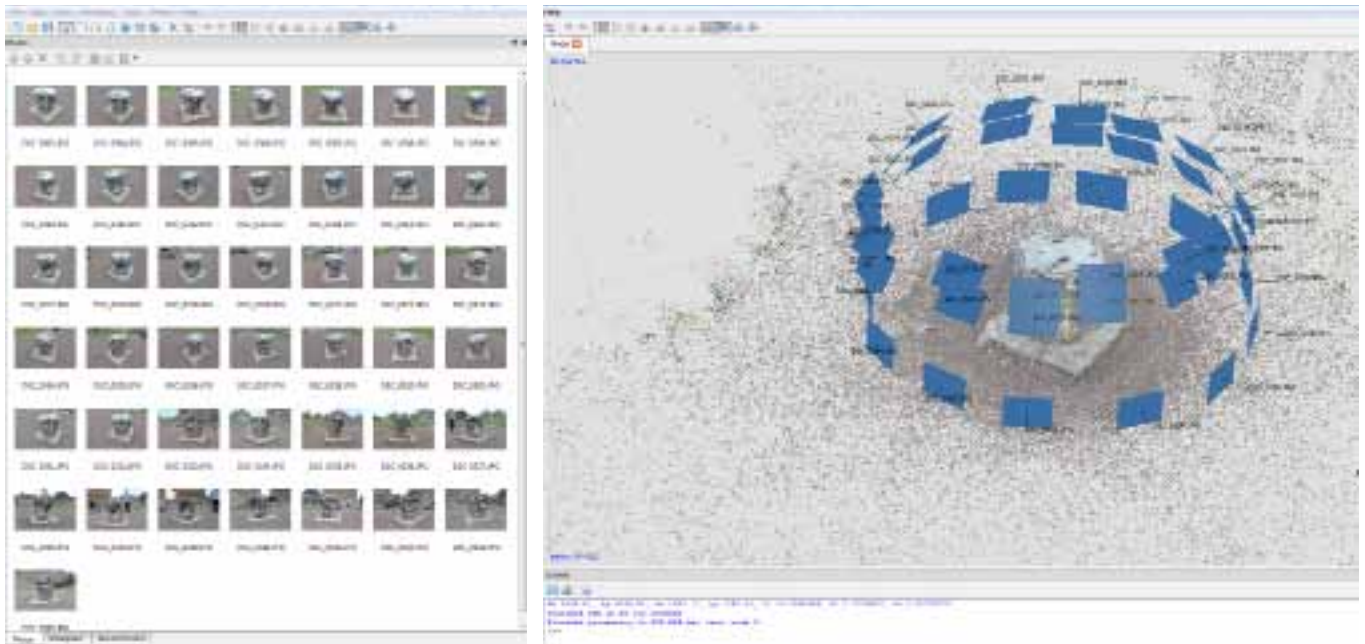
Sopra, scalatura e rototraslazione del modello, attraverso identificazione di punti omologhi, sulla nuvola di punti, generata da rilievo laser scanner, precedentemente georeferenziata attraverso rilievo GPS.

to: uno relativo, fra scansione e scansione successiva, generalmente ottenuto interattivamente per selezione di punti omologhi, e uno assoluto rispetto ad una rete topografica o rispetto agli assi del sistema cartesiano. In altri termini, l'individuazione dei punti omologhi permette il così detto orientamento esterno dei singoli fotogrammi e cioè l'individuazione per ciascuno di essi della posizione del centro di presa e l'orientamento della normale uscente dal piano del quadro passante per detto punto (asse di presa).

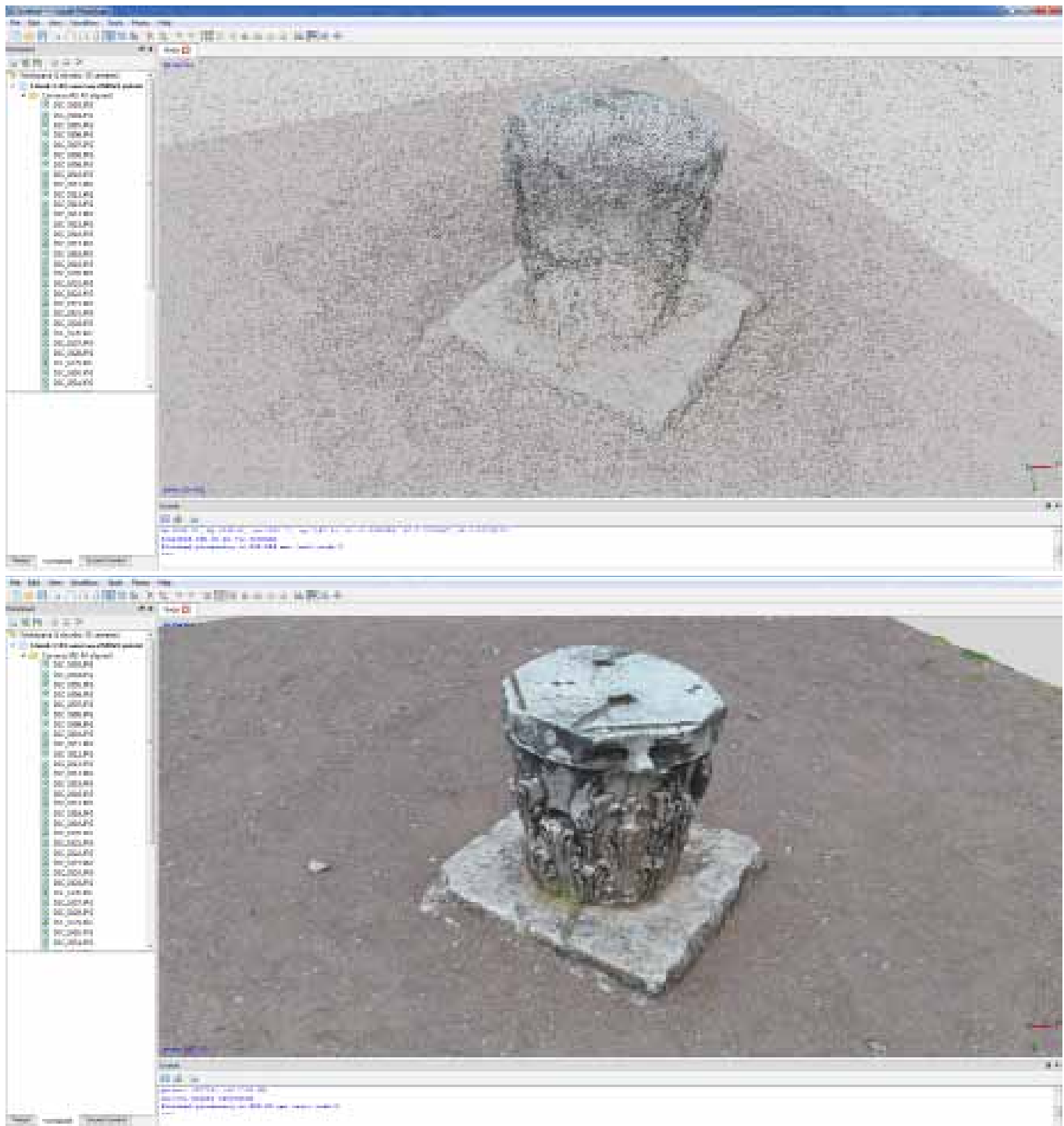
Questo tipo di orientamento consiste nell'individuare sei parametri (le tre coordinate del centro di presa, e le tre rotazioni dell'asse) necessari a ricostruire il legame proiettivo fra più fotogrammi.

Sotto il profilo operativo esistono naturalmente anche delle significative differenze fra programma e programma, ma in generale la soluzione più diffusa prevede l'importazione di una serie di fotogrammi nell'apposito software che per prima cosa ricerca nel proprio database se esiste un tipo di obiettivo e modello di macchina fotografica precedentemente calibrato

che sia compatibile con i dati EXIF (Exchangeable Image File Format) salvati nelle foto. Ciò nonostante, se la fotocamera non è stata calibrata e se lo zoom è rimasto invariato, è comunque possibile eseguire la fotomodellazione grazie ai soli dati EXIF: il risultato sarà molto meno affidabile dato che tali etichette, salvate in formato .JPG oppure .TIFF, sono generiche e non precise come quelle ricavate grazie alla procedura di orientamento interno. In ogni caso sarà possibile conoscere molti dati utili come l'apertura, la velocità dello scatto, la lunghezza focale, il giorno nel quale si è scattata la foto, ecc.: comunque sia, per dare una idea del differente ordine di grandezza fra dati EXIF e calibrazione basti pensare che nell'esempio della cupola mostrato in questo contributo la lunghezza focale della fotocamera riportata dall'etichetta EXIF è genericamente pari a 18mm, mentre quella della calibrazione corrisponde a 18,1034 mm. Naturalmente la verifica delle equazioni di collinearità in un caso o nell'altro porterà ad una differente accuratezza del risultato.



Importazione dei fotogrammi all'interno di Agisoft Photoscan e generazione della nuvola di punti, rada.



Nella prima immagine, generazione della nuvola di punti (punti calcolati: 244822), nella seconda immagine, generazione della nuvola densa (punti calcolati 3627061)

5.1.3 Elaborazione dei dati

Quindi, a prescindere dal metodo di acquisizione e generazione delle nuvole di punti, esse devono essere pre-elaborate dato che non sono utilizzabili direttamente.

All'interno dei programmi di mesh editing come Geomagic dovranno essere ripercorse alcune delle operazioni già eseguite, questo per affinare e ridurre maggiormente le problematiche nella generazione della mesh. Quindi alcune delle operazioni essenziali prima dell'elaborazione della mesh sono: il filtraggio, la generazione della mesh e l'allineamento del modello.

La prima operazione riguarda il filtraggio dei dati in quanto sono presenti nella nuvola degli outlier che devono essere eliminati. Essi derivano, come già accennato, principalmente dallo strumento o da un'errata corrispondenza tra i marker nel caso di una nuvola generata da immagini. In altre parole può succedere che due marker diversi vengano riconosciuti dal sistema come corrispondenti e quindi si compie un errore nell'individuare la profondità.

L'operazione successiva è la generazione della mesh da nuvola di punti, in questa operazione viene generato il modello solido rappresentato da una serie di facce triangolari.

Il modello solido viene poi allineato orientandolo rispetto ad una terna di riferimento standard, fissando i tre gradi di libertà di traslazione ed i tre di rotazione.

5.1.4 Filtraggio dei dati

Lo scopo del filtraggio dei dati è ottenere una nuvola pulita, in cui tutti i punti misurati hanno una elevata probabilità di appartenere all'oggetto scansionato.

I filtri utilizzati provvedono all'eliminazione dei punti d'errore eliminando prima i punti più isolati e distanti per poi intervenire su quelli più vicini alla superficie del piede.

Il filtraggio dei dati avviene attraverso tre step:

- il primo step è il filtro basato sulla densità di punti locale.

Il primo filtro agisce sulla densità dei punti nello spazio. La condizione per comprendere se il punto è un outlier è legato alla densità di punti presente nella porzione di volume analizzato. Operativamente i programmi di ottimizzazione della nuvola di punti, dividono il dominio di esistenza dei punti in settori e viene controllato se all'interno di ogni settore è presente una certa quantità di punti. I parametri utilizzati, numero dei punti all'interno del settore, grandezza e geometria dei settori dipendono dal sistema di acquisizione e dalla precisione dell'algoritmo. Allo scopo di ottimizzare la procedura sono stati provati vari valori in un range compreso tra 0.00 e 100.00 e a diverse sensibilità;

- il secondo step consiste nell'applicazione del filtro basato sul clustering.

Per affinare l'analisi ed eliminare altri outlier viene eseguito un algoritmo di clustering di tipo Kmeans, mediante il quale si cerca, su base statistica di raggruppare i dati acquisiti. Questo tipo di filtraggio si occupa di analizzare gruppi di punti rispetto alla distanza. Quindi nell'algoritmo utilizzato viene impostata l'analisi tramite la distanza euclidea imponendo un numero di cluster in funzione della dimensione della nuvola. I risultati di quest'operazione sono gruppi isolati di punti a distanze diverse all'interno del range indicato dall'operatore.

Più il valore indicato è alto maggiori saranno i valori anomali riscontrati;

- il terzo step ed ultimo è il filtro basato sulla superficie polinomiale.

Questo terzo filtro, da utilizzare successivamente ai filtri basati sulla densità e sul clustering, è basato sull'interpolazione dei punti mediante una superficie polinomiale. E' necessario ipotizzare che la superficie di un oggetto misurato sia sufficientemente "smooth", in altre parole dalla nuvola di punti si deve poter ricostruire zone da poter approssimare con una superficie polinomiale che per sua natura può essere caratterizzata da un numero limitato di minimi e flessi.

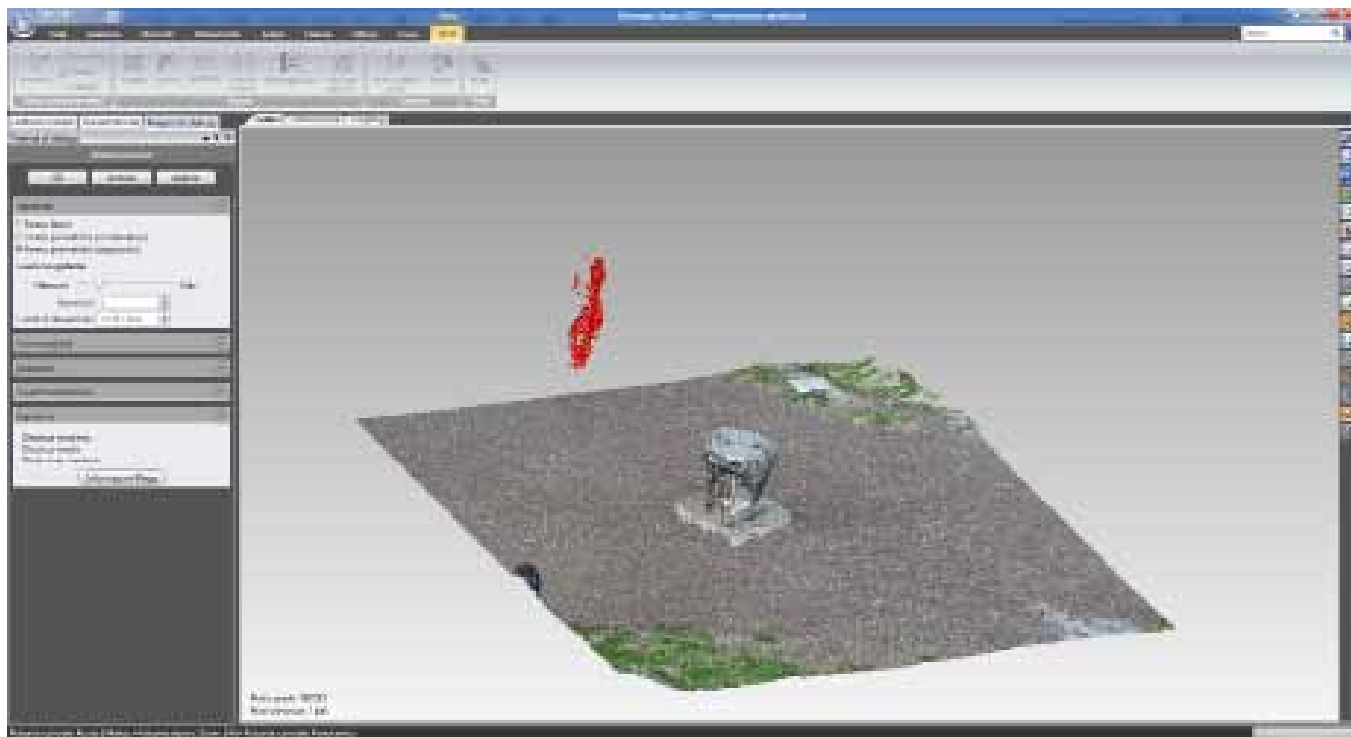
La Reduce Noise serve per compensare l'errore, che nel caso di acquisizione con laser scanner e quello che viene definito rumore, spostando i punti per posizionarli statisticamente in una posizione ritenuta più corretta. Questo tipo di errore può generare una mesh

che presenta spigoli e curve ruvide. Quando si utilizza questo filtro, il risultato è una riduzione della rugosità della superficie che si presenterà più levigata.

Anche in questo caso mediante una opportuna taratura si deve definire una distanza limite oltre la quale il punto viene eliminato. Inoltre, risulta indispensabile definire il grado di levigazione che si vuole ottenere in base alla morfologia stessa dell'oggetto da restituire.

Le operazioni successive, dopo avere eseguito i tre filtri sulla nuvola e prima della generazione della mesh, sono: l'eliminazione di tutte quelle porzioni di punti che rappresentano oggetti estranei al manufatto oggetto dell'indagine, e l'orientamento delle normali.

Ovvero, con orientamento delle normali, si intende che il vettore perpendicolare alla superficie e che punta all'esterno o all'interno dell'oggetto (perché è stata fatta alcuna determinazione di interno ed esterno), viene orientato in maniera positiva verso l'interno o verso l'esterno.



Eliminazione dei punti isolati, al di fuori di un determinato range indicato dall'operatore. Nella pagina a fianco, trasformazione della nuvola di punti in mesh e verifica delle lacune e mancanze, da correggere.

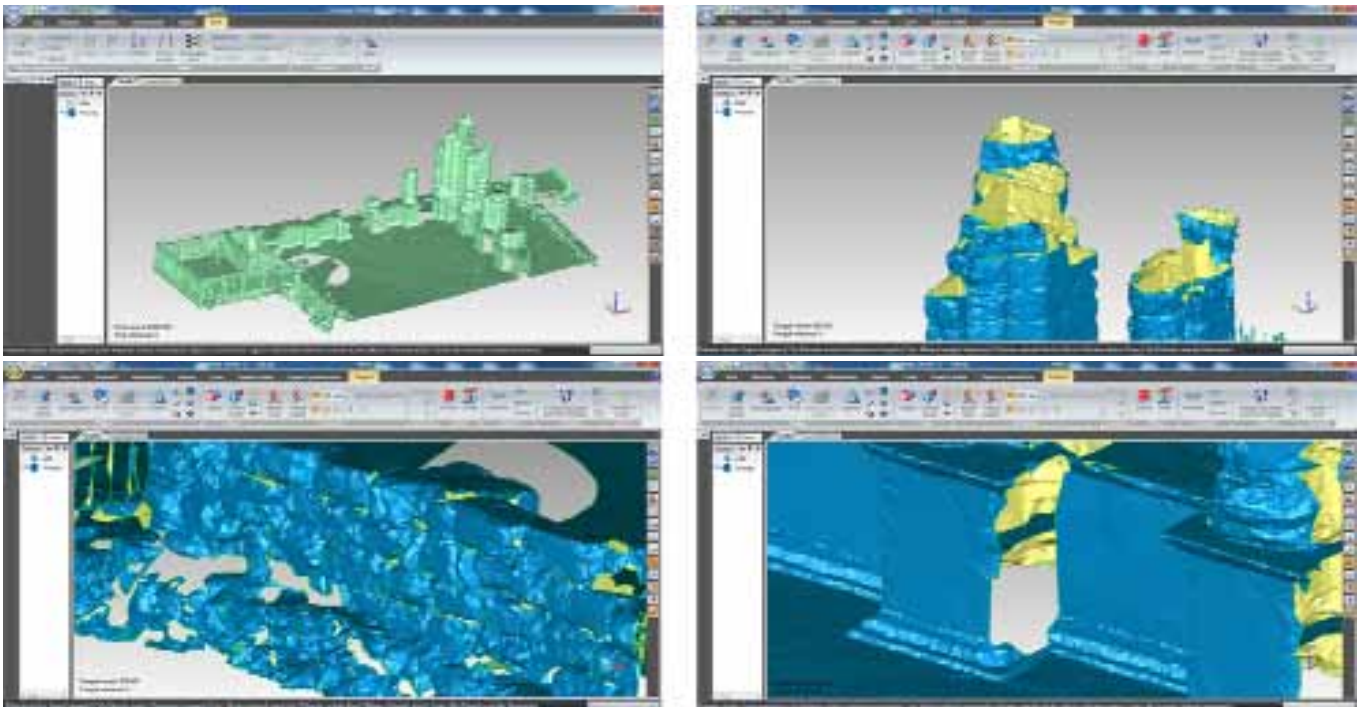
5.1.5 Mesh editing

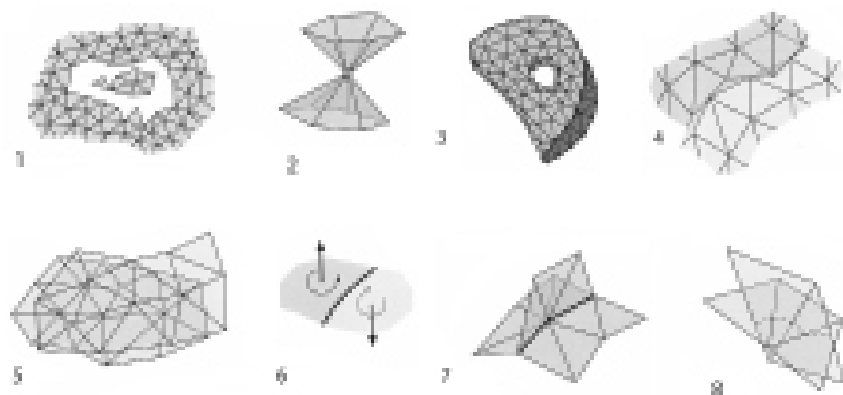
All'interno del programma Geomagic Studio 12 la nuvola dei punti caricata attraverso un file di estensione .xyz viene elaborata e trasformata in una mesh, cioè passa da una visualizzazione puntiforme dell'oggetto ad una superficie composta da una innumerevole quantità di poligoni aventi per vertice i punti della nuvola. Attraverso la fusione delle varie scansioni e la seguente realizzazione della mesh si ottiene quindi il modello poligonale, all'interno del quale tuttavia sono spesso rinvenibili imperfezioni ed anomalie topologiche, che sarà dunque necessario eliminare attraverso una serie di passaggi al termine dei quali si raggiungerà un miglioramento della qualità della superficie poligonale. A questo punto sono in particolare due le operazioni a cui sarà necessario procedere: la correzione di errori

topologici e la chiusura delle lacune esistenti sulla superficie.

Ciò significa che bisognerà innanzitutto eliminare tutti i poligoni della mesh caratterizzate da collegamenti anomali, dove nello specifico tra gli errori più comuni da rimuovere troviamo per esempio triangoli degeneri, triangoli duplicati, spigoli degeneri e inconsistenti.

Per quanto riguarda invece la fase di chiusura delle lacune nella mesh, molte delle quali sono spesso causate dalla mancanza di dati in zone d'ombra presenti sull'oggetto durante l'acquisizione, si procede solitamente a tale chiusura attraverso una nuova triangolazione delle aree mancanti, utilizzando in particolare le informazioni fornite dai triangoli che delimitano il bordo della lacuna in questione.



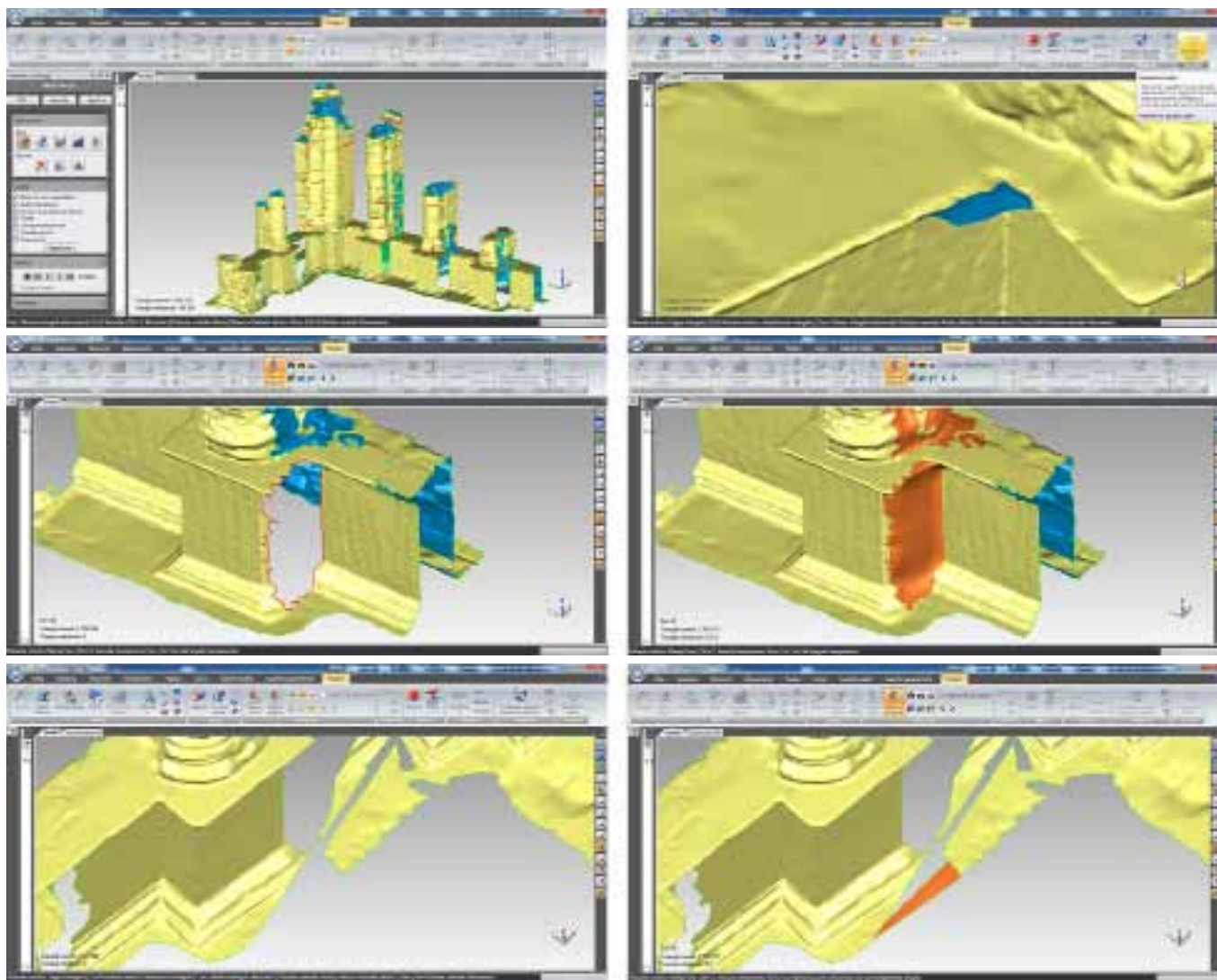


A fianco, errori riscontrabili nelle mesh poligonali:
 1. lacune e isole; 2. vertice singolare; 3. maniglie;
 4. divari e piccole sovrapposizioni; 5. ampie sovrapposizioni; 6. orientamenti incoerenti;
 7. spigoli complessi; 8. intersezioni.

Nelle immagini sotto, esempi di chiusura delle lacune.
 La chiusura delle porzioni mancanti viene generalmente eseguita con una nuova triangolazione delle aree sfruttando le informazioni date dai triangoli che definiscono il bordo delle lacune.

L'operazione automatica e manuale di pulizia e rimozione degli errori è eseguita all'interno del programma di mesh editing.

Nella prima immagine operazione automatica di riconoscimento degli errori, nelle altre operazioni di chiusura delle lacune.



5.1.6 Successivo post-processing della mesh

Affinchè il modello digitale 3D ottenuto dalle fasi precedenti si adatti perfettamente all'applicazione che è in corso di conduzione, può essere necessario sottoporlo ad un'ulteriore post-processing, poichè esso potrebbe risultare caratterizzato da un sovracampionamento che ne impedisce l'utilizzabilità in relazione ad applicazioni interattive. Di conseguenza è fondamentale avere ben chiaro già a priori qual'è lo scopo del modello digitale, in modo tale da poter stabilire fin da subito il numero dei poligoni che dovrà contraddistinguere il modello.

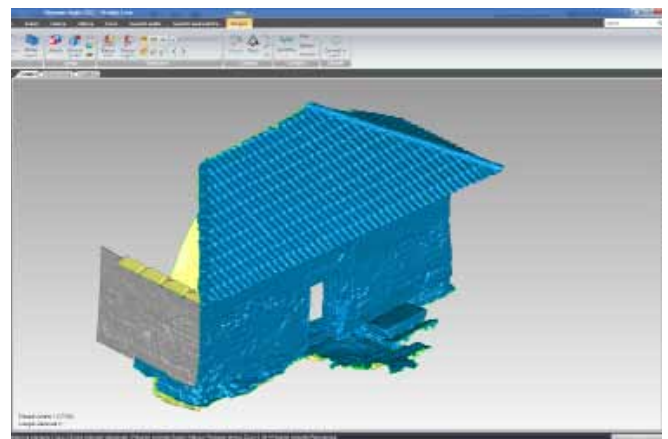
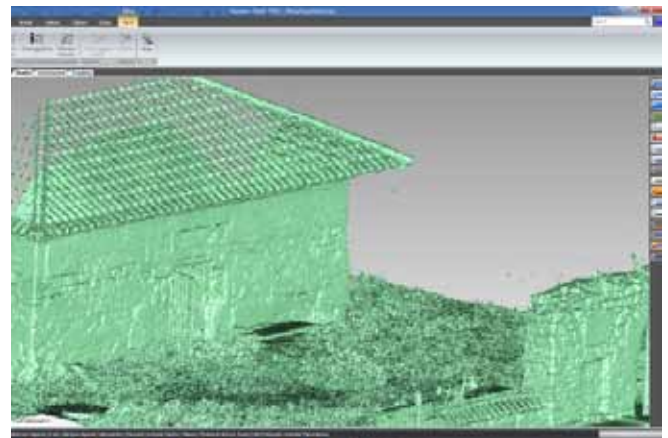
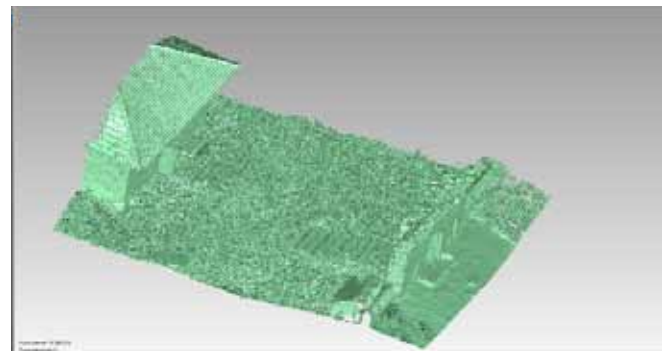
Se il numero di poligoni risulta eccessivo, è inoltre possibile procedere ad una operazione di decimazione della mesh, con la quale si riduce notevolmente la complessità del modello, poichè vengono in questo modo eliminati vertici e sorvegliate le variazioni subentrate rispetto all'accuratezza iniziale.

La scelta dell'utente in fase di decimazione acquista quindi un grande valore progettuale, ancor più se si pensa che il numero di poligoni che può rappresentare un oggetto varia in base non solo alle sue caratteristiche formali ma anche all'utilizzo che se ne vuol fare.

Nelle zone del modello caratterizzate da una mesh "molto rumorosa", è infine possibile lisciare la superficie, attraverso procedure il cui scopo è quello di ridurre queste piccole increspature in modo tale che venga assicurata la forma globale.

Tale procedura, che viene solitamente definita come smoothing, ha ad oggetto l'area che circonda ogni vertice, la quale deve avere un raggio almeno doppio rispetto al passo di campionamento.

Nell'immagine, la presenza di vegetazione, provoca un rumore non trascurabile. Quindi in questo caso si procede all'eliminazione totale del terreno, prima di passare alla creazione della mesh. Successivamente attraverso una modellazione per curve di livello, ricavate dal rilievo, è stata ricostruita la morfologia mancante.



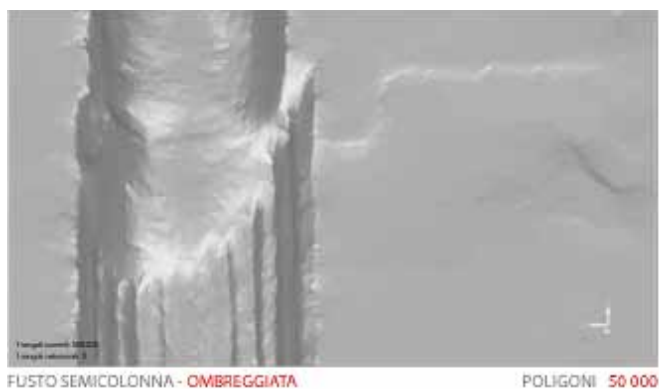
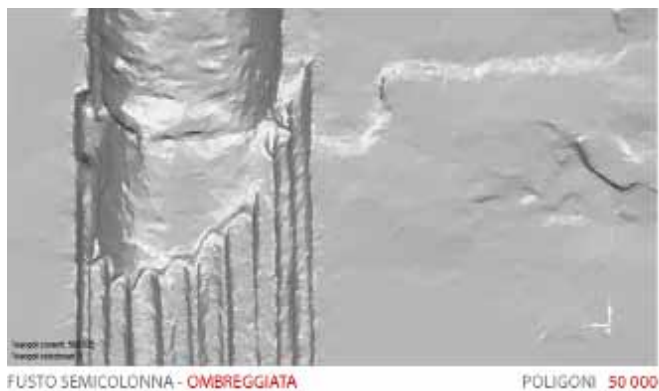
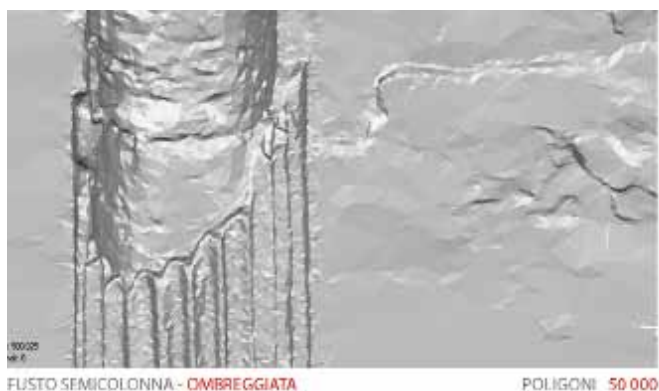
5.1.7 Smoothing

La smoothing è una lisciatura della mesh e costituisce un passaggio essenziale nell'elaborazione della geometria in relazione a numerose applicazioni, fra cui ad esempio la progettazione di superfici ad alta qualità, la riduzione del rumore dei dati ottenuti, il blending delle superfici e la chiusura di eventuali buchi dati, dalla mancanza di sufficienti punti su una data porzione dell'oggetto.

Di conseguenza negli ultimi tempi sono state elaborate varie tecniche finalizzate alla lisciatura delle mesh, anche se nell'ambito dei software commerciali sono state perfezionate solo tecniche lineari, quali il cd. smoothing Laplaciano e a flusso di curvatura media, di cui ci si avvale principalmente per l'eliminazione del rumore e per generare superfici idonee ai fini della modellazione in multi-risoluzione.

In particolare l'algoritmo di eliminazione del rumore dovrà essere capace di gestire in modo efficace una grande mole di dati, e alcune caratteristiche della superficie, come bordi acuti e angoli, devono necessariamente conservarsi, in quanto non possono essere definiti in maniera indefinita.

La lisciatura Laplaciana costituisce quindi una tecnica semplice ed estremamente efficace che si fonda sulla diffusione lineare della posizione dei vertici.



Nelle tre immagini a fianco, il risultato di tre differenti test smoothing con percentuale differente di levigatezza, intensità e priorità della curva.

5.1.8 Decimazione della mesh

La decimazione delle mesh descrive una classe di algoritmi volta a convertire una certa mesh poligonale in un'altra che presenta un numero più ridotto di facce, spigoli e vertici. Attraverso tale procedura vengono definiti criteri di qualità, come la distanza geometrica o l'apparenza visiva, che contraddistinguono le mesh allo scopo di salvaguardare il più possibile le specifiche proprietà dell'originale.

Gli algoritmi di semplificazione di poligoni fanno ricorso ad una combinazione di vari operatori, fra i quali ritroviamo in particolare: la normalizzazione, (ossia l'eliminazione dei poligoni degenerati o ridondanti), la semplificazione dei vertici e degli spigoli, la semplificazione della dimensione della faccia (cioè la riduzione delle aree più piccole di una certa area di soglia), ed infine la semplificazione delle facce secondo le normali, consistente nella fusione delle facce adiacenti con normali quasi parallele.

Nei confronti del concetto di decimazione di una mesh possono essere adottati differenti approcci, che anche in letteratura vengono difatti distinti in algoritmi di raggruppamento dei vertici, algoritmi di decimazione incrementale e algoritmi di ricampionamento. Il primo tipo di algoritmi è in genere piuttosto efficace, anche se non sempre le mesh che ne derivano sono di una qualità soddisfacente; gli algoritmi incrementali producono invece mesh di maggiore qualità, mentre le tecniche di ricampionamento rappresentano l'approccio più generico alla decimazione delle mesh.

A questo punto vengono distribuiti, in modo più o meno libero, nuovi campioni lungo la geometria originale delle superfici lineari, ed è appunto collegando tali campioni che viene creata una mesh totalmente nuova.

Tuttavia il principale inconveniente del ricampionamento è costituito dall'errore alias, che si verifica quando il pattern di ricampionamento non è perfettamente

conforme rispetto alle caratteristiche della geometria originale. In genere comunque i metodi adoperati nel software commerciale per la gestione di dati da acquisizione 3D, fanno uso delle tecniche di mesh decimation incrementale.

Gli algoritmi incrementali rimuovono un singolo vertice della mesh alla volta, ad ogni passo viene infatti individuato il vertice che risulta più idoneo ad essere eliminato sulla base di parametri che vengono determinati dall'utente, e che si possono distinguere in criteri binari e continui.

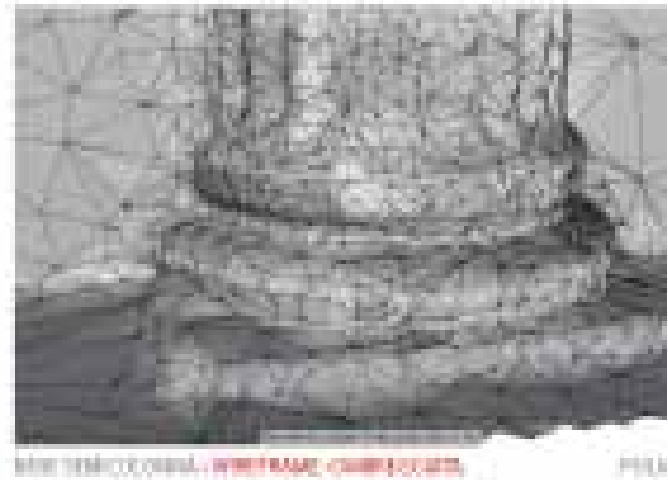
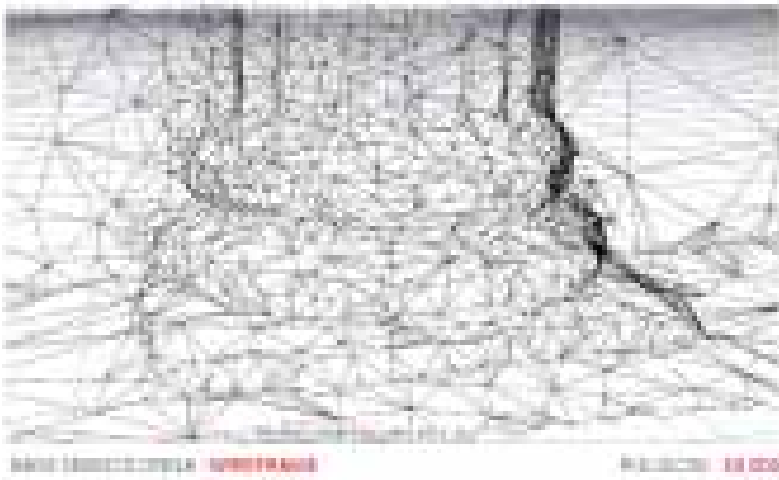
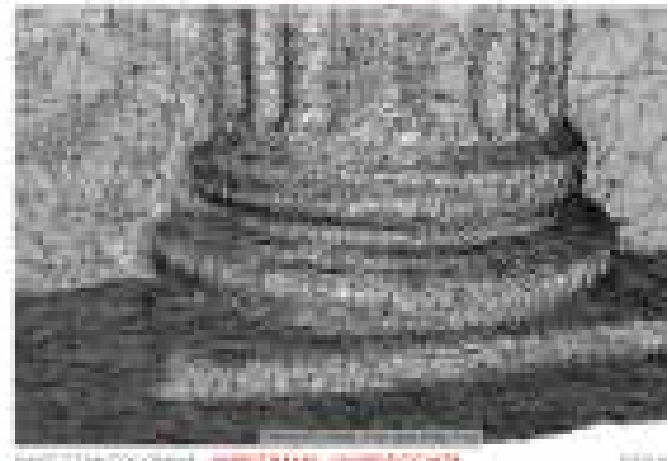
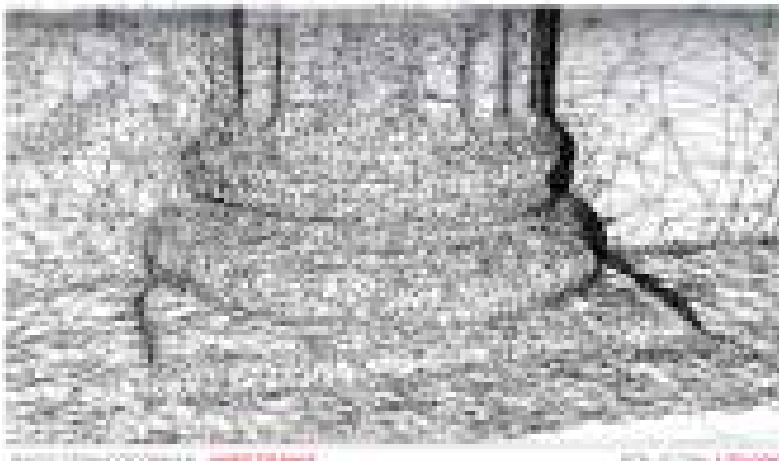
Ogni volta che viene eseguita una rimozione, inoltre, varia anche la geometria della superficie, e dovranno quindi essere nuovamente rivalutati anche tali criteri di qualità.

Poiché l'obiettivo principale della rimozione di base è quello di fare in modo che l'operazione risulti il più semplice possibile, viene realizzata una forte decimazione attraverso l'applicazione di vari passi di decimazione semplice, impiegando gli operatori Euleriani. Il primo operatore, in particolare, si propone di eliminare un vertice e i suoi triangoli adiacenti, mentre un secondo operatore parte da due vertici adiacenti e collassa il bordo in comune tra i due.

Tutte queste operazioni di rimozione, comunque, mantengono la consistenza delle mesh, e quindi anche la topologia della superficie sottostante. Nella mesh originale tuttavia nessun buco può essere chiuso e nessuna maniglia può essere cancellata completamente.

Se uno schema di decimazione fosse infatti capace di semplificare la topologia del modello di input, sarebbe necessario utilizzare un operatore di rimozione non-Euleriano, dove la forma più comune di esso è costituito dal cd. operatore di contrazione del vertice, in cui due vertici possono essere contratti in un nuovo vertice.

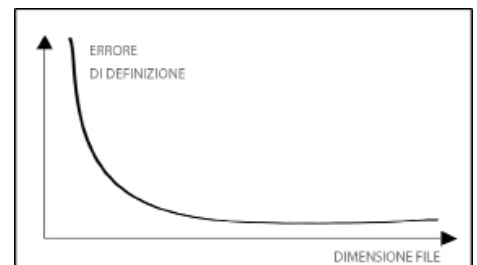
Sara Bua





Il modello 3D ottenuto dalla fase di mesh editing deve sempre tener conto della finalità per il quale è stato concepito. Non sempre infatti risulta utile avere un modello nato da un'eccessivo numero di punti, con un'eccessiva quantità di informazioni, che risulta però poco fruibile e non direttamente utilizzabile nelle diverse applicazioni interattive. E' importante conoscere a priori la finalità del modello 3d, per poter individuare il giusto numero di poligoni che lo andranno a comporre. Attraverso il processo di Decimazione (effettuabile in qualsiasi momento) è possibile diminuire il numero di poligoni, di qualsiasi quantità percentuale, mantenendo comunque sotto controllo le variazioni introdotte rispetto alla precisione iniziale.

Nell'esempio sopra riportato, riguardante il basamento di una semicolonna della terrazza inferiore del Palazzo di Erode, possiamo vedere come la decimazione giochi un ruolo fondamentale nella realizzazione di un modello e come il livello di dettaglio vari al variare del numero di poligoni.



L'esempio descrive bene inoltre quanto cresca in maniera esponenziale il livello di accuratezza ed descrittiva della morfologia del manufatto al calare del numero dei poligoni che descrivono la mesh.

5.1.9 Remeshing

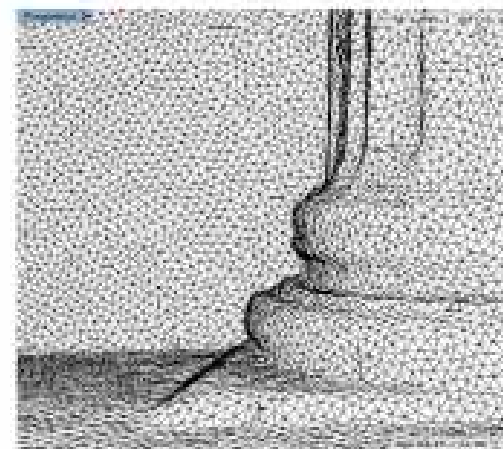
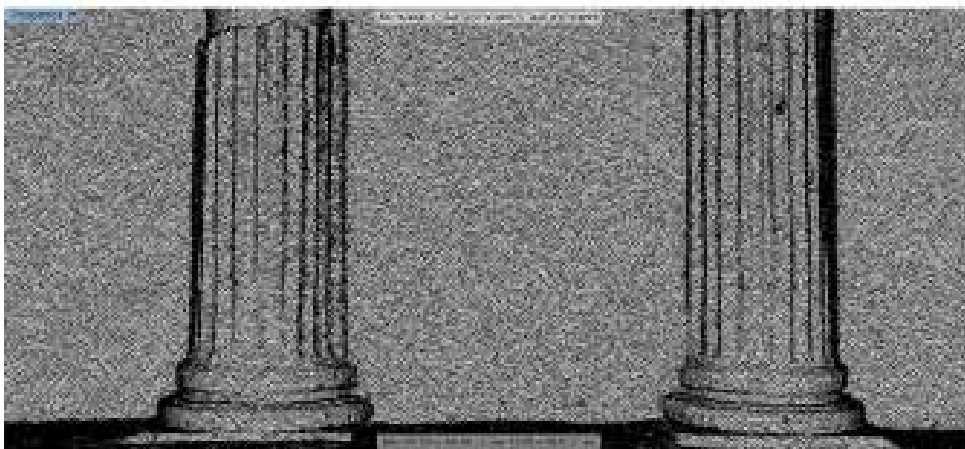
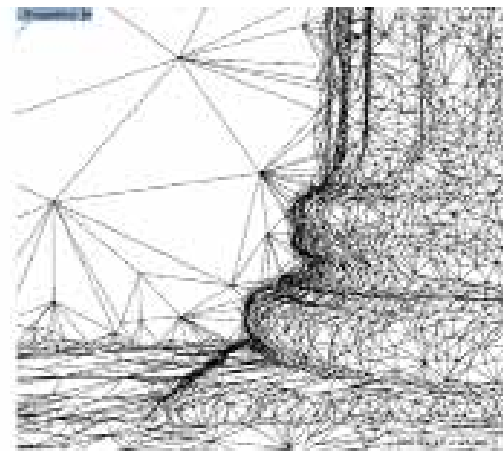
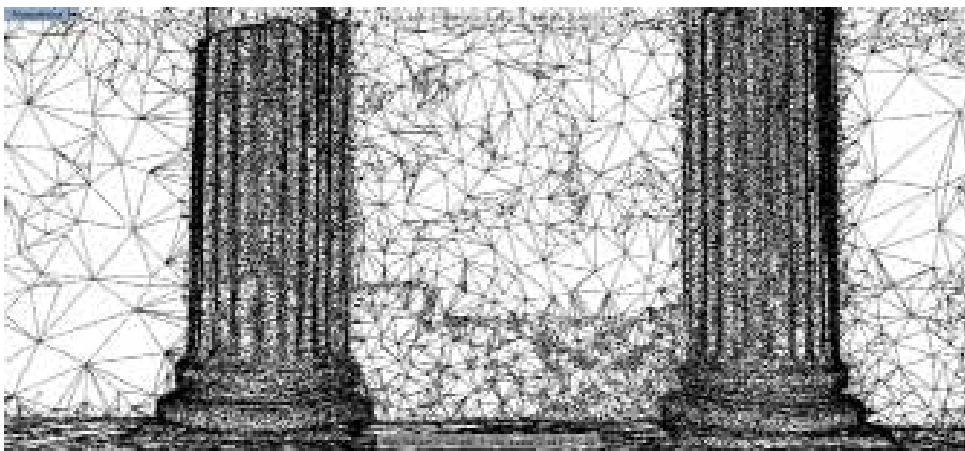
Lo scopo della tecnica di remeshing è quello di incrementare la qualità della mesh nell'utilizzo di vari algoritmi di modellazione.

A partire da una mesh tridimensionale si determina quindi una nuova superficie poligonale che deve essere in grado di soddisfare requisiti di qualità offrendo una buona approssimazione della mesh iniziale. In particolare la qualità della mesh è data dalle proprietà non tipologiche

logiche della superficie, come la regolarità, la dimensione, l'allineamento, la densità, e la forma degli elementi costitutivi della maglia poligonale.

Nel caso specifico, inoltre, le operazioni di remeshing sono finalizzate ad ottenere una mesh con distribuzione uniforme, il che significa che gli elementi delle mesh vengono distribuiti sul modello nella sua interezza.

L'idea di fondo è quella di giungere ad una mesh isotro-



pica, in cui infatti tutti i triangoli presentano una forma piuttosto regolare che si avvicina molto a quella equilatera. E' poi possibile uniformare ulteriormente la mesh operando sulla dimensione dei triangoli oppure sulla densità dei vertici.

Fra gli algoritmi di remeshing esistenti e più comunemente utilizzati, si possono in particolar modo distinguere gli algoritmi Greedy, Variational e Pliant.

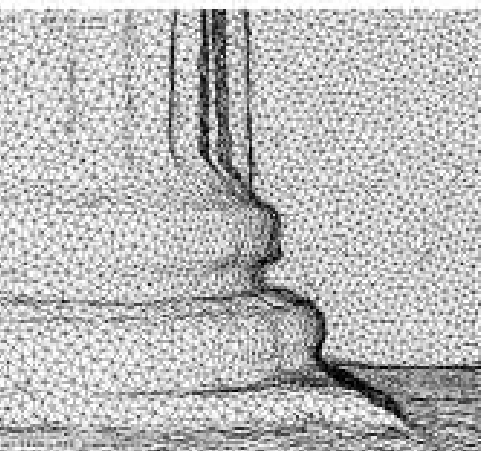
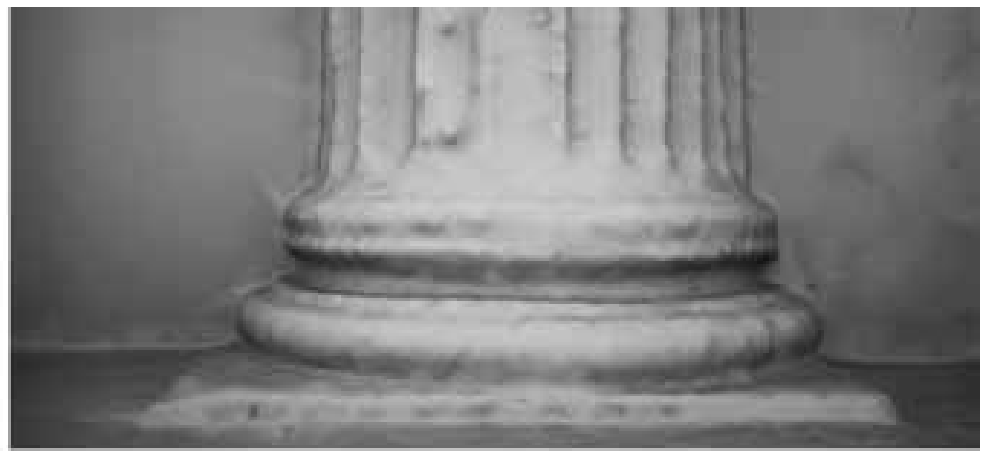
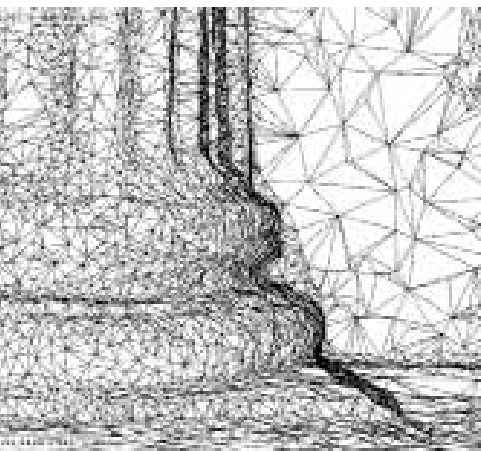
I primi in genere calcolano una modifica alla volta, fin quando non viene raggiunto lo scopo perseguito; gli algoritmi variational qualificano invece il problema iniziale come un problema di minimizzazione dell'energia, dove il livello energetico più basso equivale alla soluzione ideale al problema. Infine l'algoritmo pliant è costituito dal risultato dell'applicazione di affinamento

combinata con quella di decimazione della mesh, intervallate da operazioni di distensioni della mesh stessa.

Nelle immagini, esempio di tecnica di remeshing applicata alla restituzione di elementi architettonici del sito di Masada.

Le tre immagini nella prima riga sono mesh risultanti di una elaborazione di ritocco ed integrazione. Nella seconda fila, la medesima mesh dopo il trattamento di remeshing.

Si può apprezzare che la nuova mesh ha una distribuzione più omogenea dei poligoni che la compongono senza che subisca un aumento della grandezza del file di partenza, i poligoni distribuiti in maniera più omogenea, sulla superficie della nuova mesh, risultano spesso in numero minore rispetto ai precedenti. In questo caso i poligoni di partenza (150000) sono rimasti invariati nel numero.



5.2 La modellazione tridimensionale Nurbs

Le Nurbs (Non-Uniform Rational B-Splines) sono delle rappresentazioni matematiche della geometria 3D, le quali definiscono accuratamente qualunque forma: da una semplice linea, ad un cerchio, un arco o una curva, fino al più complesso solido o superficie a forma libera o organica 3D. Grazie alla loro accuratezza e flessibilità, i modelli nurbs possono essere usati nei più svariati processi, dalle illustrazioni ed animazioni sino alla fabbricazione.

Le geometrie nurbs hanno tre importanti caratteristiche che le rendono una scelta ideale per la modellazione assistita da computer.

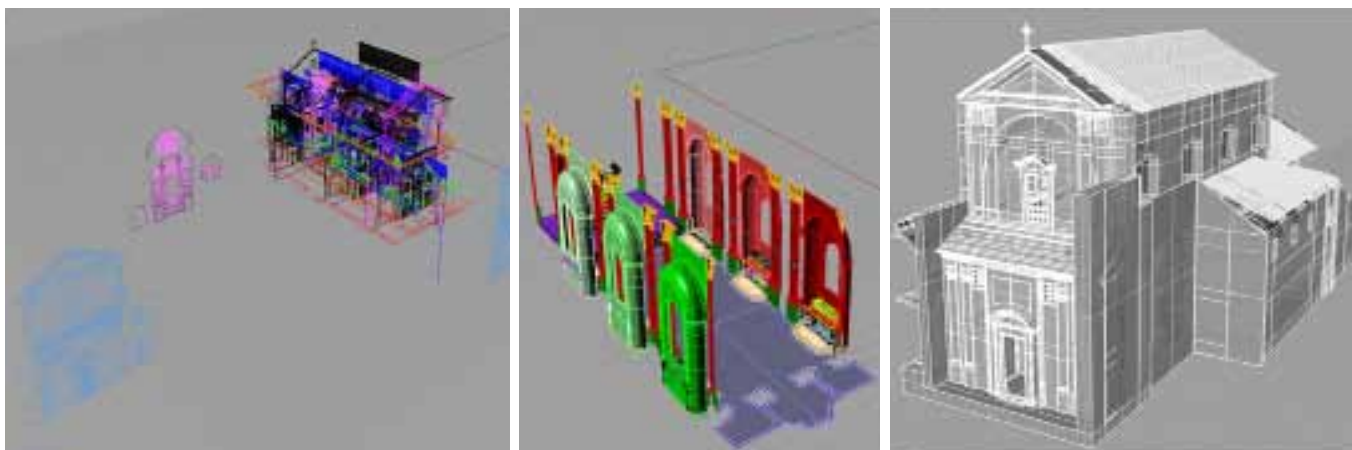
Per primo, le nurbs hanno una definizione precisa e ben nota. I principi matematici ed informatici delle geometrie nurbs vengono insegnati nelle maggiori università. Ciò significa che i produttori di software specialistici, i team ingegneristici, gli studi di design industriale e le case di animazione che hanno bisogno di realizzare

delle applicazioni personalizzate possono trovare facilmente dei programmatori preparati in grado di lavorare con le geometrie nurbs.

Le nurbs possono rappresentare accuratamente sia oggetti geometrici standard (come linee, cerchi, ellissi, sfere o toroidi), che geometrie free-form, quali carrozzerie per automobili o corpi umani.

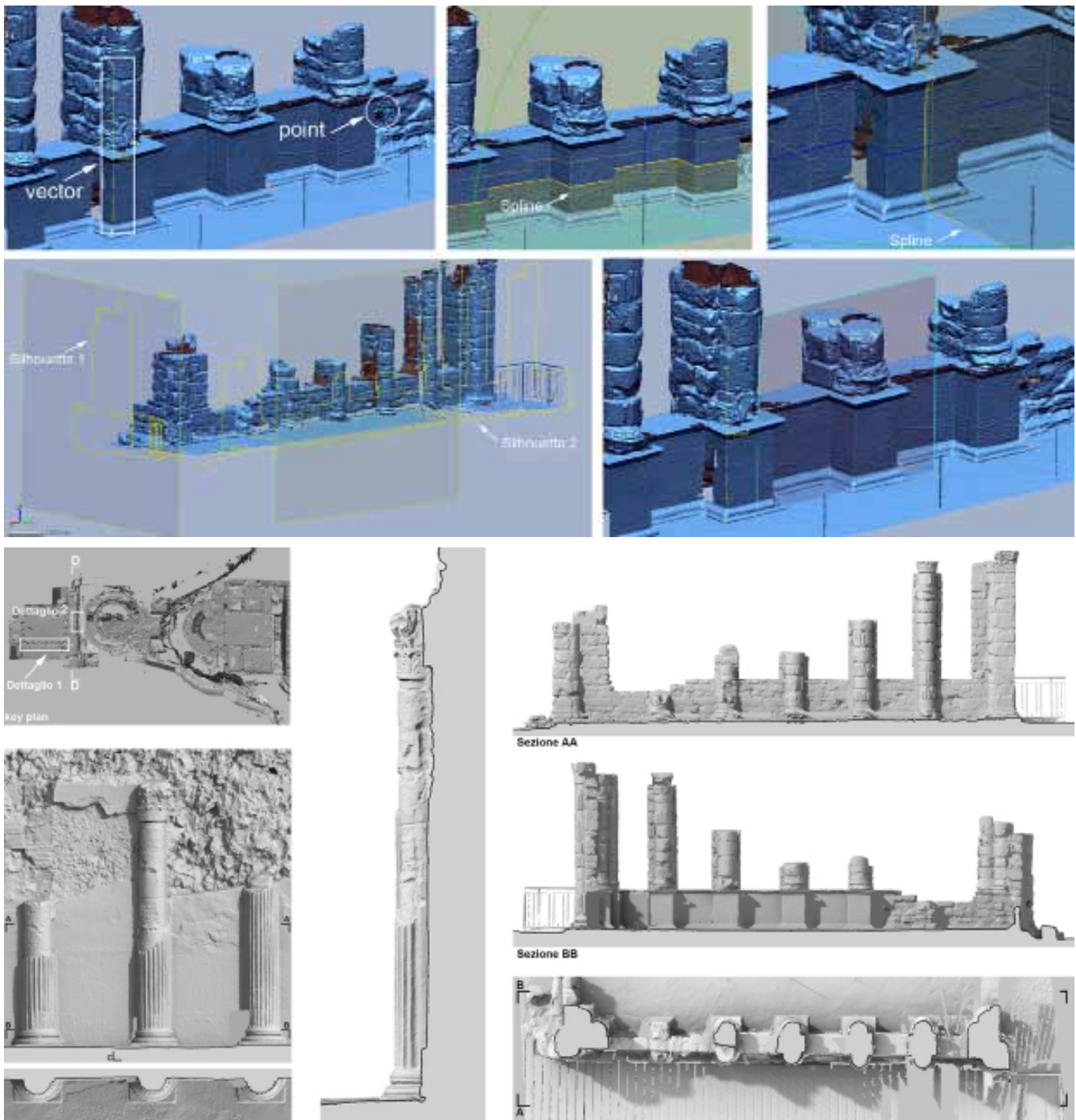
E in fine, la quantità di informazioni richiesta per la rappresentazione nurbs di un elemento geometrico è di gran lunga inferiore alla quantità di informazioni necessaria per rappresentare la stessa geometria tramite approssimazioni mesh.

Curve e superfici nurbs si comportano in modo analogo, per cui la terminologia tecnica ad esse relative è pressoché la stessa. Una curva nurb è definita da quattro caratteristiche: il grado, i punti di controllo, i nodi e la regola di stima.



Modellazione di tipo nurbs della chiesa dei SS. Martiri Donato e Ilarino a Camaldoli. Da sinistra: visualizzazioni delle sezioni, restituite in ambiente Cad, dalla lucidatura della nuvola di punti; fase della modellazione con divisione in livelli dei vari elementi architettonici; visualizzazione ombreggiata semitrasparente del modello ultimato. Nell'immagine a fianco, spaccato prospettico.





I software di mesh editing, come Geomagic, forniscono utili strumenti per generare di piani di sezioni dai quali è possibile estrapolare elaborati di tipo bidimensionale: partendo dalla media di una discreta serie di punti, oppure selezionando una serie di poligoni o creando un piano da assi verticali e un punto.

5.2.1 Il Grado

Il grado è un numero intero positivo. Di solito ha valore 1, 2, 3 o 5, anche se può essere qualunque numero intero. Di solito, le linee e le polilinee nurbs hanno grado 1, i cerchi nurbs hanno grado 2 e la maggior parte delle curve free-form ha grado 3 o 5. Invece di indicare il grado della curva con il rispettivo numero, si possono usare i termini lineare, quadratico, cubico e quintico. Lineare significa di grado 1, quadratico significa di grado 2, cubico significa di grado 3 e quintico significa di grado 5. A volte, si può far riferimento all'ordine di una curva nurbs. L'ordine di una curva nurbs è un numero intero positivo pari a (grado+1). Di conseguenza, il grado corrisponde a (ordine-1). È possibile aumentare il grado di una curva nurbs senza cambiarne la forma. In genere, non è invece possibile ridurre il grado di una curva nurbs senza modificarne la forma.



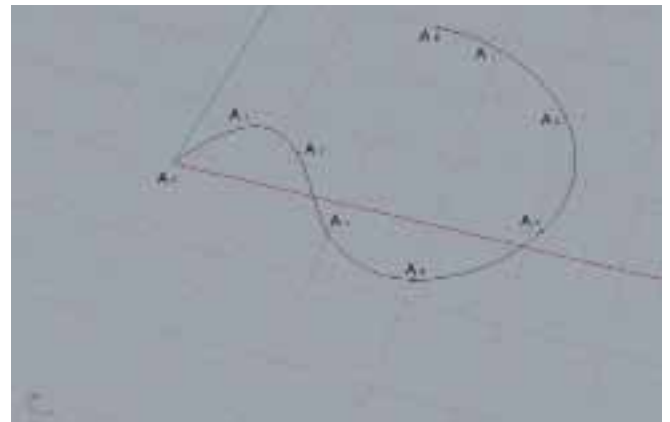
5.2.2 Punti di controllo

I punti di controllo sono una fila di punti in numero almeno pari a (grado+1). Uno dei modi più semplici per modificare la forma di una curva nurbs consiste nel variare la posizione dei suoi punti di controllo. Ad ogni punto di controllo è associato un peso (ovvero, la sua capacità di attrarre la curva).

Tranne che per alcune eccezioni, i pesi sono numeri positivi. Quando i punti di controllo di una curva hanno tutti lo stesso peso (di solito 1), la curva viene denominata “non razionale”. In caso contrario, è detta razionale.

La lettera R dell'acronimo nurbs sta per “razionale” ed indica che una curva nurbs può essere razionale. Nella pratica, la maggior parte delle curve nurbs sono non razionali.

Alcune curve nurbs (cerchi ed ellissi ne sono un chiaro esempio) sono sempre razionali.



Nelle immagini sopra, da sinistra: una nurbs, ovvero la rappresentazione matematica che i software usano per creare gli oggetti geometrici, per definirne accuratamente la forma. Le curve NURBS sono una generalizzazione delle curve B-Spline e delle curve di Bézier; a destra i nodi del quale si compone.

5.2.3 Nodi

I nodi sono una fila di numeri pari a $(\text{grado} + N - 1)$, ove N rappresenta il numero di punti di controllo. Questa sequenza di numeri che precisa la definizione parametrica della curva è detta anche “vettore dei nodi”. In questo contesto, il termine vettore non sta a significare una direzione 3D. La sequenza di numeri dei nodi deve soddisfare diverse condizioni tecniche.

Di norma, per assicurarsi che queste condizioni tecniche siano soddisfatte, si richiede che i numeri siano gli stessi o maggiori man mano che si procede verso la fine della lista e si limita il numero di valori ripetuti ad un numero non maggiore del grado.

Per esempio, per una curva nurbs di grado 3 con 11 punti di controllo, la sequenza $0,0,0,1,2,2,2,3,7,7,9,9,9$ è una sequenza di nodi soddisfacente. La sequenza $0,0,0,1,2,2,2,2,7,7,9,9,9$ non è invece accettabile perché sono presenti quattro numeri “2” e “4” è maggiore del grado della curva in esame (3).

Il numero di volte in cui il valore di un nodo si ripete è detto “molteplicità del nodo”.

Nella sequenza di nodi soddisfacente riportata in prece-

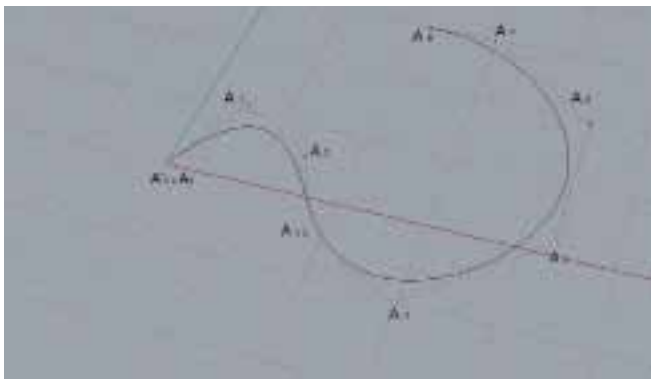
denza $(0,0,0,1,2,2,2,3,7,7,9,9,9)$, il valore del nodo 0 ha molteplicità 3, il valore del nodo 1 ha molteplicità 1, il valore del nodo 2 ha molteplicità 3, il valore del nodo 7 ha molteplicità 2 ed il valore del nodo 9 ha molteplicità 3. Si dice che un nodo ha molteplicità piena se il suo valore si ripete tante volte quante il grado.

Nell'esempio, i valori dei nodi 0, 2 e 9 hanno molteplicità piena. Il valore di un nodo che figura una volta sola è detto nodo semplice. Nell'esempio, i valori dei nodi 1 e 3 sono nodi semplici.

Se una sequenza di nodi inizia con un nodo a molteplicità piena, segue con dei nodi semplici, termina con un nodo a molteplicità piena e tutti i valori sono ugualmente spazati, i suoi nodi sono detti uniformi.

Per esempio, se una curva nurbs di grado 3 con 7 punti di controllo ha una sequenza $0,0,0,1,2,3,4,4,4$, i suoi nodi saranno uniformi.

I nodi della sequenza $0,0,0,1,2,5,6,6,6$, per esempio, non saranno invece uniformi. I nodi senza uniformità si dicono appunto non uniformi. Le lettere N ed U dell'acronimo nurbs stanno per “non uniformi” ed indicano che



Punti di controllo.



Inserimento di un nuovo nodo.

i nodi di una curva nurbs possono essere non uniformi. Valori di nodo ripetuti all'interno di una sequenza di nodi rendono la curva nurbs meno smussata. Un nodo a molteplicità piena nel mezzo di una sequenza di nodi indica che c'è una zona nella curva nurbs che può essere associata ad una discontinuità.

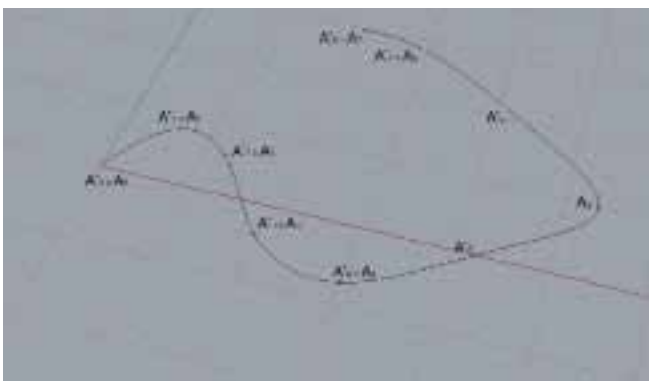
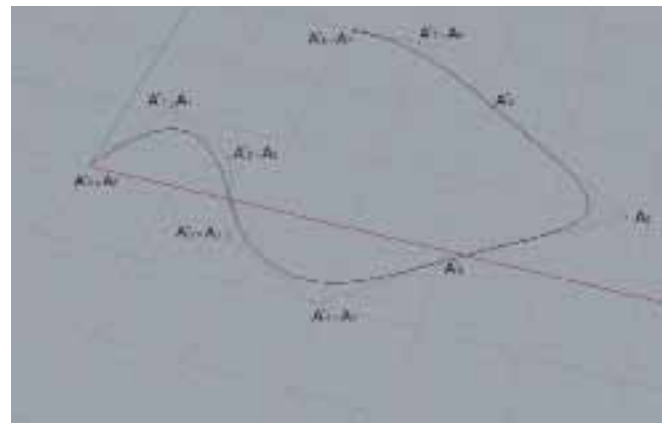
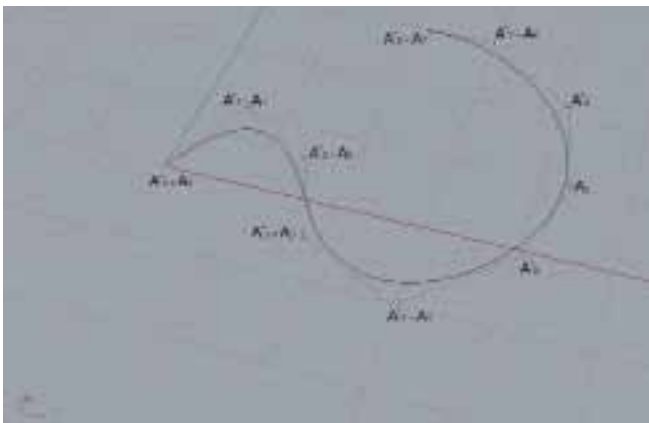
Per questa ragione, alcuni designer preferiscono aggiungere e rimuovere i nodi e quindi regolare i punti di controllo per ottenere delle curve dalle forme più smussate o più spigolose.

Poiché il numero dei nodi è pari a $(N+grado-1)$, in cui N è il numero di punti di controllo, l'aggiunta di nodi comporta l'aggiunta di punti di controllo, così come la loro rimozione implica la rimozione di punti di controllo.

È possibile inserire dei nodi in una curva nurbs senza cambiarne la forma. La rimozione di nodi, in genere, cambia invece la forma di una curva.

Il grado, i punti di controllo ed i nodi sono regolati dalla regola di stima di una curva che è una formula matematica che assegna un numero ad un punto. Essa calcola le cosiddette funzioni base B-spline. Le lettere BS nell'acronimo nurbs stanno per "basis spline." Il numero con il quale si avvia la regola di stima è detto "parametro".

Possiamo pensare alla regola di stima come ad una "scatola nera" che riceve un parametro e genera la posizione di un punto. Il grado, i nodi ed i punti di controllo determinano il modo in cui lavora questa "scatola nera".

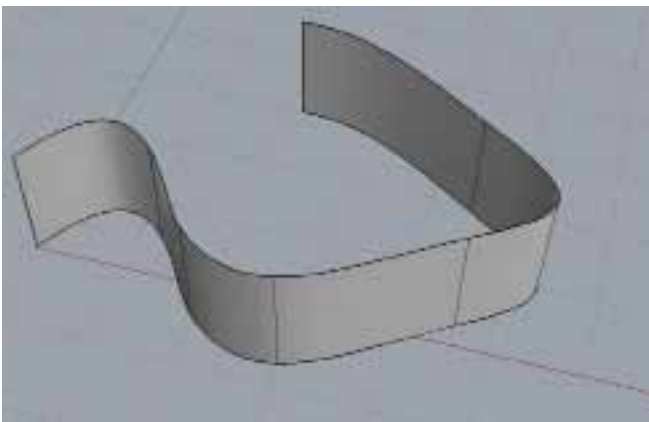


Nelle immagini sopra, da sinistra: una nurbs, punti di controllo; modifica della posizione nello spazio, del nuovo punto di controllo; nodi nella nuova posizione, nuova curva nurbs.

5.2.4 Nodi e punti di controllo

Un comune malinteso è dato dal fatto di accoppiare ciascun nodo con un punto di controllo. Ciò è vero solo per le nurbs di grado 1 (polilinee). Per nurbs di grado maggiore, sono presenti gruppi di (2 X grado) nodi che corrispondono a gruppi di (grado+1) punti di controllo. Per esempio, si supponga di avere una NURBS di grado 3 con 7 punti di controllo e nodi 0,0,0,1,2,5,8,8,8. I primi quattro punti di controllo sono raggruppati con i primi sei nodi. I punti di controllo dal secondo al quinto sono raggruppati con i nodi 0,0,1,2,5,8. I punti di controllo dal terzo al sesto sono raggruppati con i nodi 0,1,2,5,8,8. Gli ultimi quattro punti di controllo sono raggruppati con gli ultimi sei nodi.

Alcuni modellatori usano obsoleti algoritmi per la stima di una nurbs e richiedono due ulteriori valori di nodo per un totale di (grado+N+1) nodi. Durante l'esportazione o importazione di una geometria nurbs, Rhino inserisce o rimuove automaticamente questi due nodi superflui a seconda del caso.



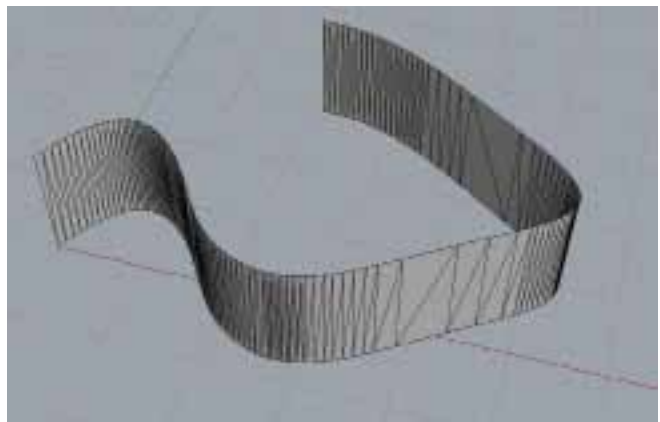
L'estrusione della nurbs genera una superficie nurbs. Le superfici nurbs tridimensionali possono avere forme complesse e organiche. I punti di controllo influenzano le direzioni che la superficie prende.

5.2.5 Ottimizzazione del modello 3D

Una delle caratteristiche più potenti di Rhinoceros, *software* utilizzato per la modellazione nurbs presente nei casi studio, è la sua capacità di lavorare con curve e superfici di forma arbitraria.

Il modello nurbs, come già detto, è flessibile e potente in grado di definire con precisione qualsiasi forma, 2D o 3D, caratterizzata da flessibilità ed accuratezza, su cui è possibile intervenire, in qualsiasi momento, variando il livello di dettaglio. Questa scelta è il risultato di una continua e costante ricerca, volta ad ottenere il miglior rapporto resa/tempo. Il guadagno, in tal caso, consiste principalmente nella facilità di manipolazione degli oggetti Nurbs, nella minore occupazione di memoria e nella conseguente scalabilità.

Gli oggetti ottenuti dal merging delle singole superfici acquisite a scanner presentano, ad esempio, una risoluzione variabile tra i quarantamila e gli ottomila punti; mentre a seguito delle operazioni di scrematura, operate nell'ambiente, passano ad un valore compreso tra i



Nell'immagine la generazione della mesh in perfetta aderenza alla superficie nurbs.

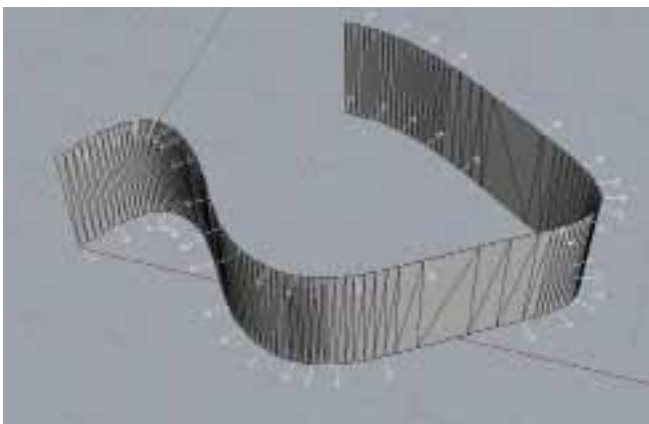
quindicimila e i tremila punti. Le stesse superfici, rimodellate per mezzo di curve Nurbs non superano invece i trecento punti di controllo (Control Vertices). Si capisce quindi come quest'ultime siano più facilmente gestibili, oltre che meno dispendiose in termini di occupazione della memoria. In pratica, la mesh poligonale, risultato della scansione, dopo una prima fase di merging e di scrematura dei punti viene esportata, nel formato .obj ed importata in Rhinoceros e qui utilizzata come oggetto di riferimento per la creazione di una forma Nurbs ex-novo, ricavando delle curve (che rappresentano le sezioni dell'oggetto), attraverso piani sezionanti.

In seguito il modello verrà nuovamente trasformato in una mesh più leggera e riesportato in .obj, per la mappatura dei poligoni con le texture corrispondenti.

Prima dell'esportazione si procederà all'analisi del verso delle normali, dal quale dipende la successiva, corretta mappatura.

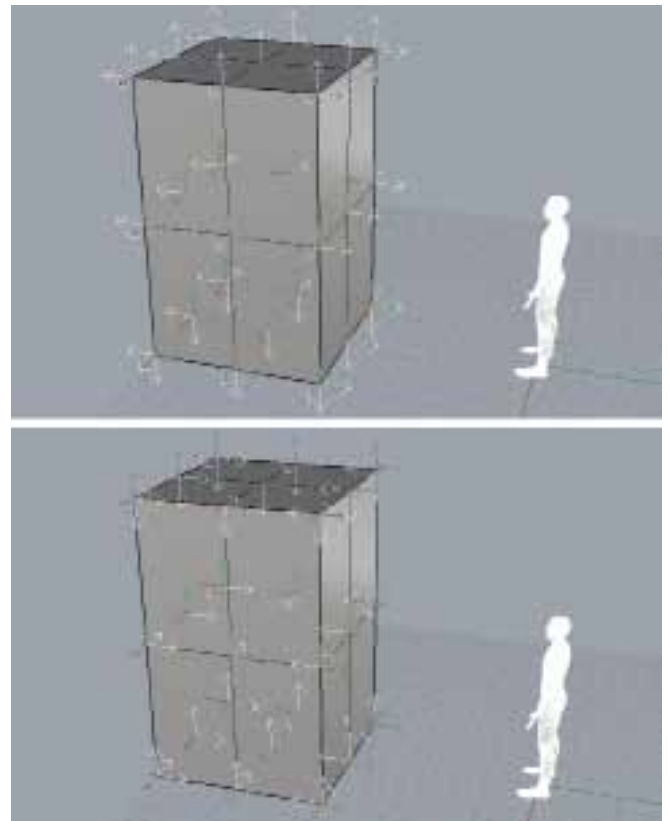
In matematica, una normale a una superficie piana è un vettore tridimensionale perpendicolare a quella superficie. Una normale ad una superficie non piana nel punto p su quella superficie è un vettore perpendicolare al piano tangente a quella superficie in p .

La normale ad una superficie non ha un unico verso; il vettore che punta nel verso opposto della normale alla superficie è anch'esso una normale a quella superficie.



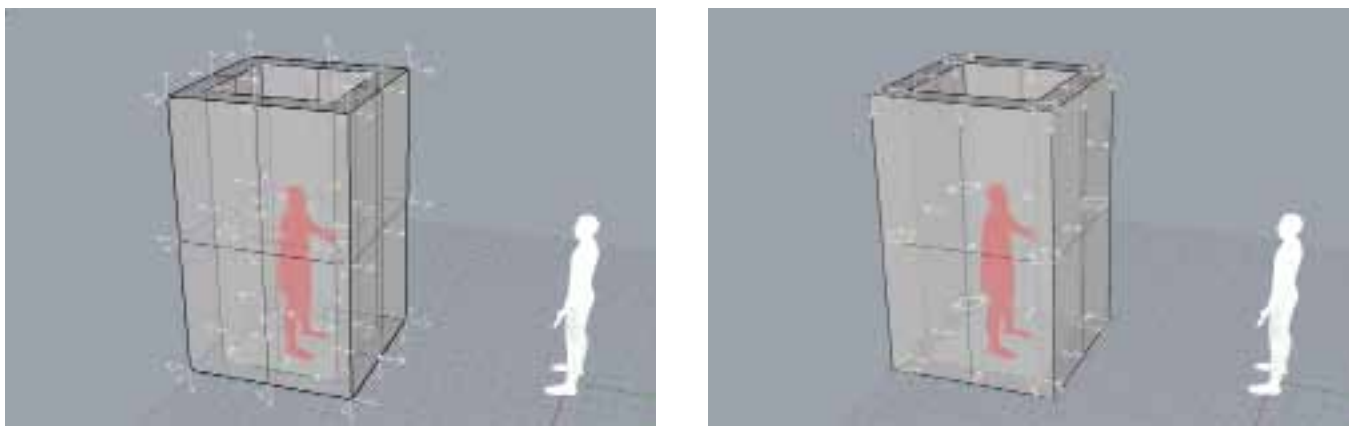
Per una superficie orientata, la normale alla superficie è solitamente determinata dalla regola della mano destra. In pratica una superficie sarà orientata nel verso positivo se la normale è rivolta verso il punto di vista dell'osservatore. Le normali sono comunemente usate nella computer grafica tridimensionale per i calcoli d'illuminazione, regolate dalla Legge di Lambert.

Tale legge riguarda l'illuminamento di una superficie posta a una certa distanza da una sorgente luminosa. Essa afferma che l'illuminamento prodotto da una sorgente su una superficie è direttamente proporzionale all'intensità luminosa della sorgente e al coseno dell'angolo che la normale alla superficie forma con la direzione dei raggi luminosi ed è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente.

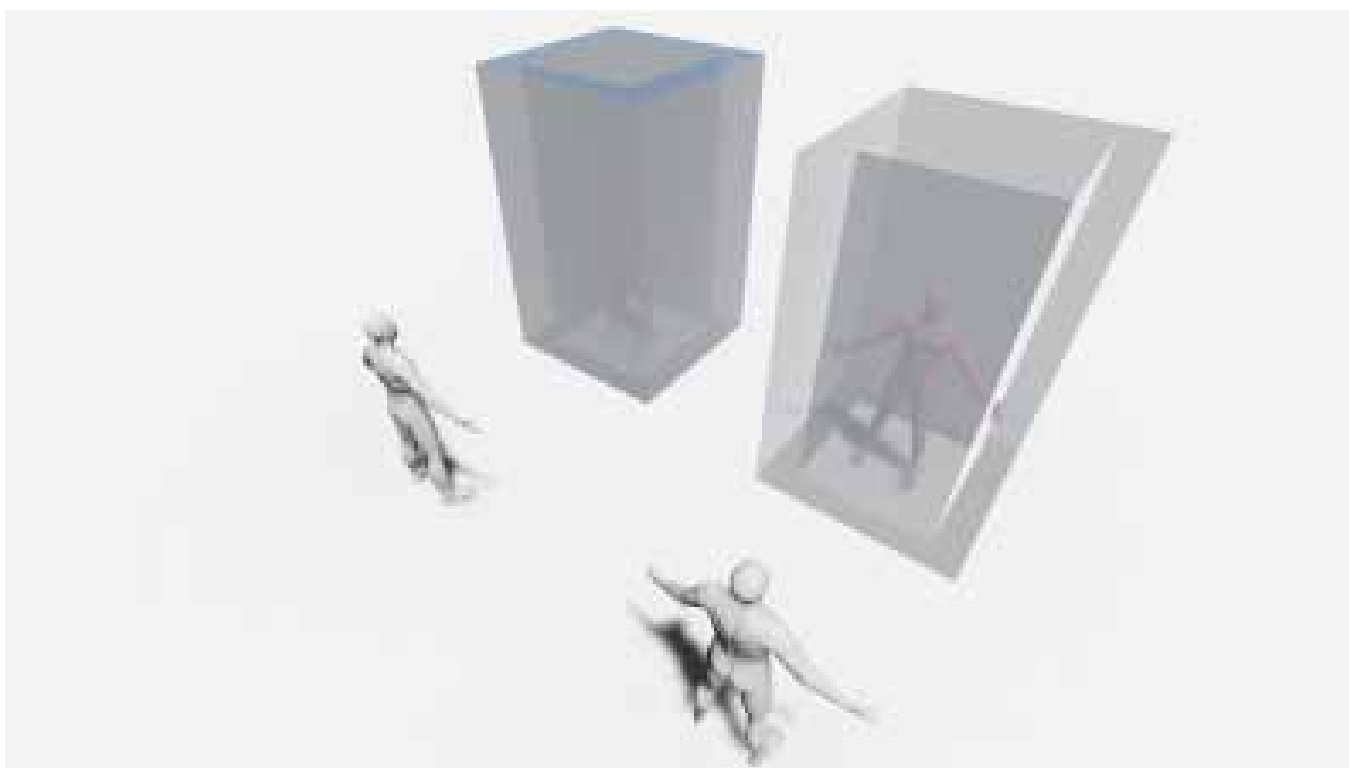


Nelle tre immagini le frecce bianche indicano il verso della normale.

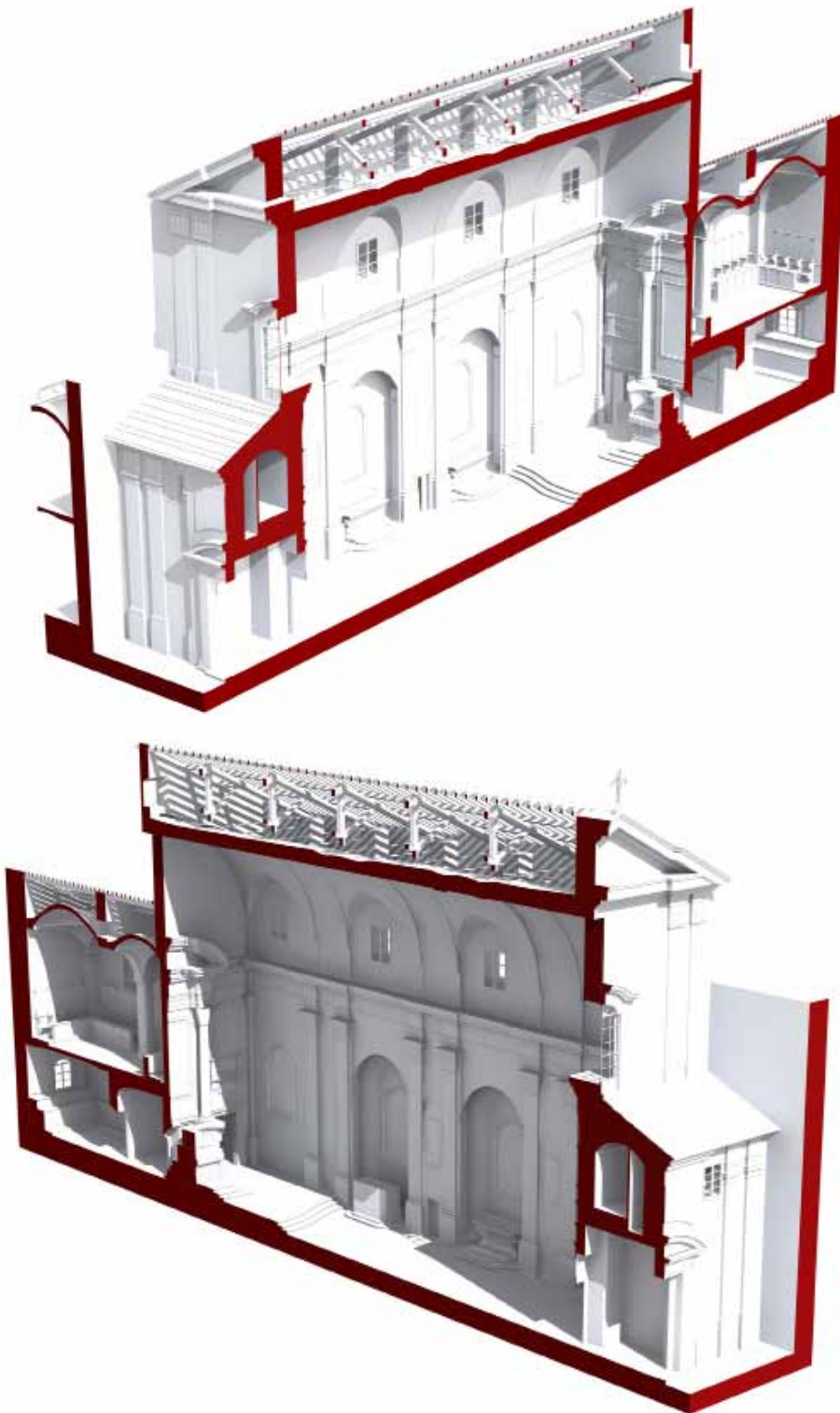
A destra, schematizzazione del verso delle normali, rispetto all'osservatore: in alto le normali sono positive, quindi orientate correttamente, invece nell'immagine in basso le normali sono negative, quindi, la texture non verrà applicata correttamente.



Schematizzazione del verso delle normali: nelle due immagini, le frecce bianche indicano il verso delle normali, rispetto ai due osservatori, rispettivamente fuori dall'oggetto e dentro l'oggetto. A sinistra le normali sono positive, ovvero orientate correttamente, invece nell'immagine a destra le normali sono negative. Il parallelepipedo cavo, è la semplificazione di un'architettura, formata da ambienti interni ed esterni. Le normali delle superfici che descrivono tali situazioni, andranno verificate seguendo la regola descritta in precedenza.



Nell'immagine sopra, viene evidenziata la problematica della mappatura del parallelepipedo. Nuovamente, a sinistra le normali risultano positive, ovvero orientate correttamente, invece a destra, sono orientate nel verso sbagliato rispetto all'osservatore. In ambedue i parallelepipedo, il materiale applicato è di tipo semitrasparente e questo ci permette di vedere al suo interno, il secondo osservatore. A sinistra si osserva che la lettura della morfologia del solido è corretta, invece a destra la visualizzazione del solido non è corretta perchè il materiale non è stato applicato correttamente, ovvero, le superfici con normali orientate nel verso sbagliato, risultano invisibili alla visualizzazione.



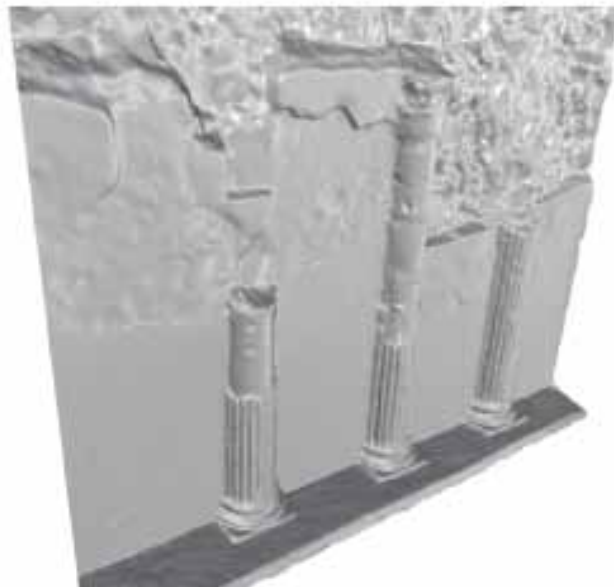
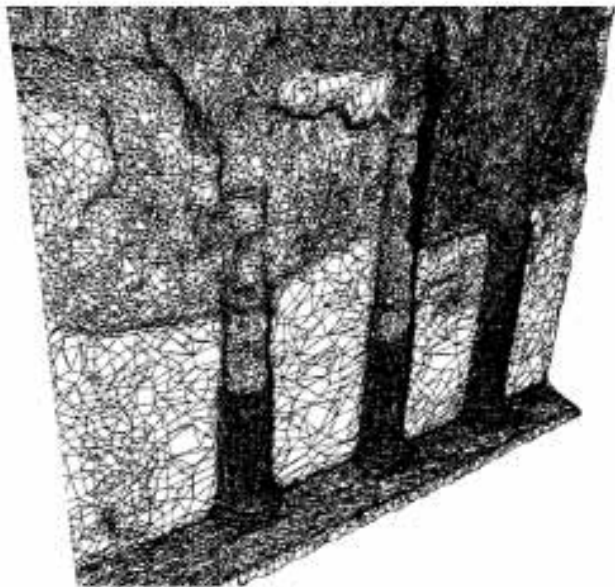
Spaccati prospettici del modello tridimensionale neutro, della chiesa dei SS. Martiri Donato e Ilarino, a Camaldoli.

5.3 Texture mapping e visualizzazione

Dopo la generazione della superficie, il modello può essere visualizzato in modalità wireframe, shaded o textured model. Uno degli strumenti più adeguati per la documentazione di oggetti tridimensionali è rappresentato dal modello geometrico texturizzato, poichè è in grado di fornire una visualizzazione fotorealistica oltre che una sua rappresentazione geometrica. È inoltre possibile utilizzare immagini a colori per ottenere tale visualizzazione fotorealistica di un modello 3D; in particolare, nelle applicazioni terrestri, se sono noti i parametri sia interni che esterni di orientamento delle immagini, attraverso una procedura automatica viene colorata ogni faccia della mesh poligonale col colore corrispondente

presente nella foto quindi i valori di colore RGB all'interno del triangolo proiettato sono attaccati alla faccia dello stesso. Nel caso di texture multi-immagine si fa generalmente una media dei valori RGB trovati.

Le problematiche in questo processo possono essere diverse e dovute a: distorsioni radiometriche nelle immagini, causate da acquisizioni con differenti camere da differenti posizioni e con differenti condizioni di luce; distorsioni geometriche dovute a scorrette procedure di orientamento; oclusioni dovute ad oggetti fermi o in movimento, alberi, auto, ecc. davanti all'area in esame, da rimuovere in fase di pre-processamento; le immagini digitali possono presentare spesso, per le foto de-



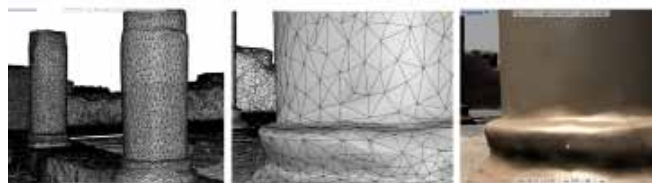
Nelle tre immagini, rendering di una porzione di modello resti archeologici del sito di Masada. Nello specifico, il modello, realizzato attraverso la fotomodellazione, è visualizzato in wireframe, ombreggiato e texturizzato.

gli ambienti interni, problemi di basso range dinamico, cioè, per visualizzare le zone scure si deve sovraesporre e quindi si saturano le zone illuminate e viceversa per vedere le zone illuminate si deve sottoesporre, rendendo nere le zone non illuminate; la soluzione sono le immagini cosiddette high dynamic range, che combinano in una unica immagine le informazioni di radianza di una sequenza di immagini standard.

Quando invece s'intende mappare sul modello 3D delle immagini con parametri di orientamento incogniti, è necessario fare ricorso al modulo UV mapping, al fine di individuare la relazione fra immagini e oggetto 3D.

Infatti un sistema molto particolare per l'applicazione di textures agli oggetti è rappresentato dall'utilizzo del modulo UV Mapping. Tramite questo sistema non si creano materiali predefiniti che vengono applicati successivamente a parti o ad interi oggetti ma si crea una vera e propria "pelle" che andrà a rivestire il modello.

L'UV Mapping consiste nell'assegnare coordinate UV (coordinate della texture) ai poligoni. Questo permette di nascondere il basso numero di poligoni "sotto" le textures.



Nelle immagini, rendering di una porzione di modello resti archeologici del sito di Masada. Nello specifico, il modello è stato realizzato attraverso la modellazione della nuvola di punti, ricavata dal rilievo laser scanner. La texture applicata è stata ricavata attraverso la fotomodellazione.

In altre parole, i piccoli dettagli che non sono modellati nella mesh acquistano nuovamente forma con l'applicazione sulle textures.

Infine la resa finale può essere migliorata applicando effetti di bump mapping. Si tratta di un effetto che viene ottenuto tramite l'introduzione di piccole perturbazioni direzionali della normale alla superficie, al fine di aggiungere effetti di irregolarità ed ottenere così rese più realistiche.

Un'altra tecnica, denominata displacement mapping, viene invece implementata in fase di rendering e consiste nella traslazione della posizione dei punti lungo la normale alla superficie di una distanza definita dalla mappa di displacement, la quale è a sua volta funzione della texture.

Una variante rispetto a tale approccio è dato dal view-dependent displacement mapping, che risulta più efficace del precedente in termini di ombre auto portate e self occlusion.

Tutto ciò serve per aggiungere dettagli in fase di texturizzazione proprio grazie all'impiego di bump e displacement mapping. Questo metodo consente di limitare i calcoli computazionali richiesti da molti sistemi di rendering.

I programmi di renderizzazione tridimensionali hanno raggiunto livelli qualitativi che fanno avvicinare sempre di più il risultato alla realtà, per semplificare ancora di più il processo di creazione di visualizzazioni fotorealistiche, la loro interfaccia è cambiata nel tempo, diventando sempre più semplice ed intuitiva.

L'importanza inoltre della gestione delle luci e delle ombre, per una corretta descrizione morfologica e cromatica del modello tridimensionale, è evidenziata nella semplicità con il quale in alcuni programmi si arriva alla corretta e veloce impostazione di tutti i parametri riguardanti la radiosity.





Rendering di una porzione del mosaico presente all'interno di un'ambiente del Palazzo di Erode a Masada.

Nella renderizzazione di un modello tridimensionale rappresentante un elemento archeologico o naturale è essenziale per capirne meglio la morfologia e poterne cogliere aspetti altrimenti poco visibili in assenza di ombre. La resa fotografica ottenuta grazie all'utilizzo di una luce puntiforme (sole), rispetto ad una luce ugualmente diffusa per tutto l'ambiente, può essere ancora di più enfatizzata in fase di postproduzione fotografica, esportando tali fotografie in programmi di fotoritocco è possibile aumentare notevolmente il contrasto e l'illuminazione dando ancora più profondità e importanza ai dettagli cromatici che descrivono l'andamento della mesh poligonale che costituisce il modello.

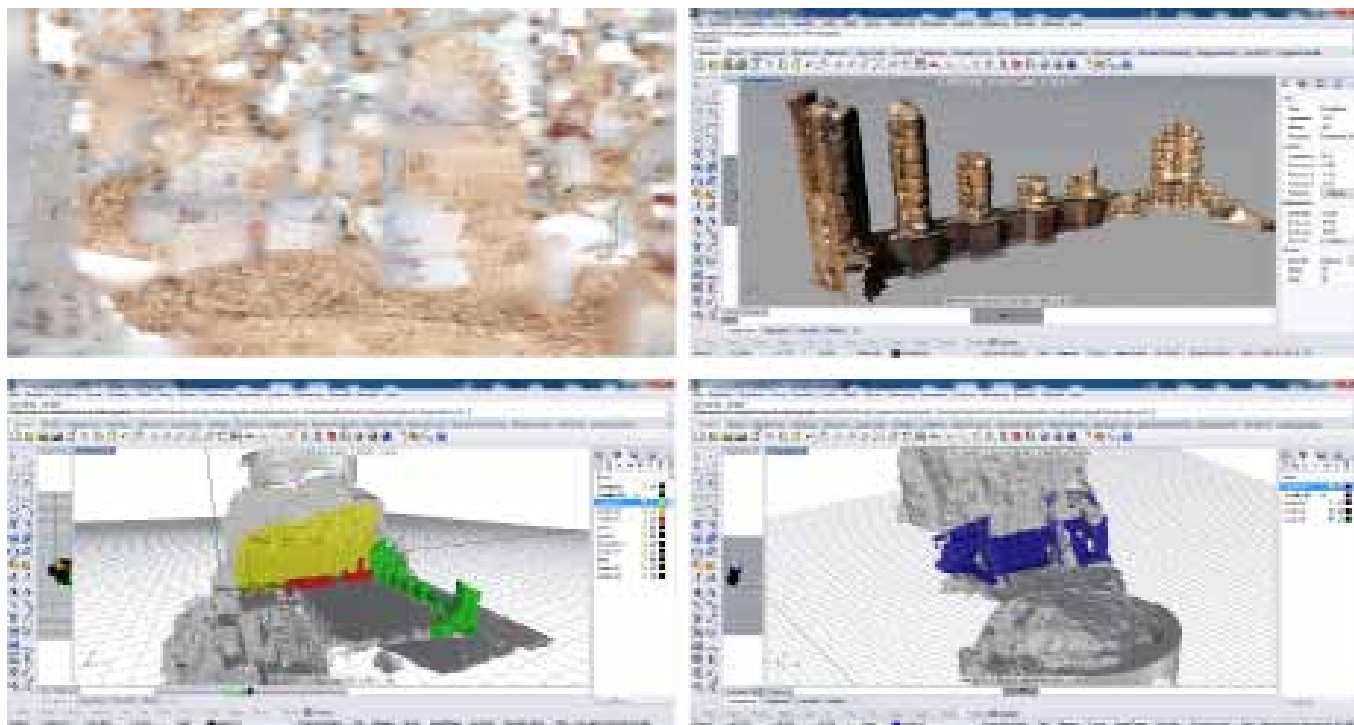
I modelli generati attraverso fotomodellazione, contengono per loro natura la descrizione cromatica dell'oggetto, non necessitando quindi di nessun aggiunta di eventuali texture in fase di renderizzazione.

Ad esempio per il modello dell'intero sito archeologico di Masada, realizzato per scopi di visualizzazione d'insieme, con un grado di affidabilità morfologica media, è risultato conveniente e più pratico unire la tecnica di modellazione poligonale e nurbs.

Prendendo come base la mesh nata dalla nuvola dei punti e unendola alle varie mesh relative alle parti più interessanti dal punto di vista archeologico, arriviamo ad ottenere un modello di pari peso ma con una definizione a livello visivo e foto-cromatico maggiore e più definita.

Le texture utilizzate sono di due tipi diversi: texture estrapolate dal modello fotogrammetrico ed applicato alla mesh generata dalla nuvola dei punti del laser scanner, che risulta più dettagliata e texture ricavate da fotogrammetria bidimensionale.

Quindi, le parti del modello generato da fotomodellazione sono munite di texture fin dall'esportazione del



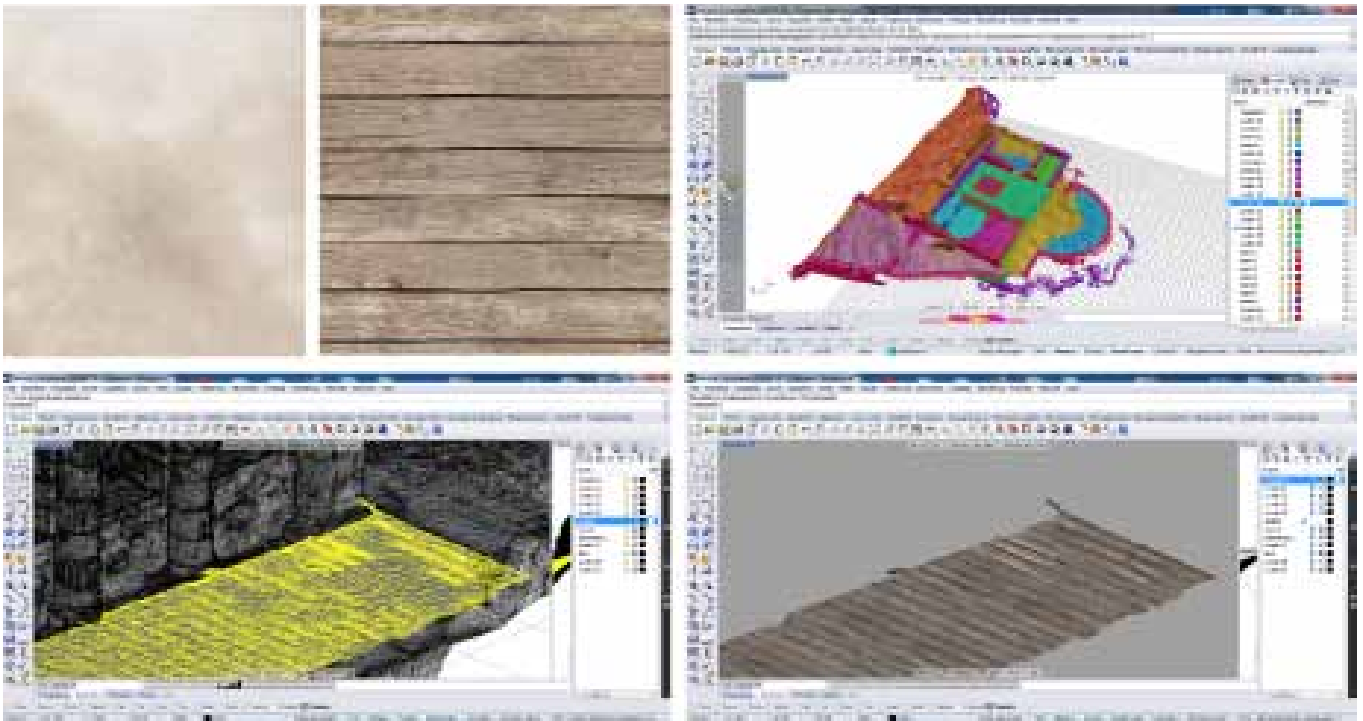
Nelle immagini, texture esportata da PhotoScan; modello rimappato in Rhinoceros; divisione del modello in layer per una gestione più fluida del lavoro di texturizzazione.

file da Photoscan. Il modello, generato dalla creazione di una mesh sulla nuvola acquisita con il laser scanner, deve invece essere mappato grazie all'utilizzo di texture ricavate dai fotopiani e dalle foto acquisite nel rilevamento riguardanti le parti interessate.

Il modello per comodità è stato diviso in layer in base al tipo di materiale o al tipo di texture che è stata applicata. Per la creazione di tali texture è stata effettuata un'attenta analisi dell'immagine originale per evitare problematiche di presenza di ombre e operando su di esse per eliminare preliminarmente ogni tipo di imperfezione e regolarne l'esposizione grazie a programmi di fotoritocco.

Note

1. De Luca, 2011;
2. Verdiani, 2012;
3. Picchio, 2014;
4. Bertocci, Bua, Parrinello, Picchio, 2014.



Nelle immagini texture ricavate da fotogrammetria bidimensionale; divisione in layer del modello e mappatura di una porzione di mesh.





Rendering del modello bianco e texturizzato di Piazza Grande a Montepulciano.



Rendering fotorealistico dei resti archeologici siti nella terrazza più bassa del Palazzo di Erode, a Masada.

CAPITOLO 6

***Output*: sintesi sui vantaggi e svantaggi della modellazione tridimensionale**

Le informazioni ottenute tramite i diversi metodi di acquisizione elaborate fino all'ottenimento di prodotti, come abbiamo visto, di tipo bidimensionale e soprattutto di tipo tridimensionale.

Entrambe nasceranno da una post-produzione che ha come base la fotogrammetria e l'acquisizione di dati per mezzo del laser scanner. I modelli 3D digitali si ottengono infatti grazie all'utilizzo di sensori di misura attivi, come appunto i laser scanner, o passivi, usualmente macchine fotografiche, anche se si possono integrare dati da fonti come sistemi CAD o GPS.

E' stato possibile immettere giudiziosamente sul file entrambe le ricche schiere di immagini e i modelli generati attraverso di esse. Un immediato e corretto collocamento dei modelli individuali sulla generale nuvola di punti, è un necessario prerequisito per lo sviluppo di osservazioni riguardanti l'affidabilità metrica e il livello di descrizione che queste metodologie possono offrire nel campo dell'archeologia.

Lo svilupparsi di ambienti virtuali e modelli tridimensionali interattivi in cui utenti specializzati possono interagire realizzando mappe cognitive sul contesto culturale e storico, è uno degli scopi perseguiti da queste procedure: i modelli altamente rappresentativi simulano le reali condizioni delle strutture archeologiche architettoniche che diventano vere simulazioni virtuali, per la pianificazione e la gestione di test e modelli di sviluppo. Il modello digitale può essere visto allora come un accurato insieme di misure nello spazio, dalla quale si possono estrarre ed estrapolare ogni tipo di informazione morfologica, oppure, dove dal modello creato tramite fotogrammetria è possibile estrarre la texture che ne descrive in maniera fotorealistica le caratteristiche morfologiche e cromatiche.

La texture potrà quindi essere successivamente utilizzata per integrare i modelli tridimensionali ottenuti grazie

alla rielaborazione della nuvola dei punti nata dal rilievo scanner. La scelta è strettamente legata all'oggetto analizzato e agli obiettivi prefissati per il rilievo, nonché alla scala di dettaglio a cui s'intende arrivare.

La domanda da porsi dunque non sarà solo se la fotomodellazione sia utile per il rilievo scientifico ma quando e se sia opportuno unire tale tecnica alle già conosciute tecniche di rilevazione non diretta. Il supporto nel completamento dell'informazione acquisita risulta in ogni caso necessario, almeno per quanto riguarda la corretta descrizione fotocromatica del rilevato.

Attualmente il vantaggio principale dei sistemi passivi è costituito dal costo e dalla trasportabilità dei sensori, di contro ne possono derivare modelli particolarmente incompleti nei casi di geometria irregolare, poiché sono necessarie superfici con caratteristiche ben marcate.

I sensori attivi invece presentano il vantaggio di poter acquisire in pochi secondi e in via automatica dense nuvole di punti 3D organizzate; tuttavia presentano anch'essi degli inconvenienti poiché generalmente sono progettate per uno specifico campo di utilizzo, di conseguenza un sensore progettato per un impiego a corto raggio non può essere adoperato per un uso a lunga distanza. Nel caso di strutture aperte, inoltre, il risultato di una procedura di allineamento dei dati acquisiti può far emergere errori cumulativi nel modello finale.

Pertanto la soluzione ideale è senz'altro quella che prevede la combinazione fra le due tecniche, in modo tale che i metodi di acquisizione mediante le immagini permettano di rilevare la geometria elementare degli oggetti, mentre attraverso scansione laser possono essere acquisiti i dettagli fini.

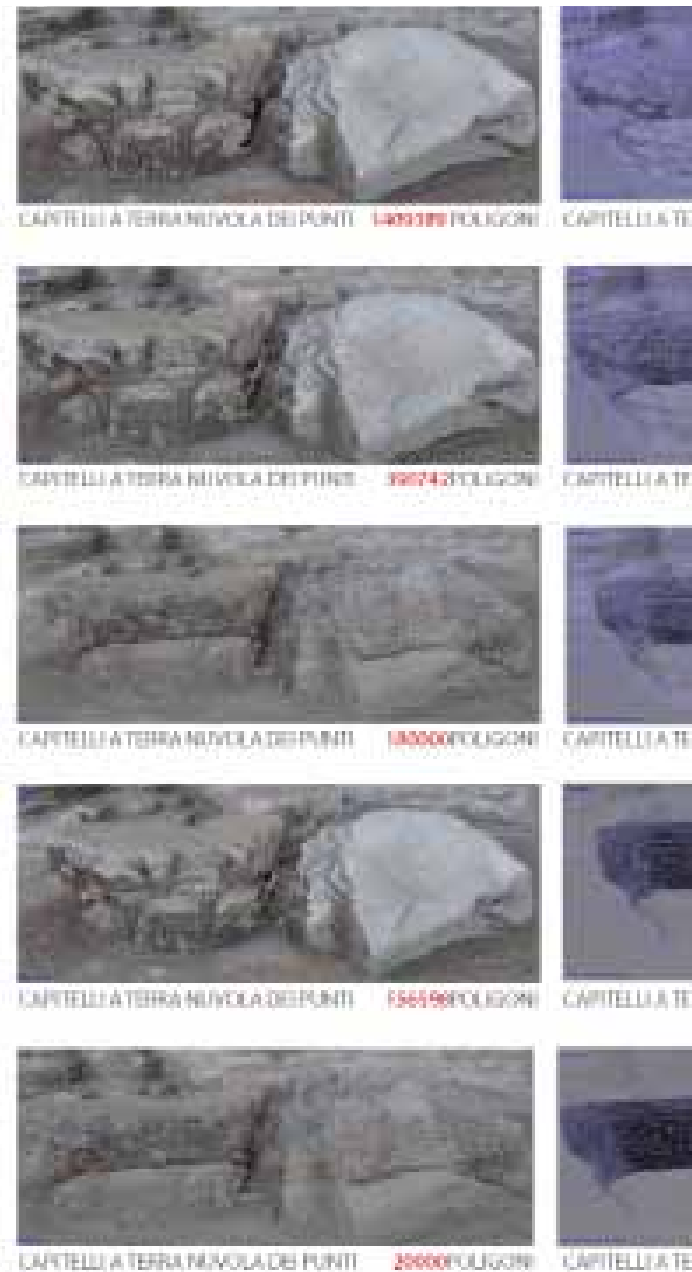
6.1 Integrazione dei modelli e verifica di correttezza del dato metrico

Come già detto, il programma di fotomodellazione PhotoScan è in grado di realizzare nuvole di punti, di diversa intensità e precisione, basate su di un calcolo matematico che tiene conto della posizione di ogni singolo pixel all'interno dell'immagine raster.

Dalla nuvola verranno create le superfici poligonali che descriveranno la morfologia dell'oggetto, è grazie all'applicazione della texture, anche abbassando il grado di definizione della mesh in seguito ad una decimazione del modello, il livello qualitativo non cambia ed è possibile continuare a visualizzare l'oggetto con un ottimo grado di dettaglio.

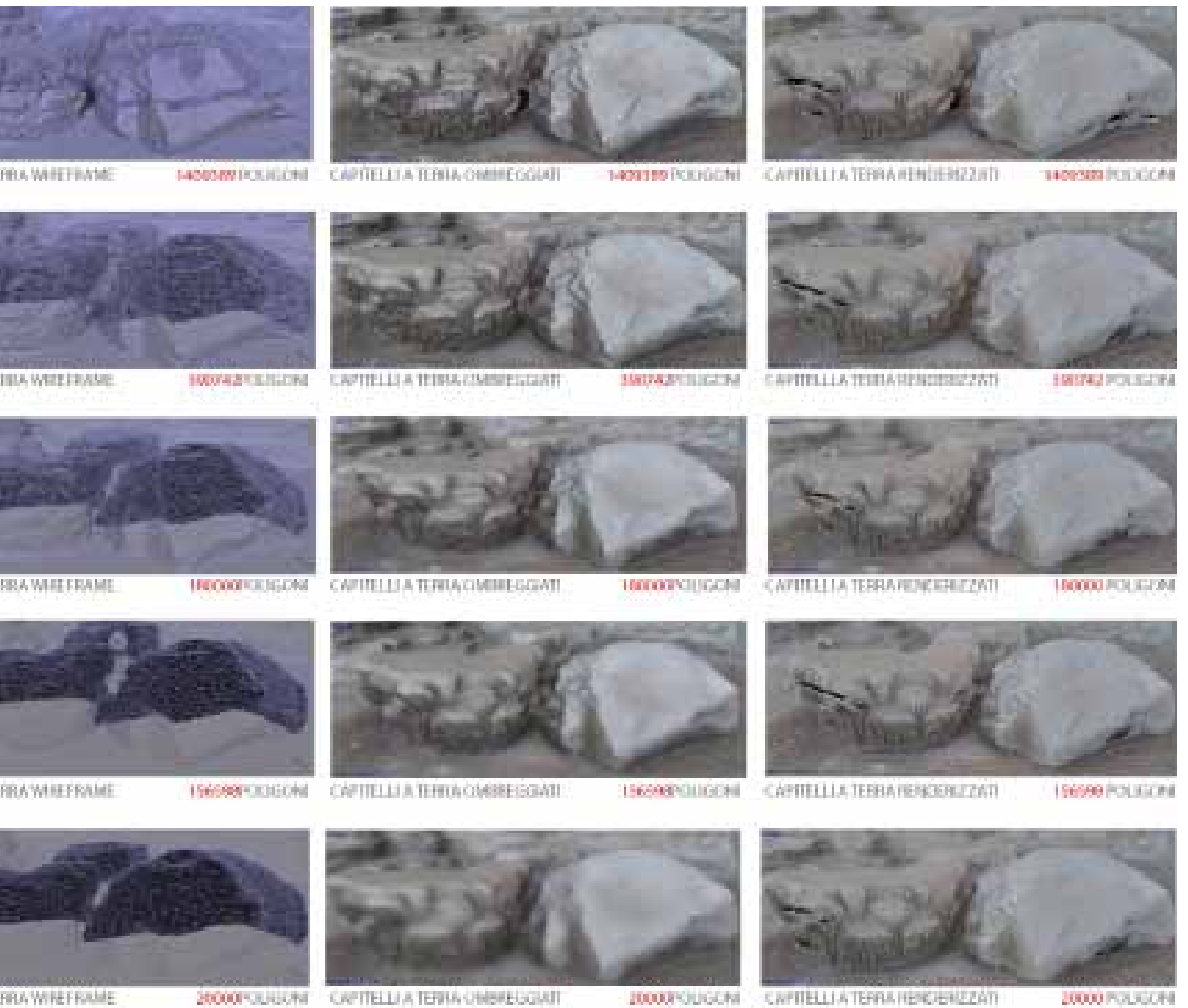
Il modello tridimensionale generato dalla trasformazione della nuvola dei punti in superficie poligonale ha una definizione ed è costituito da un numero di poligoni proporzionale al numero di punti della nuvola presa in considerazione. Può variare quindi in base alle necessità dell'utente e passare dall'essere high poly o low poly.

Dalla fotomodellazione avremo invece la creazione della mesh che dipenderà principalmente dal numero di pixel che compongono le foto riguardanti l'oggetto rilevato. per questo motivo nel caso di rilievo diretto la qualità fotografica di acquisizione è l'elemento fon-



PUNTI BASE CLOUD		DENSE CLOUD -BASE HIGH		NUMERO POLIGONI	DIMENSIONE MB
HIGH	38794	HIGH	7015471		
MEDIUM	263330	MEDIUM	1953840	390742	14,1
LOW	4986	LOW	491394	180000	9,2
				20000	0,659

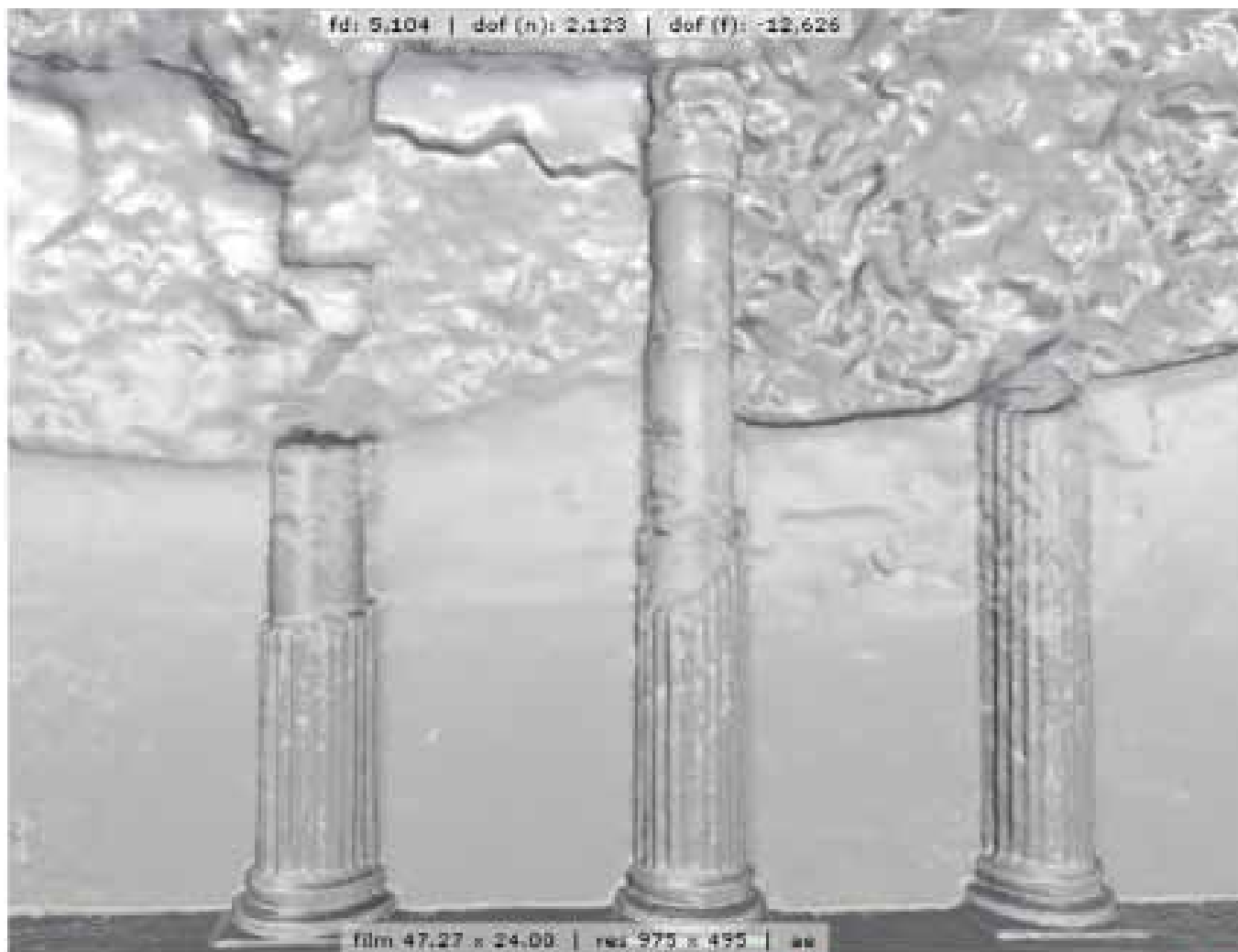
Nelle immagini a destra e nella tabella sopra, esempio di generazione della mesh a tre differenti gradi di decimazione dei punti e visualizzazione con e senza texture.



damentale per la buona riuscita del progetto. Come abbiamo visto nell'esempio del gruppo di capitelli la texture applicata al modello è in grado di rendere un modello low poly visualmente convincente quanto uno high poly, rendendolo in grado di definire a livello grafico l'oggetto con lo stesso grado di qualità. Per questo in una visualizzazione tridimensionale dell'intero sito archeologico risulta inopportuno l'utilizzo di una mesh high poly.

I modelli, descrittivi della specifica condizione delle strutture in altezza, offrono la possibilità di essere

immediatamente comparati con la nuvola di punti ottenuta dai rilevamenti eseguiti con il laser scanning e permette di verificare l'affidabilità metrica fino al più piccolo dettaglio, consentendo così riflessioni e considerazioni riguardo le migliori procedure per definire le più attendibili geometrie. Per verificare la precisione e l'attendibilità del metodo, il modello generato dal metodo fotogrammetrico viene messo a confronto con il modello generato dal mesh editing della nuvola dei punti da laser scanner. I due modelli perfettamente allineati, grazie all'utilizzo della funzione "deviazione" nel



MESH CREATA TRAMITE PROCESSO FOTOGRAMMETRICO

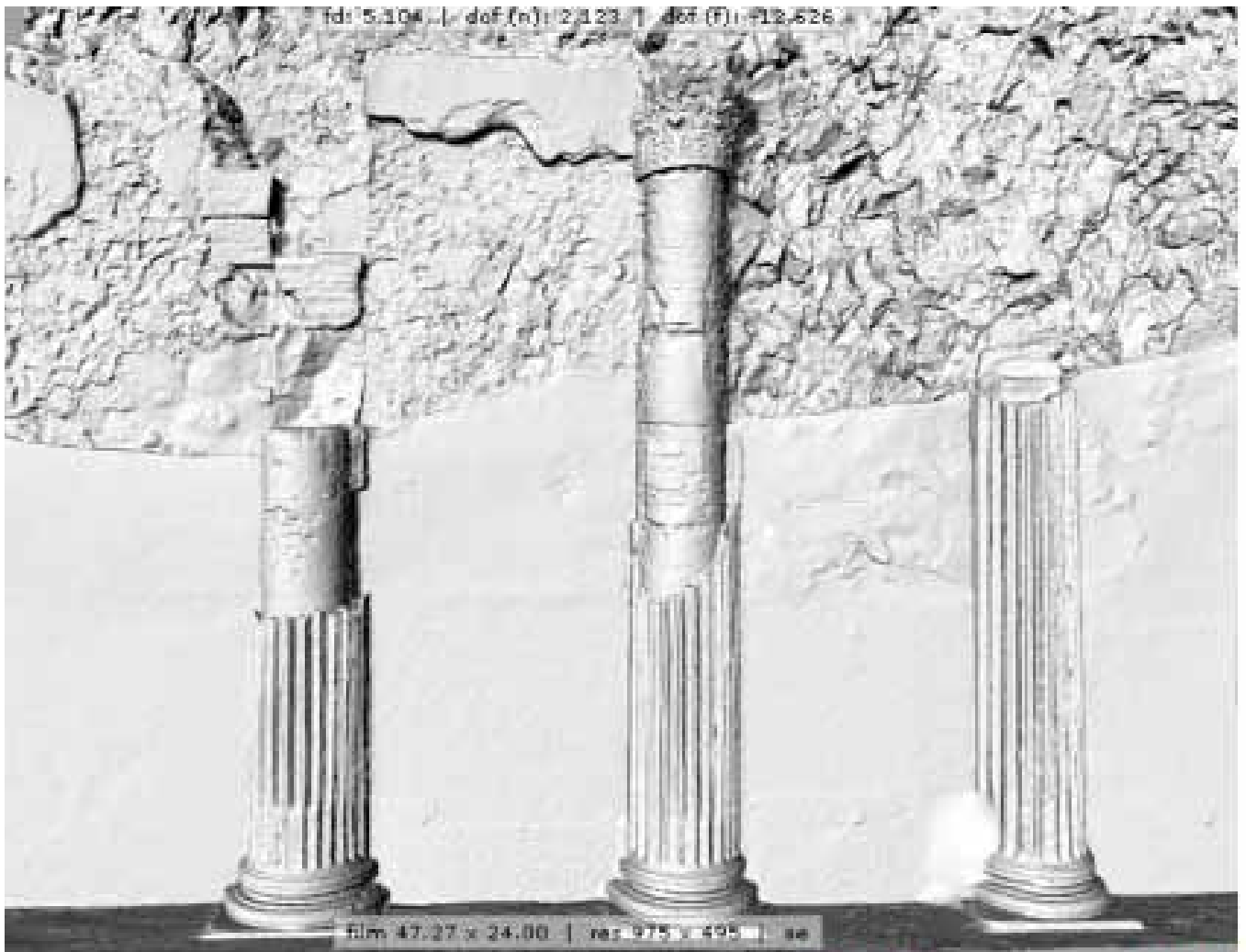
DIMENSIONI: 3,29MB

NUMERO DI TRIANGOLI : 100 000

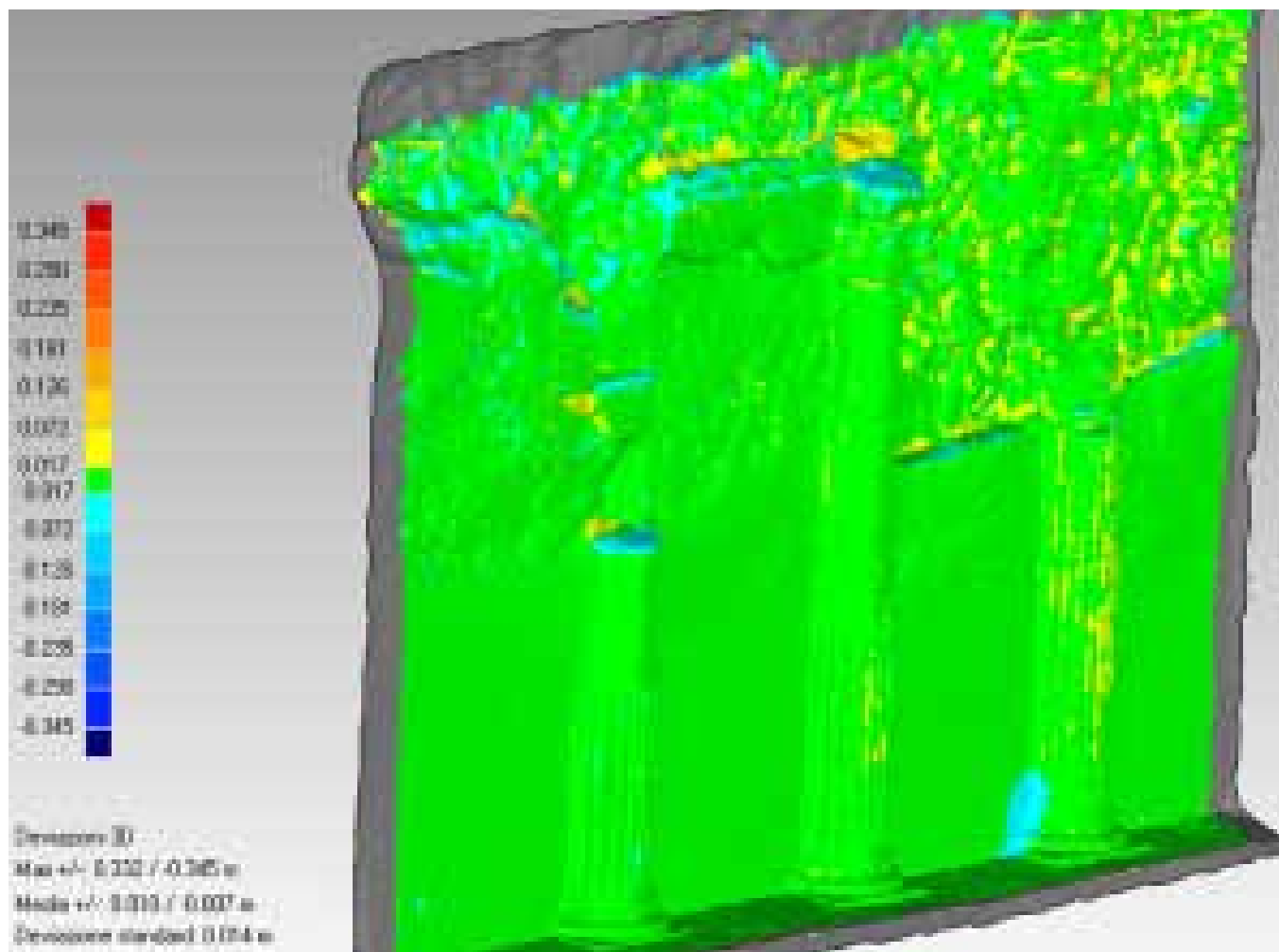
programma Geomagic, creeranno una mappa tridimensionale codificata a colori capace di indicare in maniera cromatica le differenze tra i due oggetti.

Vediamo come i due oggetti anche se uno con definizione di tipo low poly e l'altro con definizione high poly non dimostrano grandi differenze morfologiche, e non si scostano di molto tra di loro, l'errore rappresentato è di lieve intensità, circoscritto ad una grandezza massima pari a 0.072 m solo in prossimità delle ricostruzioni avvenute in fase di post mesh processing con il programma geomagic.

Nelle immagini sotto, confronto delle mesh: la prima generata da fotomodellazione e la seconda da nuvola di punti acquisiti con laser scanner.

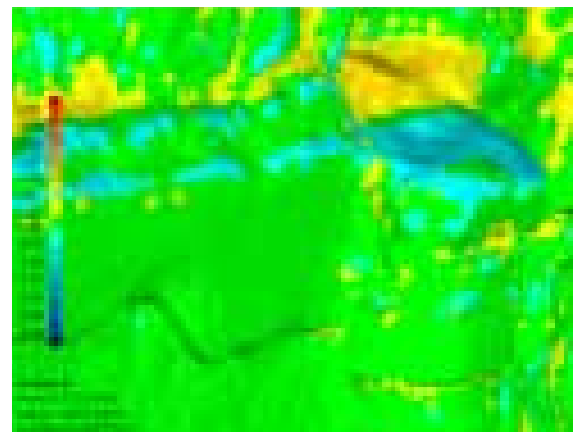
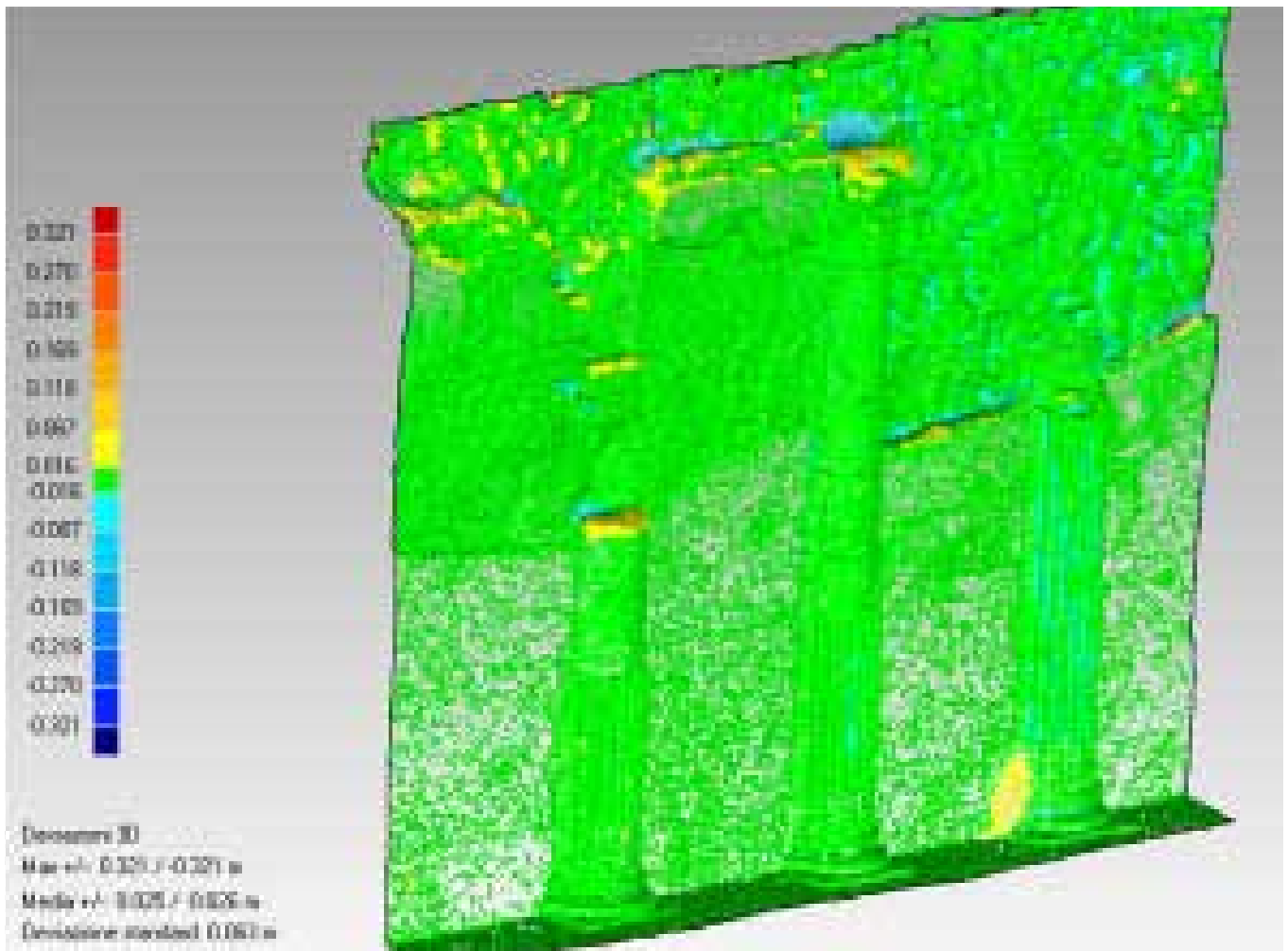


MESH CREATA TRAMITE FILE XYZ ESTRATTO DALLA NUVOLE DEI PUNTI DIMENSIONI: 88,00MB NUMERO DI TRIANGOLI: 2.557.545



Considerando che i modelli generati dal programma di fotomodellazione e i modelli generati dal programma di mesh editing, convertiti entrambi in file di formato .obj, mantengono le stesse coordinate, importandoli in programmi di renderizzazione fotorealistica per essere utilizzati entrambi per ottenere una visualizzazione di ottima qualità conservando entrambi ottimali caratteristiche cromatiche. Per una corretta lettura del dato geometrico passando a scale di dettaglio (1:5, 1:2 e 1:1) l'utilizzo di una superficie high poly è da considerare più attendibile. La sua visualizzazione in modalità ombreggiata e senza applicazione geometrica risulta infatti sempre più descrittiva ed efficace.

Nelle immagini sopra e nella pagina a fianco, confronto delle mesh. Le due mesh vengono sovrapposte e ne viene verificata l'aderenza, attraverso una scala cromatica, dove il colore verde ne indica l'ottima aderenza.





A photograph of a town square. On the right, a large, dark stone building with classical architectural details like columns and arches. In the center, a multi-story building with a red-tiled roof and several windows. On the left, a stone tower with crenellations. The sky is filled with soft, white and grey clouds, suggesting a late afternoon or early morning setting. A semi-transparent white banner is overlaid across the middle of the image.

PARTE V

ARCHIVIAZIONE DEL DATO E *OUTPUT*



Restituzione bidimensionale della planimetria del Palazzo di Erode a Masada, Israele.

CAPITOLO 7

Archivi digitali per la catalogazione

La documentazione di un bene architettonico ed archeologico è un'attività molto impegnativa sia dal punto di vista culturale, per la multidisciplinarietà che essa implica, sia dal punto di vista tecnologico e metodologico perché, con l'uso di strumentazioni sempre più avanzate, permette di raccogliere una quantità notevole di dati che, una volta elaborati, costituiscono un notevole e variegato corpus documentario.

In un progetto di ricerca complesso e multidisciplinare appare evidente che utilizzare un unico sistema di archiviazione e gestione delle informazioni raccolte è l'unico modo per avere un controllo generale e di dettaglio sulle attività svolte e sulla qualità del loro risultato.

Il progetto della banca dati ha lo scopo di organizzare il sistema delle informazioni che entrano da attività diverse. Man mano che le informazioni aumentano ciascun dato acquisito passa da essere semplice valore statico ad elemento dinamico, perché entrando all'interno del sistema della banca dati inizia a relazionarsi e confrontarsi con gli altri dati, diventando un elemento dinamico soggetto a verifiche incrociate e valutazioni tra livelli di acquisizione diversi.

Il sistema di archiviazione di ciascuna analisi di dettaglio dovrà rispettare il sistema generale. Questo aspetto appare ancora più importante se si considera che gli operatori che eseguono il rilievo non necessariamente potranno essere gli stessi che lavoreranno nella fase di postproduzione. Adottare un sistema di archiviazione codificato ha quindi anche lo scopo di definire uno schema di riordino delle informazioni comprensibile da ciascun operatore che si trovi per la prima volta a dover rielaborare le informazioni.

Un'organizzazione del tipo a cascata consente di avere un unico codice nel quale poter riconoscere l'identificazione della macro area, della microarea o ambiente, per poi individuare il nome dell'elemento specifico studiato.

Anche in questo caso accompagnare il codice ad una identificazione planimetrica di dove è collocato l'oggetto faciliterà il riconoscimento e rintracciamento di quello stesso elemento in modo più intuitivo e veloce.

Per questo motivo la fase di collaudo del sistema di archiviazione è fondamentale: la possibilità di modificare la struttura di archiviazione risulta infatti inversamente proporzionale sia al trascorrere del tempo che alla quantità di dati e informazioni che giornalmente vengono acquisite.

7.1 Fase di archiviazione e gestione dei dati: il caso Masada Project

Il Progetto Masada è un progetto molto vasto che si prefigge l'obiettivo di documentare, attraverso il rilievo, l'intera area archeologica. L'elaborazione dei dati raccolti permette al gruppo di ricerca di redigere modelli ed elaborati metricamente affidabili che costituiranno la base per futuri approfondimenti e considerazioni anche in merito di gestione in ambito archeologico ed architettonico.

Una delle operazioni preliminari per un intervento su di un sito così vasto, è costituito dalla costruzione di un "contenitore" idoneo alla raccolta, all'elaborazione e all'archiviazione dei vari dati. Infatti, l'approccio metodologico di rilievo dell'architettura e in particolare dei resti archeologici attraverso sistemi di rilevamento digitale e l'utilizzo di tecnologie infografiche per la rappresentazione ha permesso da una parte di valorizzare il cospicuo patrimonio iconografico e documentario che viene prodotto dal team di ricerca, dall'altra fa sorgere problematiche inerenti la gestione della vasta documentazione di rilievo che ogni campagna produce. L'archivio digitale costituisce quindi il necessario contenitore informatico per la conservazione e gestione del dato, soprattutto in funzione dello scambio e della reperibilità di questo, in primis dai ricercatori coinvolti nel progetto e successivamente dalla comunità scientifica più estesa, con l'accesso libero al data base.

La libera fruizione (open data) dei files sorgente, ovvero la libera fruizione dei dati non elaborati del rilievo eseguito durante la campagna di rilevamento, costituisce un aspetto fondamentale nell'organizzazione e realizzazione dell'archivio. Infatti, eseguire un rilievo di un sito archeologico vuol dire essenzialmente documentare in maniera analitica ogni evidenza individuata e tradurla in documenti scritti, grafici e fotografici¹.

Questo processo archeografico permette sia di realizzare il processo archeologico, interpretativo, da parte di

coloro che hanno direttamente eseguito l'indagine, sia di riutilizzare la documentazione raccolta nel corso delle indagini sul campo per formulare ulteriori ipotesi e ricostruzioni storiche da parte di altri studiosi².

Se, infatti, non si possono fare buoni ragionamenti critici, senza una buona descrizione oggettiva dei dati di partenza, non si può fare archeologia senza archeografia³. Quindi, la creazione di un archivio digitale on-line, che consente di preservare i dati e metterli a disposizione, implica una progettazione accurata che tenga conto di serie di standard, relativi alle procedure informatiche da adottare per salvaguardare la progettazione, implementazione e conservazione dell'archivio stesso. Infatti condividere i dati, sia a livello locale che a livello più esteso, significa standardizzare il processo di documentazione.

Un altro aspetto importante da considerare nella progettazione dell'archivio è che l'evoluzione della tecnologia negli ultimi anni ha permesso non solo la creazione di archivi digitali più o meno complessi, ma soprattutto la costruzione di banche dati tridimensionali di tipo dinamico.

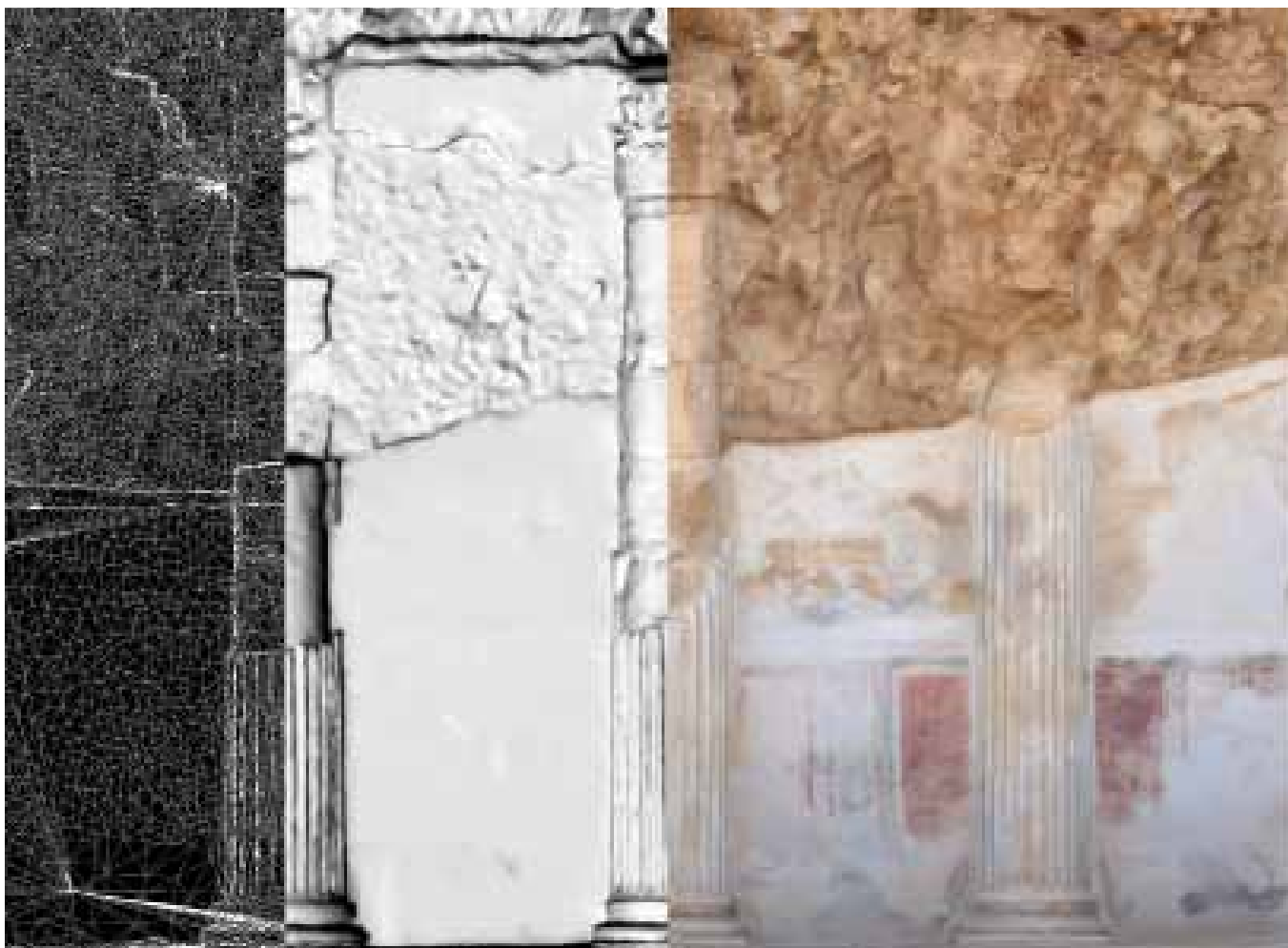
Questo ha implicato l'aggiunta di un nuovo layer informativo e la conseguente progettazione dell'archivio digitale capace di tenere conto dei dati 3D sia per la geometria e morfologia dell'oggetto rilevato (utile per la tutela e la conservazione), ma anche come veri e propri contenitori di informazioni utili per la gestione del sito (informazione volta al restauro ed a scopi scientifici) o per la fruizione del pubblico in ambito museale attraverso la realtà virtuale.

Nel caso del Progetto Masada, la collaborazione tra diverse Università e ricercatori di diversa nazionalità, ha reso necessario la costruzione di un archivio il più possibile coerente e rigoroso ma allo stesso tempo funzionale alle diverse discipline coinvolte.

Per la raccolta e conservazione dei dati, il gruppo di ricerca si è orientato verso la scelta di costruire un Archivio Masada, non solo rivolto alla conservazione degli elaborati finali ma anche alla raccolta e conservazioni dei dati “sorgente”, costituiti da: progetto di rilievo, eidotipi, caratteristiche degli strumenti, appunti di rilievo, dati metrici originali (le singole scansioni laser scanner), campagne fotografiche dei singoli ricercatori (nei formati originali di acquisizione) e documenti dattiloscritti e iconografici (scansionati, fotografati e/o trascritti in lingua originale e con relativa traduzione).

Nello specifico il rilievo archeologico di Masada, attraverso l'utilizzo della tecnologia laser-scanner e l'utilizzo della fotografia per il rilievo fotogrammetrico integrato alle tradizionali tecniche del rilievo diretto ha portato all'accumulo di un'enorme quantità di informazioni.

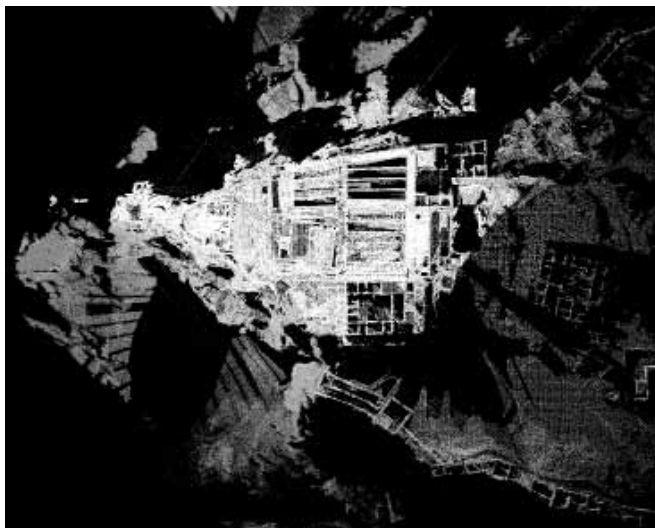
Questo ricco corpus documentario se gestito in modo critico ed efficiente, si rivela incredibilmente vantaggioso, al contrario se privo di un'organizzazione utile e funzionale dei dati può provocare disordine e caos, con la tragica conseguenza di vanificare il lavoro di rilevamento.



Nell'immagine, modello tridimensionale di una porzione della terrazza più bassa del Palazzo di Erode. Da sinistra una visualizzazione delle mesh in wireframe, senza texture e con l'applicazione della texture.

Quindi è evidente che utilizzare un unico sistema di archiviazione e gestione delle informazioni raccolte è l'unico modo per garantire un controllo generale e di dettaglio sulle attività svolte e sulla qualità del loro ri-

sultato. Il progetto dell'archivio digitale infatti ha tra i suoi principali scopi quello di organizzare il sistema delle informazioni che entrano da attività diverse.



Nell'immagine, tre viste planimetriche della nuvola di punti di Masada. In alto i due database separati delle campagne di rilievo del 2013 e del 2014. In basso il database finale con la registrazione delle due campagne.

7.2 La struttura dell'archivio Masada

L'archivio digitale Masada è diviso in quattro sezioni: la prima contenente tutti i dati "sorgente" (fonti e files originali); la seconda i dati "elaborati" (files di avanzamento e files finali); la terza i dati "amministrativi e di organizzazione logistica" e la quarta sezione denominata "M" contenente le informazioni dei singoli ambienti archiviate con strutturazione di tipo catastale.

Nel dettaglio, le quattro sezioni si articolano come di seguito illustrato:

La prima sezione, denominata "Sorgente" contiene quattro sottosezioni:

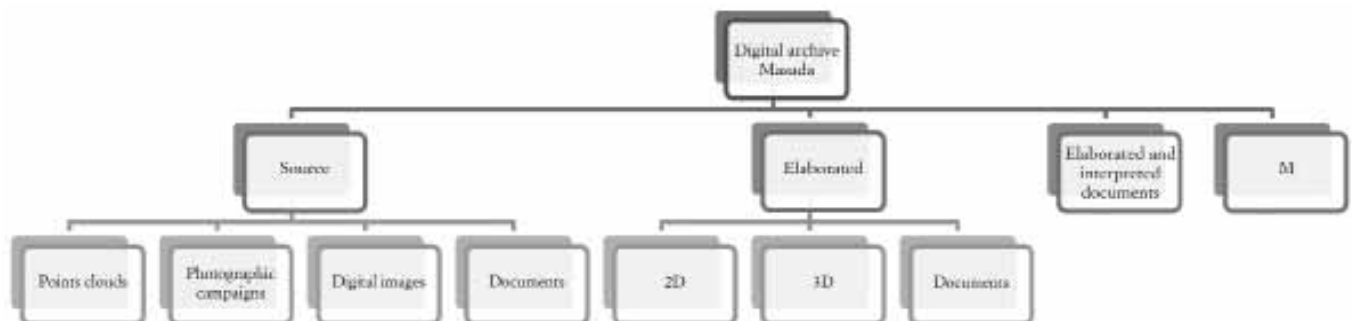
- nuvole di punti (files originali provenienti dagli strumenti utilizzati in formato .ptz, .txt; conversioni ed esportazioni in formato .ptx, .pts, .xyz, .txt; database tridimensionale riferito all'anno di acquisizione, in formato .imp; database tridimensionale contenente le due campagne di rilievo registrate ed orientate secondo le coordinate GPS in formato .imp; esportazioni destinate all'elaborazione, suddivise in formati che mantengono le proprietà vettoriali come .ptx, .xyz, per la modellazione diretta o la lucidatura e formati raster di tipo .jpg, .tiff, .bmp e .png, per altro tipo di elaborazioni).
- materiale fotografico, in vari formati di acquisizione

e in base al tipo di fotocamera digitale, in genere .jpg, .raw, acquisite ed archiviate per diverse elaborazioni (documentazione del sito dal generale al particolare del singolo ambiente; fotogrammetria bidimensionale; fotomodellazione; panoramiche sferiche 360°; campagna fotografica proveniente da Drone).

Il materiale fotografico è archiviato per campagna fotografica giornaliera, per autore e formato, ed è accompagnata da una scheda identificativa delle aree interessate dalla singola campagna fotografica.

- immagini in vari formati di acquisizione, in genere .jpg, .tiff, .png e .bmp, acquisite per diversi utilizzi e da diverse sorgenti (scansioni eidotipi; scansioni appunti; scansioni immagini cartacee come libri, fogli sciolti, ..ecc; immagini acquisite da archivi on-line; altre sorgenti).

Ogni archivio di immagini contiene una scheda testuale per l'identificazione delle immagini raccolte. All'interno di tale schedatura viene riportato il riferimento bibliografico e sitografico per le immagini provenienti da archivi on-line, il link dal quale è stata scaricata l'immagine, l'autore e la fonte.



Struttura dell'archivio digitale del Progetto Masada.

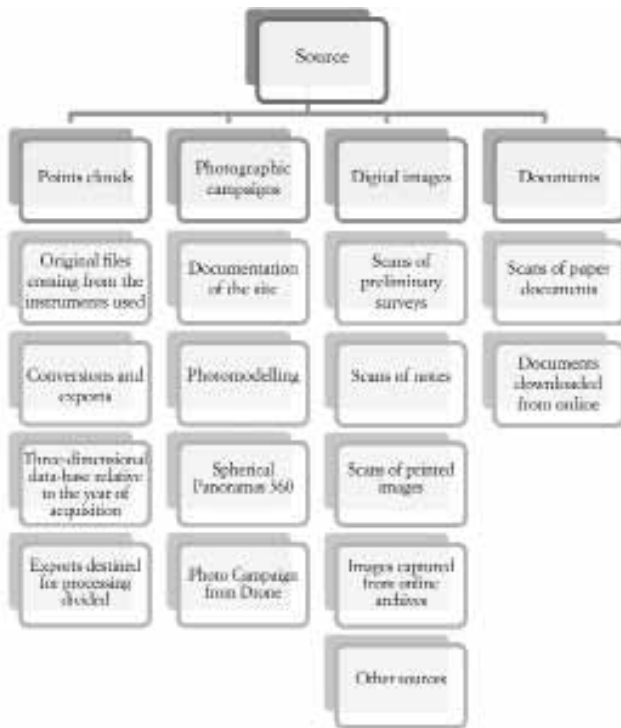


Diagramma a caduta, che illustra la sezione “Sorgente”.

Per le immagini provenienti da pubblicazioni, in formato cartaceo o digitale, la scheda contiene le seguenti informazioni: autore dell'immagine, titolo dell'immagine e titolo della pubblicazione (esempio: Vivant Denon (1802): Reunion de divers Fragments d'Architecture Egyptienne. Bertocci, S. A project for the archaeological survey of the site of Masada, Israel. In S. Bertocci, S. Parrinello, R. Vital, Masada notebooks. Report of the research project 2013. Vol. I. Edito da Edifir, Firenze, 2013. ISBN 978-88-79706-40-7).

Per le scansioni di materiale cartaceo originale, realizzato durante le campagne di rilievo come ad esempio eidotipi e appunti, la scheda di accompagnamento contiene informazioni inerenti al luogo, la data e l'autore.

- documenti (vari formati di acquisizione del documento, in genere .doc, .dox, .pdf, .txt, ...) acquisiti per diversi utilizzi e da diverse sorgenti: scansioni documenti cartacei (libri, fogli scolti, ..ecc.); documenti scaricate da archivi on-line (lingua originale e/o trascrizione, e/o

traduzione); altre sorgenti.

Anche questa tipologia di files è accompagnata da schede inventariali con informazioni analoghe alle immagini. Per le pubblicazioni in formato cartaceo o digitale, (esempio: Bertocci, S. A project for the archaeological survey of the site of Masada, Israel. In S. Bertocci, S. Parrinello, R. Vital, Masada notebooks. Report of the research project 2013. Vol. I. Edito da Edifir, Firenze, 2013. ISBN 978-88-79706-40-7). Inoltre viene segnalato anche l'autore dell'acquisizione del suddetto files. All'interno di ogni cartella il nome del files rimane quello originale, ad esempio le foto conserveranno il nome assegnato dalla macchina fotografica. Questo permette di conservare le informazioni inerenti a quella specifica fotografia.

La sezione “Elaborati” contiene tre sottosezioni:

- 2D dove vengono archiviati i disegni vettoriali in formato .dwg e similari; i disegni raster in formato .eps, .tiff, .pdf, .jpg e similari; le elaborazioni grafiche bidimensionali, in formato .tiff, .pdf, .jpg, e similari. Di questa raccolta fanno parte tavole realizzate per tesi accademiche, poster mostre, tavole realizzate per pubblicazione, ...ecc.; la schedatura del database.

- 3D (in formati diversi a seconda del software utilizzato, in genere .ptx, .obj, .wrp, .3ds, .dae, .dxf, .fbx). All'interno saranno archiviati i modelli realizzati attraverso l'elaborazione diretta della nuvola di punti; i modelli ricavati attraverso la fotomodellazione; i modelli nurbs realizzati attraverso l'estruzione da disegno bidimensionale; i modelli mesh ad alto numero di poligoni; i modelli a basso numero di poligoni, per la navigazione in real-time.

- documenti (formati diversi a seconda del software utilizzato), del quale fanno parte le relazioni; le tesi; le pubblicazioni; le presentazioni; i video; e similari.

La sezione Elaborati e documenti interpretati (ad esempio ipotesi ricostruttive) è una sezione che comprende diversi elaborati e documenti che riguardano l'interpretazione del dato oggettivo proveniente dal rilievo.

Infine la quarta sezione denominata “M” è una parte fondamentale dell'archivio Masada, infatti in essa è raccolto tutto il materiale proveniente dall'elaborazione tridimensionale e bidimensionale dei vari resti architet-

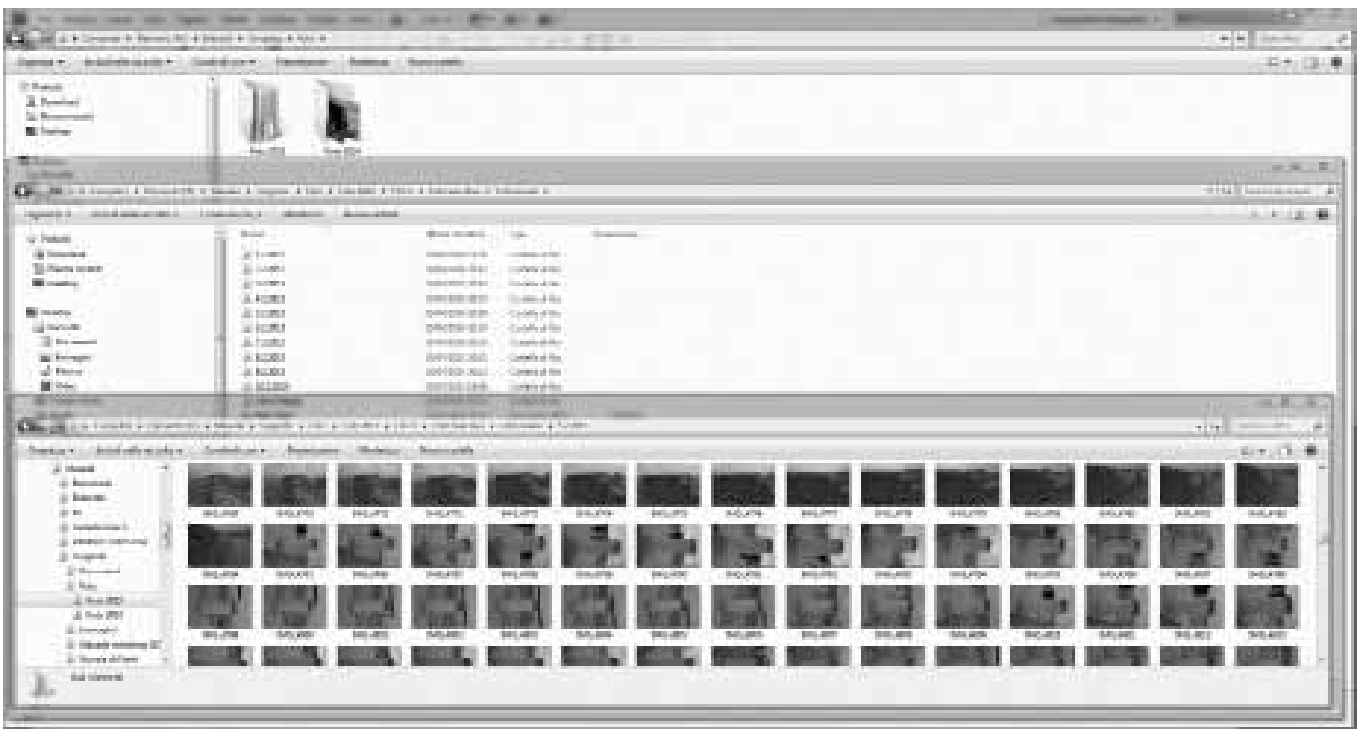
tonici, e non solo, presenti sul sito.

La struttura di questa sezione è di tipo catastale, questo non solo facilita l'individuazione di ogni elemento nella vasta area del sito, ma ha permesso di collegare la ricerca, con il lavoro svolto durante gli scavi realizzati dalla missione guidata dall'archeologo Yigael Yadin, negli'anni '60, definendo un continuo nella nomenclatura e divisione di tutta l'area.

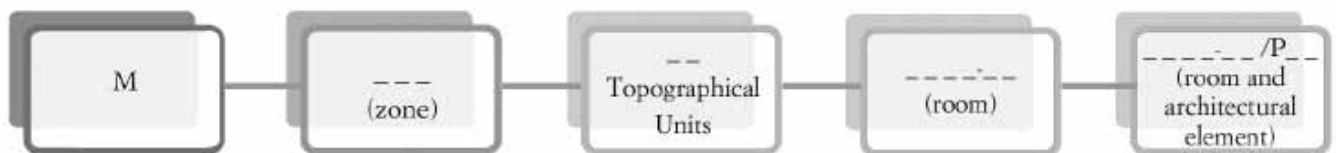
Grazie alla divisione in quadranti del sito, è possibile avere il controllo dalla macro area fin al singolo dettaglio architettonico.

All'interno di questa sezione troviamo, a caduta:

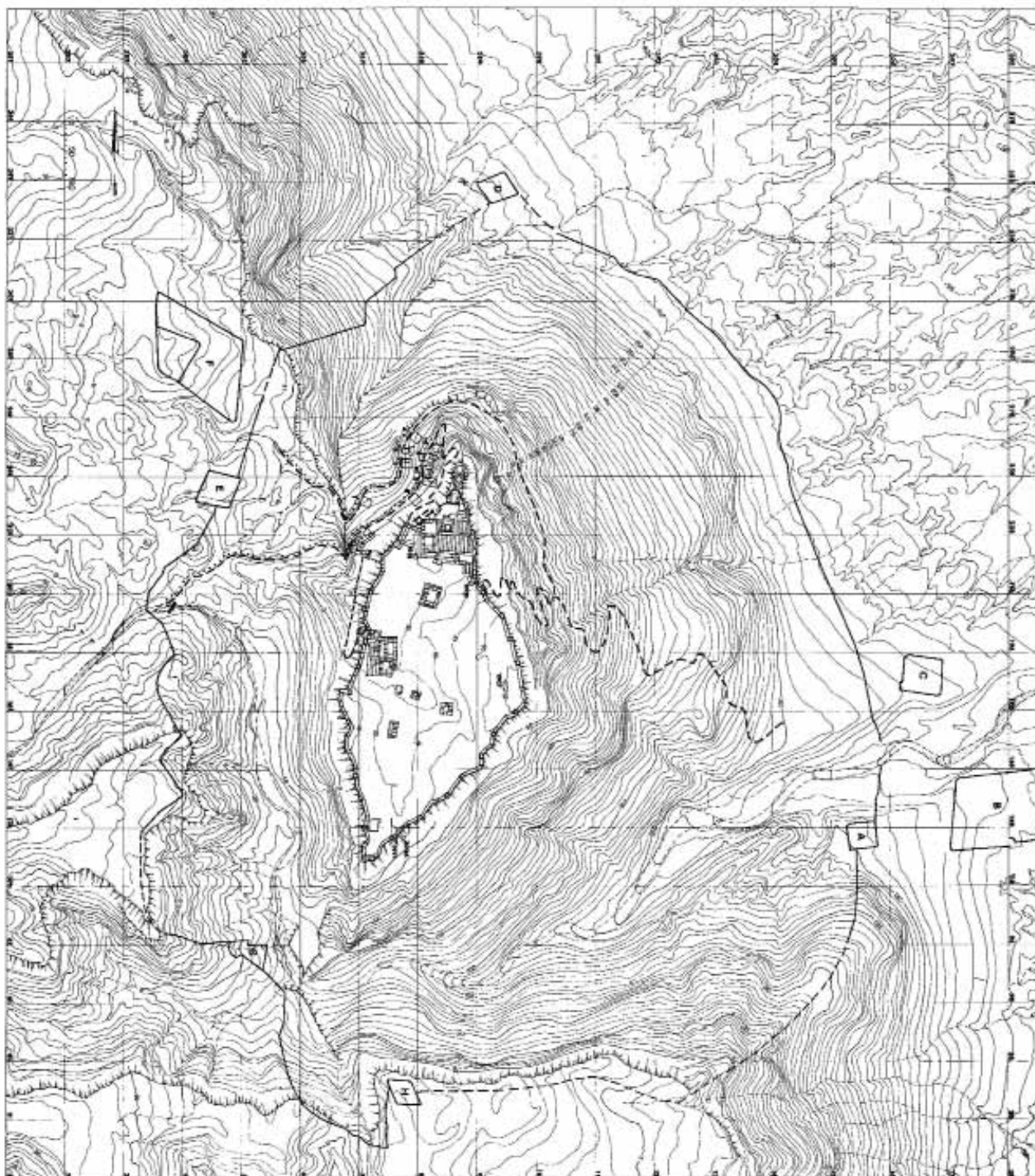
- Una sezione che identifica le varie Zone. La nomenclatura di ogni singola zona è di tipo numerico ed è composta da tre cifre, che indicano il quadrante della cartografica di riferimento⁴.



Archivio digitale inerente le campagne di rilievo fotogrammetrico.



Schematizzazione della quarta sezione dell'Archivio Masada.



Planimetria del sito archeologico di Masada, con griglia di riferimento per la divisione del territorio. La planimetria è tratta da Masada III, Plan. 3.

- All'interno di ogni sezione __ __ (zona) sono raccolte le "Unità Topografiche". Per la nomenclatura di tali UT è stata scelta l'interpretazione evolutiva del sito, data da Netzer⁵.

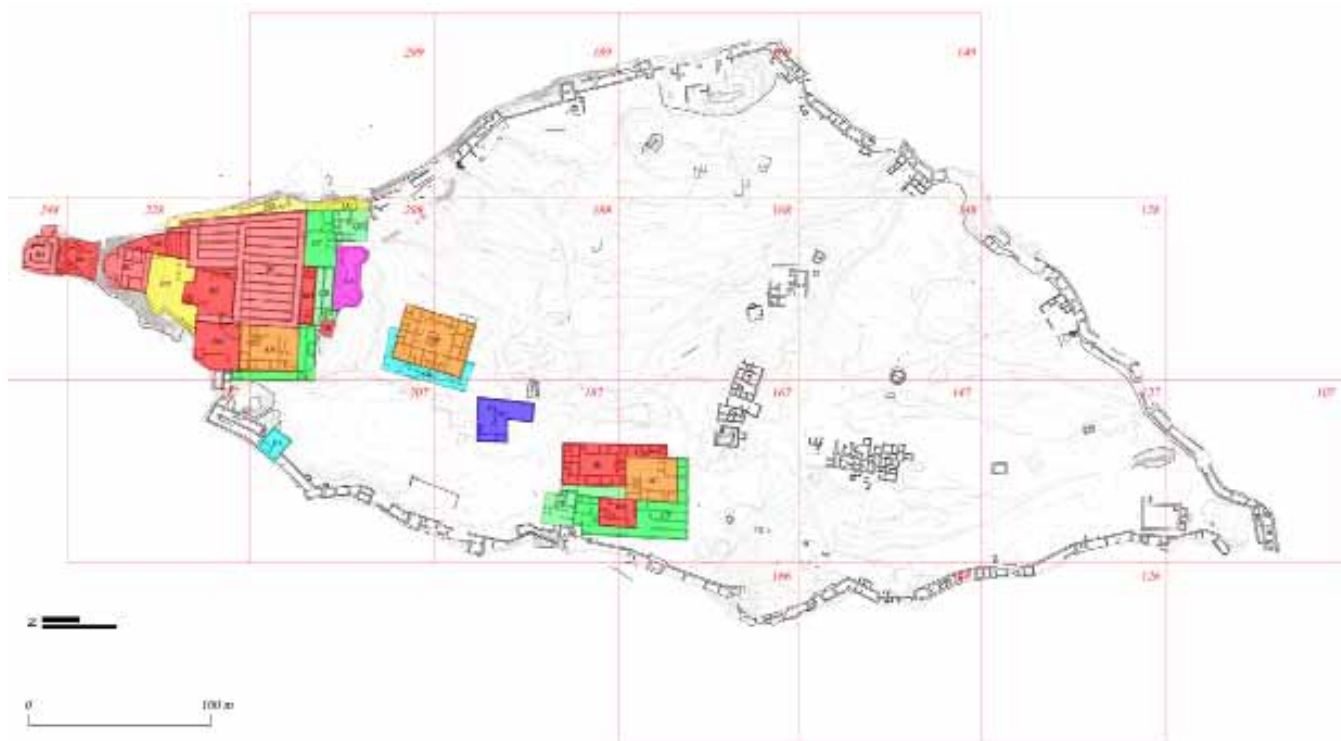
Il nome delle UT è composto da due lettere maiuscole (ad esempio AA). La prima lettera indica tutti i corpi di fabbrica che secondo l'interpretazione appartengono ad una fase. La seconda lettera è data dalla posizione seguendo l'orientamento nord-sud. La D posta come prima lettera indica il sistema di fortificazione (la divisione in dettaglio tra torri, porte e mura verrà assegnata successivamente). La G posta come prima lettera indica cave, grotte naturali e cisterne.

La scelta di assegnare ad ogni UT un codice alfabetico, nasce dall'esigenza di uniformare la nomenclatura dei vari elementi architettonici e naturalistici, infatti precedentemente, la missione archeologica, non ha assegnato

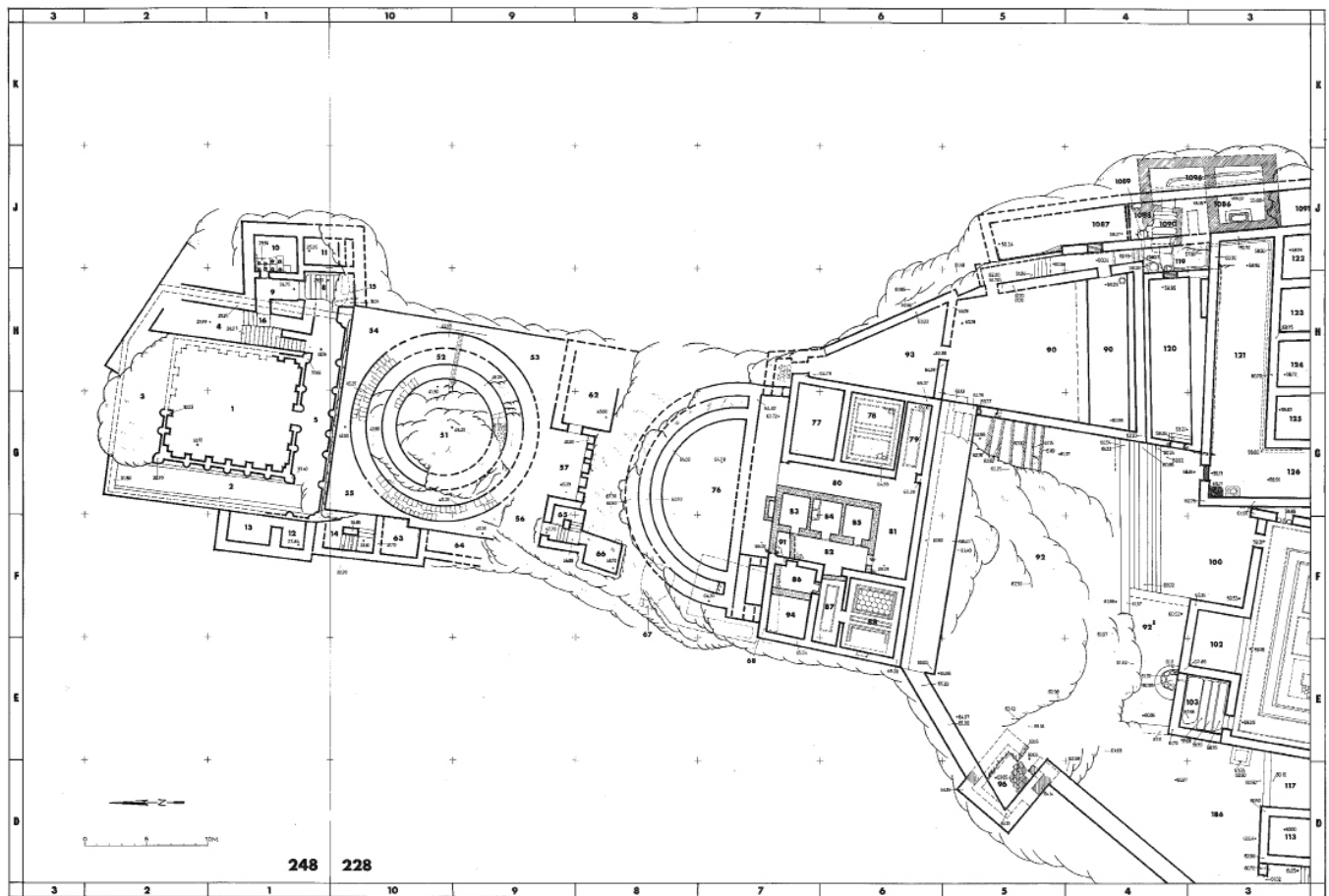
un nome univoco ma ha indicato gli edifici con nomi, come: Building No. 7, Western Palace, Casemate Wall e così via. Invece, ha riservato un'attenta e scrupolosa catalogazione dei singoli ambienti che compongono i vari edifici.

Il gruppo di ricerca, ha ritenuto indispensabile mantenere tale nomenclatura, apportando due modifiche essenziali. Infatti alle tre cifre che compongono il nome di ogni ambiente, il gruppo ha ritenuto indispensabile apporre una quarta cifra che precede, tutti gli ambienti con nome fino a 999. Questo ci permette, senza modificare il codice, di nominare gli ambienti anche con numeri di quattro cifre, accrescendo sensibilmente la libertà di identificare e catalogare nuovi ambienti, nell'eventualità di nuove campagne di scavo e nuovi ritrovamenti.

Un'ulteriore modifica è costituita dall'aggiunta di due cifre divise dalle precedenti.



Planimetria del sito di Masada, con identificazione delle Unità Topografiche (UT).



Plan 3. Northern Palace with its approach area.



*Nell'immagine sopra, planimetria del Palazzo di Erode, dove è riportata l'identificazione dei vari ambienti.
Tavola tratta da Masada III, Plan. 3.*

*Nell'immagine a sinistra, dettaglio della planimetria, con riportata l'identificazione degli ambienti.
Alla nomenclatura già formulata dagli archeologi, per meglio documentare il sito, abbiamo inserito una divisione più dettagliata, in funzione dell'acquisizione del dato metrico e la conseguente restituzione.*

Questo permette di poter frazionare i vari ambienti, nel caso di specifiche esigenze. Questa seconda parte del codice identificativo, è già presente anche nella catalogazione degli ambienti fatta negli anni '60, ma è riportata solo negli ambienti frazionati. Il gruppo di ricerca ha ritenuto necessario, per uniformare il codice, inserirlo in tutti gli ambienti, frazionati e non, così da non modificare la struttura del codice. Quindi sarà riportato 01 nel caso che l'ambiente non sia frazionato, 02 se risulta diviso in due parti, 03 in tre 0n se è diviso in n elementi).

In sintesi, all'interno di ogni sezione __ (unità topografica) saranno create tante sottosezioni in funzione del numero di ambienti che costituiscono la UT. Il nome di queste sottosezioni è composto da numeri nella forma 0000-01.

All'interno di ____-__ (ambiente) troviamo una nomenclatura più libera che identifica la tipologia di files all'interno (foto, modelli 3D, restituzioni bidimensionali, documenti,ecc.), tutti riferiti al singolo ambiente.

All'interno di ____-__ (ambiente) sarà presente, se necessaria, un'ulteriore sezione, con nome alfanumerico P01, P02, Pn dove P = particolare e 01 = numero del particolare. Anche all'interno di tale sezione la nomenclatura è più libera ed identifica i files di tipo fotografico, grafico e documentario, riferito comunque al singolo particolare.

Tale catalogazione ci permette di avere un percorso univoco del tipo M\000\AA\0000-01\P00.

Anche i singoli file avranno un'analogia nomenclatura, che avrà la seguente struttura:

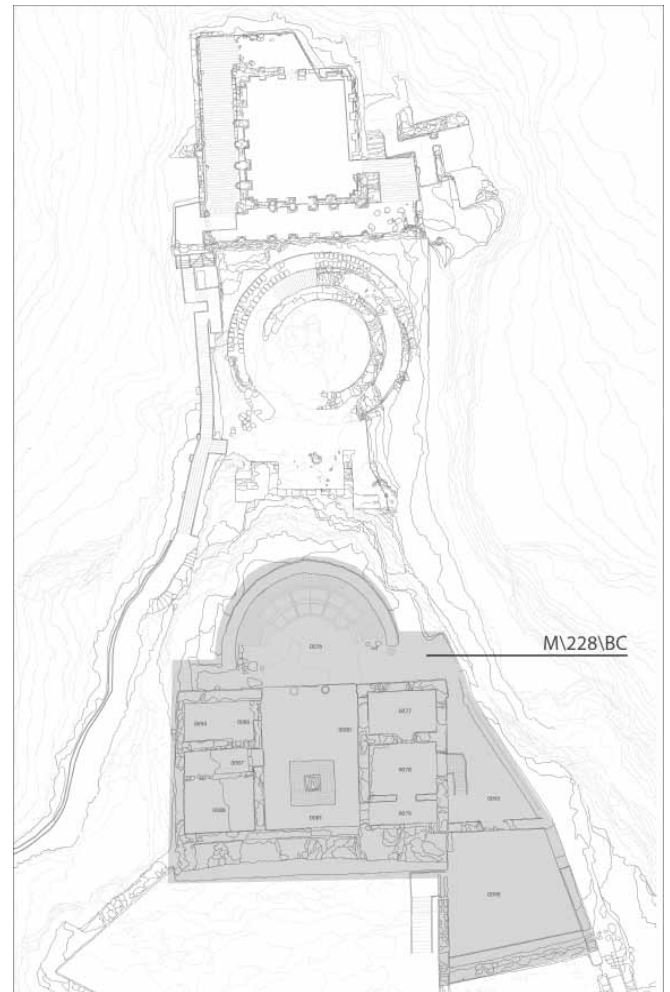
M\000\AA\0000-01\P00_aaaammggAA

dove la prima parte del nome alfanumerico è stata esplicitata sopra, mentre la seconda parte, anch'essa alfanumerica, identifica la data di creazione o nuovo salvataggio giornaliero (ad esempio 20140101 che identifica la data creazione/modifica del file in formato aaaa-mm-gg), e AA che rappresenta il salvataggio incrementale effettuato nel medesimo giorno.

L'archiviazione di tutti i materiali del progetto è organizzato con l'intento di creare un Sistema Informativo per il Sito Archeologico di Masada, ovvero di creare un ambiente virtuale capace di integrare la documentazio-

ne archeologica e archivistica con un sistema GIS per la gestione integrata di informazioni di varia tipologia, contenuto e formato.

L'archivio Masada, nasce con lo scopo, non solo di conservare i dati, ma di organizzarli in funzione della realizzazione, attraverso la modellazione tridimensionale, di un GIS 3D e 2D. Infatti, i modelli creati attraverso la modellazione diretta dalla nuvola di punti e dalla fotomodellazione, sono veri e propri archivi capaci di



Nell'immagine sopra, un esempio di identificazione e archiviazione di una delle terrazze del Palazzo di Erode.

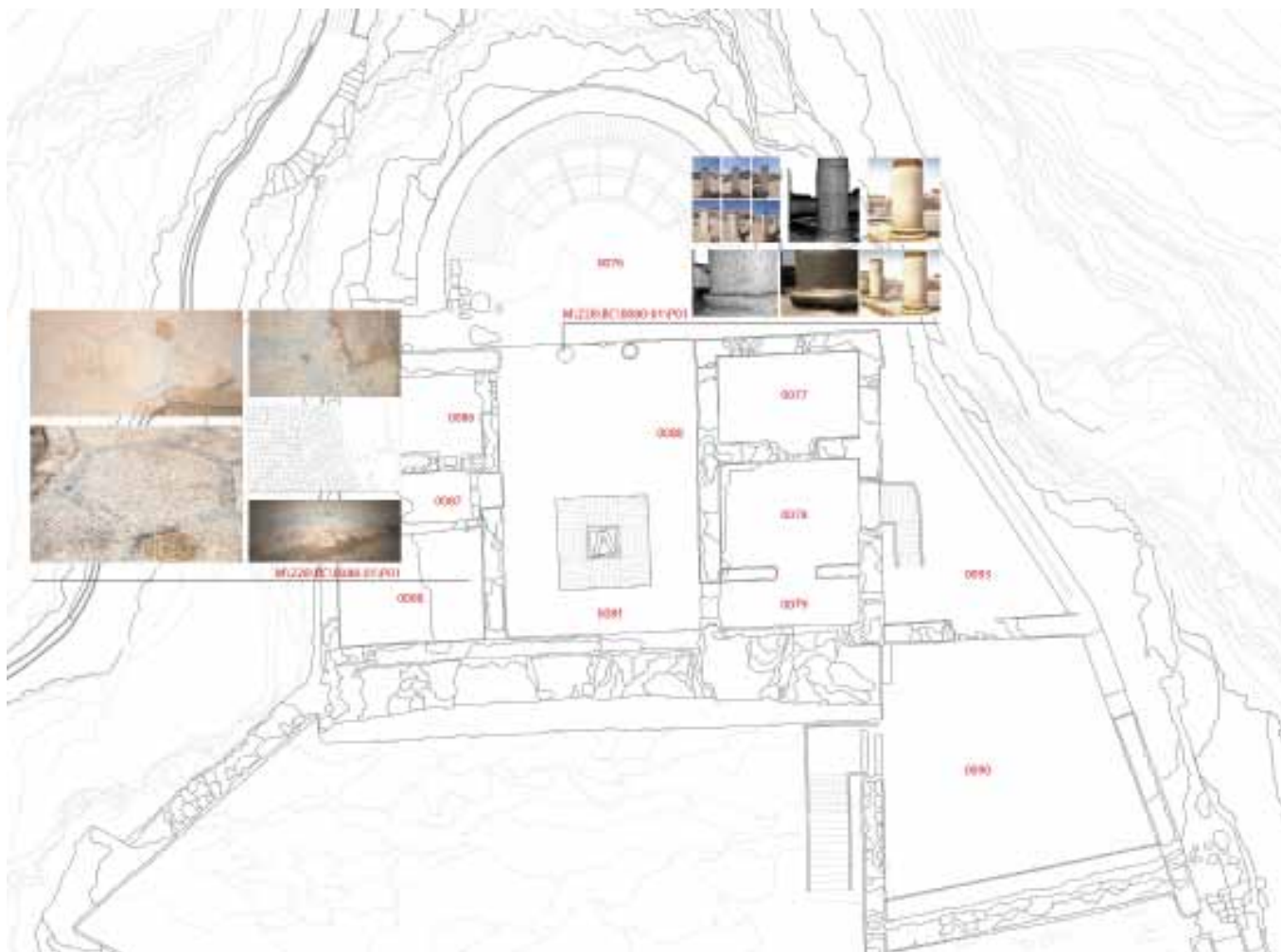
supportare elaborazioni critiche relative a vari temi per la lettura e stesura di un progetto di gestione e conservazione del sito. Ma possono essere sfruttati anche per ricostruzioni tridimensionali volte alla fruizione remota del sito, attraverso un'esplorazione virtuale.

Questi due differenti risultati portano ad un approccio distinto nella realizzazione dei modelli stessi, e ad una distinta archiviazione dei modelli tridimensionali. Infatti, nel primo caso, è indispensabile assicurare l'accuratezza del dato che invece nel secondo può essere

tralasciata preferendo una minore dimensione del file finale, che dovrà essere fruito in modo fluido all'interno di piattaforme real-time (in remoto o on-line).

L'archivio è organizzato in modo da mantenere il layer informativo, disponibile in modo autonomo da ambedue i risultati.

Questo permetterà una gestione delle informazioni più fluido sia in ambito scientifico e tecnico, sia in ambito didattico e divulgativo.



Esempio di modellazione tridimensionale e archiviazione.

Note

1. Guidi, 1994
2. D'Andrea 2006, pag. 130
3. Mannoni 2000, pag. 217
4. Tale cartografia con numerazione dei quadranti è pubblicata in Netzer, E. MASADA III. pag. XVI.
5. Tale interpretazione è riportata all'interno della pubblicazione Netzer, E.MASADA III.



Vista del modello tridimensionale di uno dei vicoli più caratteristici del centro storico di Montepulciano.

CAPITOLO 8

Nuovi approcci di fruizione del dato

Dai dati Istat risulta che alla fine del 2013 il 60,7% delle famiglie italiane possiede un pc, l'accesso a internet e una connessione a banda larga. La diffusione dei dispositivi mobili (smartphone e tablet) è salita vertiginosamente raggiungendo nel primo semestre del 2013, solo in Italia, circa 4 milioni di tablet venduti e 25 milioni di smartphone in possesso dei cittadini, diventando il dispositivo più utilizzato per accedere al web. È per questo motivo che un numero sempre crescente di aziende e istituzioni si stanno rapidamente dotando di App ufficiali, come nuovo strumento di comunicazione ed interazione con il proprio pubblico di riferimento.

Il telefono, quindi, non è più un semplice strumento per comunicare a “viva voce” e il pc non è più uno strumento di solo lavoro, bensì diventano un complesso apparato in grado di gestire e organizzare la vita professionale e sociale sempre in continua interazione attraverso il web, oltre che dispositivi in grado di programmare, gestire e facilitare l'interazione con luoghi e situazioni lontani dal fruitore.

Lo sviluppo di tecnologie digitali come il rendering real-time (RTR) di modelli tridimensionali e l'evoluzione del web ha aperto nuove possibilità di rappresentazione dell'architettura storica e soprattutto favorendo nuovi scenari in ambito di disseminazione e divulgazione dell'informazione a partire non più semplicemente da ricerche testuali, ma da metodi di navigazione geo-spaziale e spazio-temporale e da criteri di similarità visiva basati sulla percezione.

I sistemi informativi a base testuale, permettono al fruitore di attingere alla conoscenza attraverso una visione unificata di insiemi di dati eterogenei. Viceversa, un sistema informativo a base tridimensionale mira a presentare informazioni contestualizzate implementando gli oggetti 3D con immagini 2D, suoni, testo, riferimenti per permettere agli utenti di eseguire ricerche basate sul

contesto e sul contenuto. Questo sistema informativo è denominato realtà aumentata (AR, dall'inglese Augmented Reality).

La realtà aumentata è una branca della computer graphics che studia e sviluppa sistemi in grado di combinare immagini provenienti dal mondo reale con informazioni e oggetti calcolati da computer. L'utente di un'applicazione di AR, utilizzando opportune apparecchiature, è nella condizione di vivere un'esperienza sensoriale arricchita di informazioni ed elementi virtuali, a volte anche interagendo con loro.

8.1 Il sistema di valorizzazione del modello e la creazione dell'interfaccia web

Nel secolo scorso, con l'avvento dei primi computer e il conseguente avanzamento delle tecniche di comunicazione, andò a svilupparsi l'idea di poter creare una realtà alternativa nella quale l'utente potesse immergersi con tutti i sensi. Il primo a creare una macchina che permettesse questa totale immersione in un altro mondo fu Morton Heiling che tra il 1957 e il 1962 creò e brevettò un simulatore chiamato Sensorama che, durante la proiezione di un film, coinvolgeva tutti i sensi. Solamente nel 1989 Jaron Lanier, fondatore della VPL Research,

conì il termine Realtà Virtuale (VR, dall'inglese Virtual Reality). Comunque già negli anni '60-'70 ci fu un forte sviluppo della VR, con la creazione di dispositivi tali da facilitarne l'uso e l'immersione per l'utente; infatti nel 1966 Ivan Sauterland inventò l'head-mounted display (HMD), cioè un visore montato su speciali occhiali o su un casco, mentre nel 1975 Myron Krueger creò un ambiente chiamato Videoplace che dava la possibilità di interagire con il mondo virtuale.

Per le informazioni in ambito dei beni culturali e



Vista prospettica dall'alto della zona del Sasso. La texture applicata sulle coperture è stata ricavata dall'ortofoto.

nell'ambito della rappresentazione dell'architettura caratterizzate dall'essere prevalentemente di tipo visuale e manipolativo, si tratta di una vera e propria svolta epocale a cui si aggiunge quella legata all'espansione dell'archiviazione dei dati in forma digitale. Se negli anni Settanta del secolo scorso gli sforzi iniziali furono rivolti all'accesso remoto a intestazioni bibliografiche di artefatti appartenenti ai beni culturali, soprattutto tramite cataloghi di biblioteche e musei, tra il 1980 e il 1990, la ricerca si è ampliata per includere immagini dei contenuti, come versioni digitali di disegni, interi testi di manoscritti e libri, monumenti, siti e, in alcuni casi, anche intere città. L'obiettivo iniziale era posto sulla digitalizzazione di artefatti isolati, ma presto, al pari di quanto è avvenuto in altri ambiti disciplinari, la domanda è divenuta quella di ricontestualizzare questi oggetti, di relazionarli tra loro come risultato di diverse teorie

estetiche, filosofiche, sociologiche e psicologiche. Per tale motivo un obiettivo fondamentale è divenuto dall'inizio di questo millennio quello delle modalità di connessione delle informazioni e la ricontestualizzazione delle espressioni culturali con le informazioni spaziali e architettoniche, facilitate dal fatto che esse, nel frattempo, digitalmente, sono cresciute in padronanza e in qualità visiva. Oggi un punto fondamentale è quindi costituito dalle modalità di connessione delle informazioni. L'utilizzo come sistema conoscitivo di modelli digitali 3D renderizzati in tempo reale va poi al di là della semplice possibilità di sviluppare riproduzioni fotorealistiche di oggetti reali tridimensionali, piuttosto rende disponibili tutte le informazioni in un modo visivo ed integrato limitando l'errore dovuto alla granularità delle forme rappresentative tradizionali.



Vista del modello tridimensionale generale. Particolare attenzione è stata rivolta anche alla trattazione del verde interno alle mura del centro storico, con la selezione delle essenze, e la generazione di modelli corrispettivi.

8.2 La Realtà Aumentata

Il termine “Realtà Aumentata” venne coniato “casualmente” da Tom Caudell, quando nel 1990 durante il cablaggio di aeromobili Boing si avvalse dell’aiuto di un sistema che in tempo reale gli desse informazioni su come installare i cavi senza commettere errori.

Da allora la differenza tra Realtà Aumentata e Realtà Virtuale è fonte di dibattito. Nel corso degli anni gli esperti di computer graphics hanno fornito diverse definizioni formali dalle quali si evince che le due discipline, pur attingendo allo stesso bagaglio di conoscenze, sono concettualmente diverse. In sintesi si può affermare che mentre la VR riguarda l’immersione in un mondo artificiale, la AR si interessa di rendere la realtà più significativa sovrapponendo elementi virtuali strettamente correlati con il mondo reale stesso. Il corretto funzionamento di un’applicazione di AR si ha quando la combinazione di immagini provenienti dal mondo re-



Schema a livelli di un sistema di realtà aumentata

ale e gli oggetti virtuali risultano sincronizzati e la loro combinazione risulta corretta. Quindi si può affermare che il problema fondamentale della AR sia quello della corretta combinazione tra i mondi reale e virtuale; questo interessa tecnologie differenti in funzione del contesto in cui l’applicazione deve essere utilizzata.

L’hardware e il software che permettono lo sviluppo di



Nelle immagini a fianco, alcune delle pagine dell'applicazione, per smartphone, "MONTEPULCIANOtour".

applicazioni di realtà aumentata sono i più diversi quindi risulta difficile classificarli differenziandoli per una delle due categorie. Tuttavia, qualsiasi sistema di realtà aumentata può essere specificato da un comune schema generale. Seguendo lo schema a livello più basso abbiamo i processi base di Tracking, Registrazione, Visualizzazione e Rendering che vengono di seguito illustrati.

Il Tracking si occupa dell'individuazione della posizione dell'osservatore rispetto alla scena. In altri termini tale processo fornisce in tempo reale la posizione del punto di vista dell'osservatore rispetto ad un sistema di riferimento globale assegnato per convenzione all'ambiente reale in cui l'osservatore si trova.

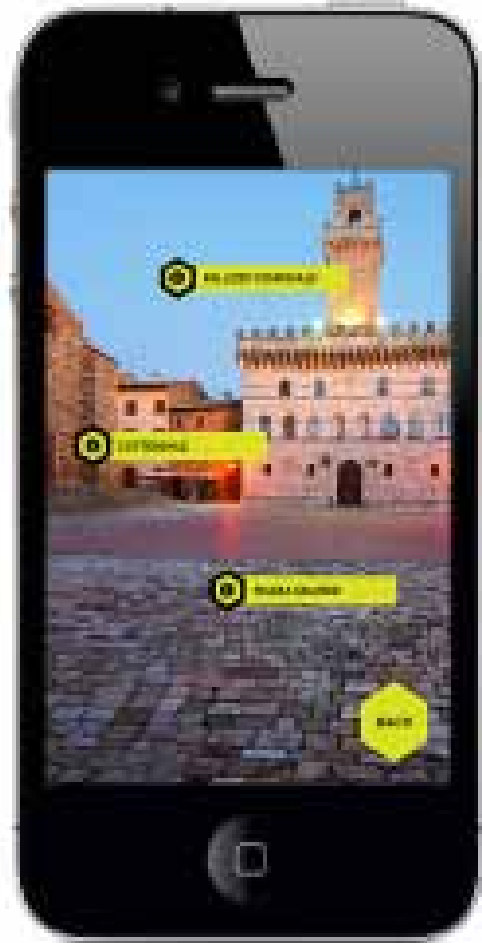
In altri casi il tracciamento consiste nella localizzazione degli oggetti nella scena reale rispetto alla posizione dell'osservatore. Esistono sistemi di tracking di diverso genere: i più importanti verranno discussi nel prossimo paragrafo. La registrazione è il processo che si occupa di allineare gli oggetti virtuali al punto di vista dell'osservatore sulla scena, applicando le opportune trasformazioni geometriche. Accanto alla registrazione e al tracking c'è il processo di Visualizzazione.

Per tale funzionalità i dispositivi di visualizzazione (display) sono il supporto principale. La tipologia di dispositivo dominante è quella degli Head Mounted Display, i quali consentono una elevata mobilità e un veloce allineamento del punto di vista dell'osservatore con la scena proiettata, anche se stanno guadagnando sempre più spazio sulla scena degli apparecchi per la visualizzazione i dispositivi mobili con schermi ad alta definizione quali smartphone, cellulari o tablet.

Il terzo processo base è il rendering, che riguarda la sovrapposizione degli elementi virtuali alle immagini reali. Le proprietà che caratterizzano tale processo sono la velocità di aggiornamento delle immagini prodotte e la capacità di produrre immagini fotorealistiche.

Velocità di aggiornamento e qualità dell'immagine prodotta sono proprietà in opposizione, infatti cercare un sistema efficiente per la velocità di aggiornamento dell'immagine prodotta significa rinunciare a tecniche di rendering più sofisticate con un conseguente peggioramento della qualità delle immagini da sovrapporre. Passando dal livello più basso dei processi delle ap-

plicazioni AR al livello superiore si arriva al processo interattivo, ovvero un sistema che dia la possibilità di interagire con gli elementi virtuali. Tale processo, ove presente, necessita di strumentazione sviluppata ad hoc. In tal senso sensori, sistemi di tracciamento della posizione e accelerometri consentono di estendere l'interazione con la scena anche ad altri sensi, oltre a quello visivo, e come sarà illustrato nelle sezioni successive anche di creare e manipolare oggetti virtuali puntando agli oggetti reali presenti nella scena.



Nell'immagine la sezione, dell'applicazione ufficiale del Comune di Montepulciano, che permette al visitatore di accedere in loco, ai contenuti in Realtà Aumentata.

8.2.1 Il Tracking

La corretta sovrapposizione di oggetti virtuali a immagini reali è uno dei requisiti fondamentali per le applicazioni di AR, come spiegato precedentemente. Gli elementi virtuali devono essere accuratamente sovrapposti e scalati in tutte le loro dimensioni. In questo ambito è fondamentale non solo disporre di una corretta registrazione quando l'utente è fermo, ma anche quando si trova in movimento rispetto alla scena. A tale scopo è indispensabile che sia l'orientamento che la posizione dell'osservatore siano rilevate in tempo reale; nel caso specifico devono essere rilevati l'orientamento e la posizione della testa.

Per un buon funzionamento del tracking nei sistemi AR, devono essere soddisfatti almeno i seguenti requisiti:

- accuratezza di misura, sia per l'inclinazione che per la posizione;
- sufficiente velocità di acquisizione (minimo 30 Hz);
- buona mobilità dell'utente (evitare il più possibile cavi o spazi di lavoro ristretti).

Nello sviluppare i sistemi di tracking sono stati seguiti diversi approcci, ognuno dei quali presenta caratteristiche positive e negative in funzione dell'utilizzo previsto.

Una buona strategia consiste nell'integrare sistemi diversi affinché i limiti di un sistema vengano compensati dalle qualità di un altro.

Di seguito vengono presentati quattro approcci diversi al problema del tracking:

- il tracking inerziale;
- il tracking acustico;
- il tracking magnetico;
- il tracking ottico;

Il tracking inerziale utilizza giroscopi e accelerometri per determinare la posizione e l'orientamento nello spazio dei dispositivi di misura.

Le misure derivanti da tali dispositivi non forniscono

una misura diretta della posizione e dell'orientamento ma necessitano di una fase di elaborazione. Le misure delle accelerazioni devono essere integrate due volte per ricavare i parametri cinematici dell'oggetto da tracciare. Tale processo è soggetto al problema della deriva, che conduce a frequenti calibrazioni dell'apparecchiatura. Una caratteristica positiva di questo metodo di tracciamento è che non viene influenzato da eventuali interferenze magnetiche; inoltre esso non pone restrizioni sulle dimensioni dell'ambiente di funzionamento, anche se non risulta molto accurato per piccoli spostamenti.

I sistemi di tracciamento acustici si basano sull'emissione di onde sonore: indicativamente hanno lo stesso funzionamento dei radar. Se viene utilizzata una sola coppia trasmettitore-ricevitore, si riesce a rilevare la distanza tra il punto da tracciare e un punto fisso.

Per ottenere i dati relativi alla posizione nello spazio è necessario avere un trasmettitore e tre ricevitori o viceversa, cioè, tre trasmettitori ed un ricevitore. In questo tipo di sistemi la distanza viene calcolata utilizzando la lunghezza d'onda e i dati rilevati inerenti al tempo di risposta. I pregi di questi sistemi sono la leggerezza e l'indipendenza da disturbi dovuti ad interferenze magnetiche, essendo le onde acustiche immuni da tali problematiche. Al contrario questi dispositivi subiscono le interferenze acustiche. Inoltre l'accuratezza delle misure è correlata alle condizioni ambientali, essendo la velocità di propagazione delle onde acustiche dipendente dalla densità dell'aria nella quale viaggiano.

Un ulteriore difetto non poco importante è l'impossibilità di avere una rilevazione dei dati precisa se tra trasmettitore e ricevitore si interpone un qualsiasi oggetto, riducendone così l'affidabilità.

Il tracking magnetico si basa sulla misura del campo magnetico e utilizza sia onde a bassa frequenza che pulsate. È composto da un ricevitore e da un trasmettitore. I dati

delle misure vengono elaborati per calcolare la posizione e l'orientamento del ricevitore rispetto all'emettitore. A differenza di altri dispositivi di tracciamento, quello magnetico non subisce i problemi di occlusione emettitore-ricevitore.

I principali svantaggi connessi all'impiego di questa tecnologia riguardano la sensibilità alle interferenze magnetiche causate da onde radio e superfici metalliche. Infine l'accuratezza di misura diminuisce con l'aumentare della distanza tra emettitore e ricevitore. L'intensità luminosa viene sfruttata dagli apparecchi di tracking ottici per calcolare la posizione degli oggetti nello spazio reale.

Ogni punto del mondo reale riflette o genera luce, sfruttando la legge fisica per cui l'energia del raggio di luce diminuisce con il quadrato della distanza, si può stimare la posizione del ricevitore/emettitore misurando tale energia. Come ricevitori si possono utilizzare sensori CCD (Charged Coupled Device) per il calcolo della posizione di elementi passivi o fotodiodi laterali per la determinazione di elementi attivi.

Esempi tipici di dispositivi passivi sono i marker e di dispositivi attivi i led. Nella categoria dei sistemi di puntamento ottici rientrano i sistemi di riconoscimento dell'immagine che utilizzano algoritmi di grafica computazionale per elaborare immagini, contenenti gli og-



Nell'immagine spiegazione esemplificazione dell'accesso ai contenuti in AR. Infatti al visitatore, basterà inquadrare con il suo dispositivo mobile, il monumento e cliccare un'icona che permetterà l'accesso al contenuto testuale.

getti da seguire, e calcolarne la loro posizione rispetto al punto di vista della camera sulla scena. Il sistemi di tracking di tipo ottico assicurano velocità di elaborazione adeguate e non pongono limiti sullo spazio di osservazione. Per contro sono sensibili alla maggiore o minore visibilità degli oggetti da osservare e all'intensità della luce.

L'analisi dei dispositivi di tracking finora svolta evidenzia, per ciascun sistema, limiti e qualità. Una scelta vincente potrebbe essere quella di combinare diversi dispositivi in modo tale che le caratteristiche positive di ciascuna tecnica migliorino e rendano le mancanze degli altri metodi ininfluenti nel calcolo finale del tracciamento.

Sebbene questa appaia una tattica vincente, l'interazione di più strumenti accresce la complessità dei sistemi e inevitabilmente rende più complicata la gestione e il controllo dell'applicazione. Inoltre le tecnologie illustrate sono state sviluppate per ambienti chiusi, ovvero per ambienti limitati facilmente controllabili.

L'utilizzo dei sistemi di tracking per applicazioni in ambienti aperti avviene in una situazione diametralmente

opposta: gli ambienti aperti sono fuori controllo e richiedono la mobilità della strumentazione.

Infine è necessario considerare il processo di tracking per applicazioni di AR anche nell'ambito del design collaborativo, dove ciascun utente deve poter interagire autonomamente con lo scenario condiviso. In questo ambito occorre sviluppare applicazioni server in grado di gestire coerentemente il processo di tracking per più utenti e strumenti.

Per il tracking in ambienti aperti non si utilizzano marker o sensori installati sul dispositivo o sulla scena, bensì si usa un tracciamento tramite GPS (Global Positioning System) per individuare il punto in cui si trova l'utente e si utilizzano sensori quali giroscopio e bussola digitale per capire l'orientamento della camera.

Stabilita la posizione e la direzione dell'utente si scaricano da una connessione Internet i punti di interesse, sempre calcolati tramite GPS per luoghi aperti molto ampi, altrimenti tramite riconoscimento delle immagini.



Nel progetto MONTEPULCIANOtour, l'accesso ai contenuti ipertestuali, avviene attraverso tre diverse modalità: attraverso l'app ufficiale, attraverso i qr code in loco e attraverso il sito web dedicato, in remoto.

8.2.2 I display

I sistemi di visualizzazione finora sviluppati per le applicazioni di AR sono raggruppabili in tre categorie:

- Head mounted display: sono dispositivi indossati direttamente sulla testa dall'osservatore, come occhiali o caschi.
- Hand held displays: sono i visualizzatori da tenere in mano, tipo palmari e cellulari.
- Spatial displays: sono dei dispositivi fisici sui quali vengono proiettate le immagini, come gli ologrammi che spesso vengono utilizzati per applicazioni destinate ai musei.

Gli Head Mounted Display sono i visori più efficaci e pratici, grazie alla sensazione di immersione che garantiscono all'utente, e sono indicati con l'acronimo HMD. Per questi dispositivi si distinguono tre metodi differenti di implementazione in funzione dei dispositivi impiegati per la visualizzazione della scena. I display che utilizzano piccoli visori ottici sono denominati Head Mounted Projector e sono di due tipi:

- optical See Through
- video See Through.

Rientrano nella categoria anche i cosiddetti retinal display che utilizzano i laser per generare i contenuti sintetici da visualizzare.

I dispositivi Optical See Through utilizzano un visore di fascio ottico, consistente in uno specchio traslucido che trasmette la luce in una direzione e contemporaneamente la riflette nell'altra. Si basa su una tecnologia parzialmente trasmittente che permette di guardare contemporaneamente l'immagine virtuale sovrapposta alla vista reale.

Tali visori sono molto simili agli Head Up Display utilizzati dai piloti degli aerei dell'aviazione militare. Una peculiarità di questi sistemi è che riducono l'intensità di luce fino al 30%.

I visori di tipo Video See Through usano invece due



Tre tipologie differenti di visori per la AR.

Sara Bua



Nell'immagine accesso ai contenuti ipertestuali, attraverso la navigazione virtuale del modello tridimensionale.

telecamere, una per ciascun occhio, con le quali acquisiscono le immagini del mondo reale, queste vengono inviate per l'elaborazione al video compositor che le proietta sui display, uno per ciascun occhio, arricchite dalle informazioni opportune. La scelta di un dispositivo di questo genere consente di realizzare effetti grafici più complessi rispetto ai visori di tipo optical see through. Tale tecnologia impone la messa a fuoco della camera su tutta la scena rendendo nitidi alcuni oggetti e sfocate altre parti dell'inquadratura, caratteristica che ne limita il comfort.

Gli hand held display sono dispositivi portatili quali palmari (PDA), cellulari, smartphone, display a specchio e video proiettori. Tali dispositivi sebbene efficaci dal punto di vista della portabilità presentano alcuni limiti: essendo dei dispositivi che si tengono in mano il



Nell'immagine, l'interfaccia del modello tridimensionale del centro storico del Comune di Montepulciano. All'interno dell'interfaccia, davanti ad ogni punto di interesse, un cubo permette l'accesso ai contenuti ipertestuali. Il cono invece permette di accedere alla navigazione di ambienti interni del modello. Una key map del modello, permette virtualmente di teletrasportare il visitatore in altri punti di interesse all'interno della navigazione, inoltre una pallina rossa indica la posizione del visitatore all'interno del modello.

tracciamento viene fatto rispetto al dispositivo e non rispetto a dove realmente l'utente sta guardando e le piccole dimensioni del display permettono di variare poco l'angolo di vista.

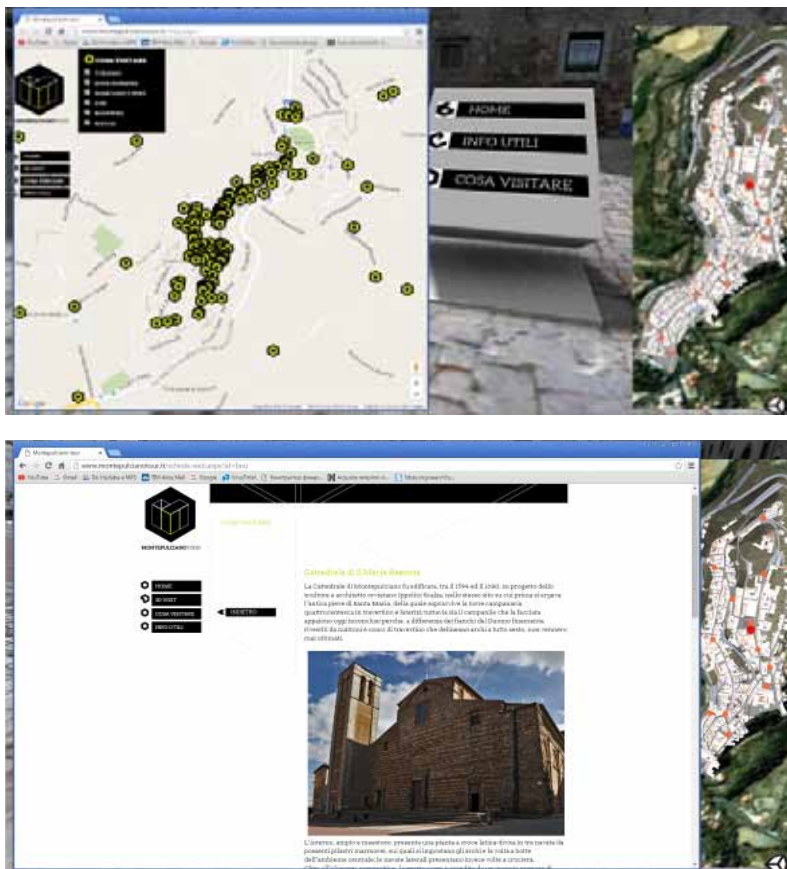
A differenza dei dispositivi appena visti, i display di tipo spaziale non richiedono all'utente di indossare alcuna strumentazione. L'apparecchiatura è in questo caso installata direttamente nell'ambiente oggetto dell'osservazione. Questa tecnologia di visualizzazione prevede tre tipi differenti di visualizzatori: dispositivi Video See Through; dispositivi Optical See Through; dispositivi diretti.

I dispositivi di tipo see through utilizzano una videocamera per l'acquisizione e una configurazione PC di tipo desktop; le immagini aumentate vengono proiettate direttamente sul monitor del PC. Tali dispositivi utilizzano combinatori ottici posizionati nell'ambiente,

in grado di generare immagini allineate con il punto di vista dell'osservatore.

In ambito dei beni culturali le applicazioni di realtà aumentata si concentrano sull'utilizzo di dispositivi mobili, quali smartphone, cellulari e tablet. La maggior parte di tali applicazioni hanno l'obiettivo di fornire all'utente informazioni, come indicazioni stradali o dati riguardanti punti di interesse. Un esempio di applicazione di questo genere è MONTEPULCIANOTour, si tratta di una piattaforma web e un'applicazione per smartphone che fornisce vari livelli di informazioni rispetto al luogo in cui ci si trova e si sta inquadrando, all'interno del centro storico di Montepulciano.

Questo tipo di applicazioni necessitano, però, di un sistema di geolocalizzazione e di una connessione ad Internet per poter scaricare i dati relativi ai luoghi sui quali si vogliono avere informazioni aggiuntive.



*All'interno della visita virtuale, il fruitore, trova dei totem informativi, che gli permettono di accedere ai contenuti, non solo culturali ma anche commerciali.
Nell'immagine in basso una delle schede informative.*

8.3 Scenari virtuali per la conservazione, valorizzazione e divulgazione della conoscenza: il caso di Montepulciano

Il progetto di ricostruzione tridimensionale ha rappresentato un momento di verifica e approfondimento degli studi sin qui condotti sul borgo medievale di Montepulciano¹.

Dal rilievo alla modellazione le fasi progettuali hanno riguardato l'analisi, la raccolta e la selezione dei dati fotografici, la modellazione 3D, la grafica delle texture e la redazione di contenuti informativi. Questo progetto di ricerca si è prefissato il duplice obiettivo di proporre ai visitatori, remoti e non, itinerari di fruizione (fissa e mobile) capaci di sovrapporre alle architetture reali una serie di informazioni in modalità virtuale.

Tali informazioni sono capaci di accompagnare il visitatore nella conoscenza del territorio e della città, colmando con il minimo impatto ambientale il gap tra percezione visiva e conoscenza.

Il progetto mette a disposizione del visitatore contenuti multimediali contestualizzati consultabili in qualsiasi luogo e momento nel quale la fruizione stessa possa avere significato, prima di tutto durante la visita del borgo, ma anche in altri momenti e territori, lontano dalla città. In questo secondo caso molte sono le opportunità a disposizione per la "visita" del borgo, infatti possono essere predisposti ambienti opportunamente attrezzati



Nell'immagine sopra, vista renderizzata di una delle porte di accesso del centro storico di Montepulciano. A sinistra una foto dello stesso punto di vista.

per una fruizione più immersiva, oppure in viaggio, a scuola o a casa utilizzando un normalissimo pc.

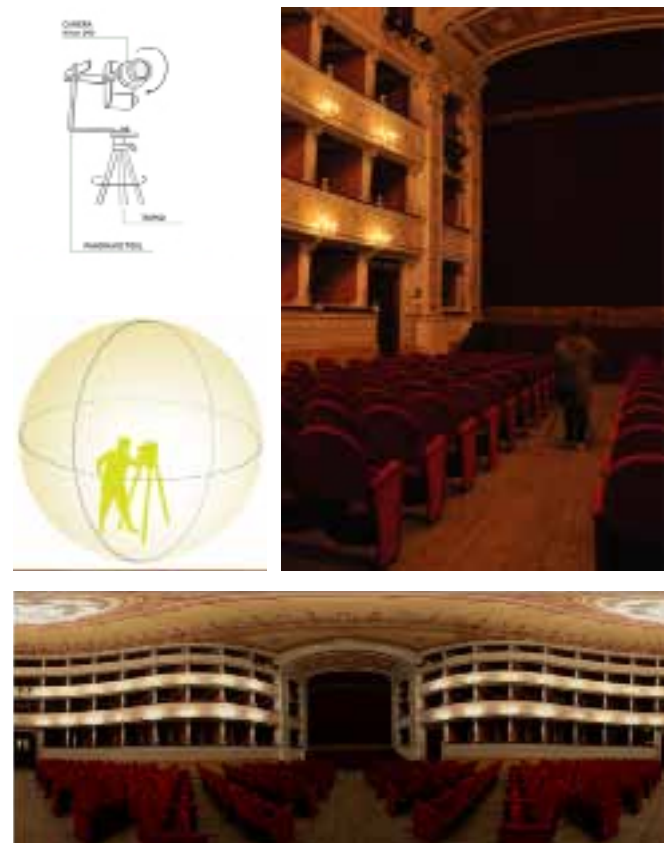
La fruizione del borgo medievale attraverso l'utilizzo di dispositivi mobili quali palmari, smartphone, laptop e tablet acquisisce, invece, il duplice ruolo di guida virtuale della città, attraverso itinerari culturali, e guida virtuale all'identificazione dei servizi commerciali presenti sul territorio.

La fase finale del progetto si è composta di diversi step necessari alla realizzazione del prodotto finale. In un primo momento il lavoro si è concentrato sulla definizione dell'infrastruttura tecnica che ha permesso la fruizione secondo due diverse possibilità: fruizione mobile, in locale, geolocalizzata (tramite i sistemi operativi iOS e Android) e fruizione da postazione fissa, in remoto attraverso la visita del modello 3D (utilizzando i browser più diffusi: Google Chrome, Mozilla Firefox ed Internet Explorer).

Realizzata questa infrastruttura è stato necessario sviluppare il layer informativo che riporta tutti gli approfondimenti relativi ai punti di interesse ed infine il potenziamento della copertura WiFi dell'intero borgo medievale che l'Amministrazione Comunale ha messo alla base di tutto lo sviluppo tecnologico-infrastrutturale.

La sinergia tra l'Università e le aziende locali QRSIT e IDEM UP ha assunto un ruolo fondamentale per la realizzazione dell'intero progetto infatti l'azienda QRSIT che dispone di una piattaforma informatica in grado di raccogliere informazioni attraverso un CMS (Content Management System), si è occupata della gestione dei contenuti e del potenziamento della rete WiFi. Questo sistema infatti ha permesso al gruppo di ricerca dell'Università che ha lavorato sulla piattaforma tridimensionale e sui contenuti e a IDEM UP che invece si è occupata della realizzazione della prima App ufficiale del Comune "HELLO M-UP!" e dello sviluppo dell'aggiornamento dell'App "MONTEPULCIANOtour" di aggregare informazioni e media (modelli 3D, testi, foto statiche, panoramiche a 360°, video, audio) e di riferirli ad una particolare posizione georeferenziata.

Tali informazioni sono accessibili interrogando la banca dati in forme diverse a seconda del dispositivo e del



Un'altro contenuto, per la navigazione del centro storico, è costituito dalle foto panoramiche a 360°, ad alta definizione, realizzate per tutti i monumenti del centro storico.

luogo di utilizzo.

In remoto sono consultabili da pc secondo due modalità, ovvero una navigazione classica del sito e una navigazione virtuale del modello; da dispositivo mobile, invece, sono fruibili in qualsiasi parte del mondo, consultando in modo classico l'App "MONTEPULCIANOtour". Durante la visita a Montepulciano sono consultabili secondo due modalità: accendendo alla sezione "inquadra e clicca" dell'App, dove il visitatore potrà utilizzare la "realtà aumentata" per accedere alle informazioni e attraverso la scansione dei QR Code posizionati sul territorio (sia in ambienti esterni sotto forma di cartellonistica posizionata accanto al sito di interesse, sia all'interno dei siti sotto forma di targhe posizionate in prossimità delle opere d'arte).

L'utente, infatti, potrà navigare virtualmente il borgo, conoscendone la storia, i punti di interesse e le attrazioni, anche quando non fisicamente sul posto; ad esempio dal proprio computer ubicato ovunque nel mondo, o attraverso totem interattivi posizionati nelle principali fiere o occasioni congressuali e di promozione turistica. Allo stesso tempo, l'utente fisicamente presente a Montepulciano avrà a disposizione sul proprio dispositivo mobile una guida interattiva che lo accompagna nella visita del borgo, indirizzandolo su percorsi tematici diversi e guidandolo attraverso la scoperta di punti di interesse culturale e commerciale.

Il dispositivo mobile dotato di Sistema di Posizionamento Globale (GPS) e di collegamento internet (WiFi gratuito messo a disposizione dell'amministrazione) permettere la visualizzazione dei dati in tempo reale,

sovrapposti al flusso video proveniente dalla fotocamera integrata dello smartphone. Quindi, l'utente inquadra l'ambiente circostante e all'inquadratura del mondo reale vengono sovrapposti i livelli di contenuto, dai Punti di Interesse (PDI).

All'interno di scenari costruiti virtualmente che ricreano spazi reali, sono inseriti contenuti audio, video, 3D. L'utente, sfruttando applicativi di tipo RIA (Rich Internet Application), ha una veloce e fluida interazione con i modelli digitali che veicolano informazioni geometriche, formali e di superficie caratteristica dei modelli stessi, oltre che contenuti relativi a informazioni testuali, numeriche e iconografiche, che riguardano la storia, lo stato di fatto di un determinato oggetto sia a scala urbana che architettonica.



Viste del modello tridimensionale texturizzato, del centro storico di Montepulciano.

8.4 La modellazione tridimensionale per il restauro e la lettura critica di Beni Culturali

Un'altro *Output* della documentazione digitale è la restituzione del bene culturale ai fini della conoscenza e della lettura critica.

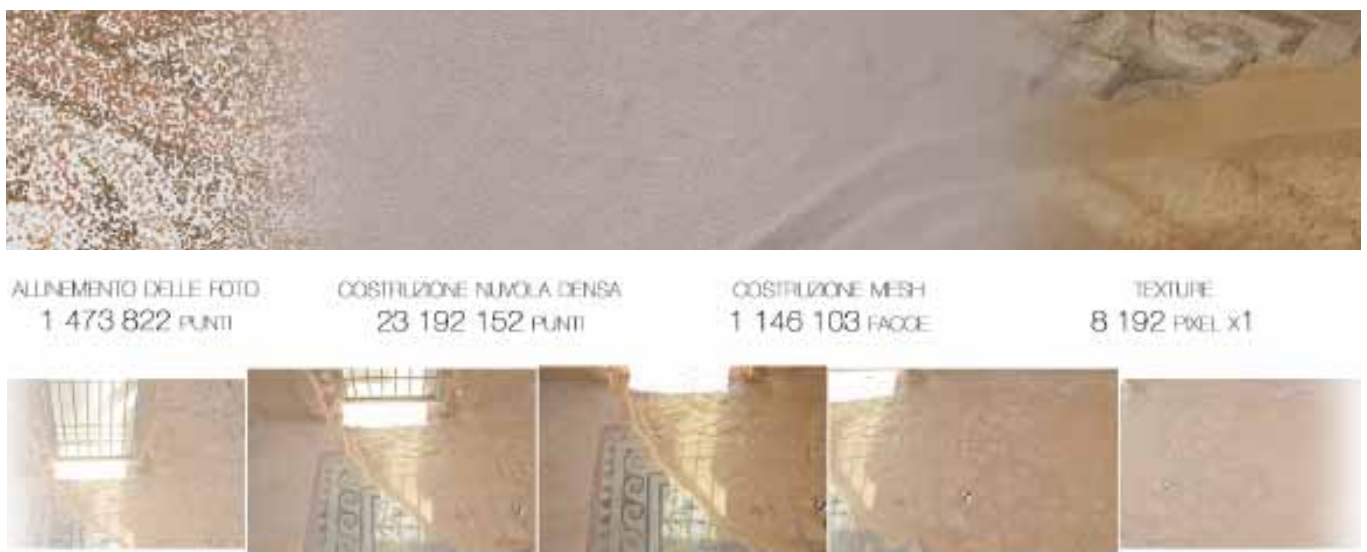
L'indagine condotta sul sito di Masada ha come obiettivo la lettura critica della qualità dei resti archeologici nella loro interezza studiando, oltre alla morfologia, il carattere e le modalità costruttive che sono sempre indicative di qualche significativa scelta storico-artistica o semplicemente tecnico-costruttiva.

Ai fini della documentazione per il restauro, la tecnologia laser scanner 3D ha permesso di acquisire una grande quantità di informazioni metriche e morfologiche che correttamente interpretate si sono rivelate una base grafica indispensabile nella lettura di dissesti strutturali che difficilmente sarebbe stato possibile rilevare con i tradizionali strumenti e nella lettura di degradi sull'intonaco e sui mosaici presenti sul sito.

8.4.1 I mosaici del Palazzo Occidentale di Masada

All'interno del Palazzo Occidentale di Masada vari mosaici sono stati realizzati con la tecnica dell'*opus tessellatum* a testimonianza della forte influenza romana che possiamo ritrovare nelle architetture erodiane.

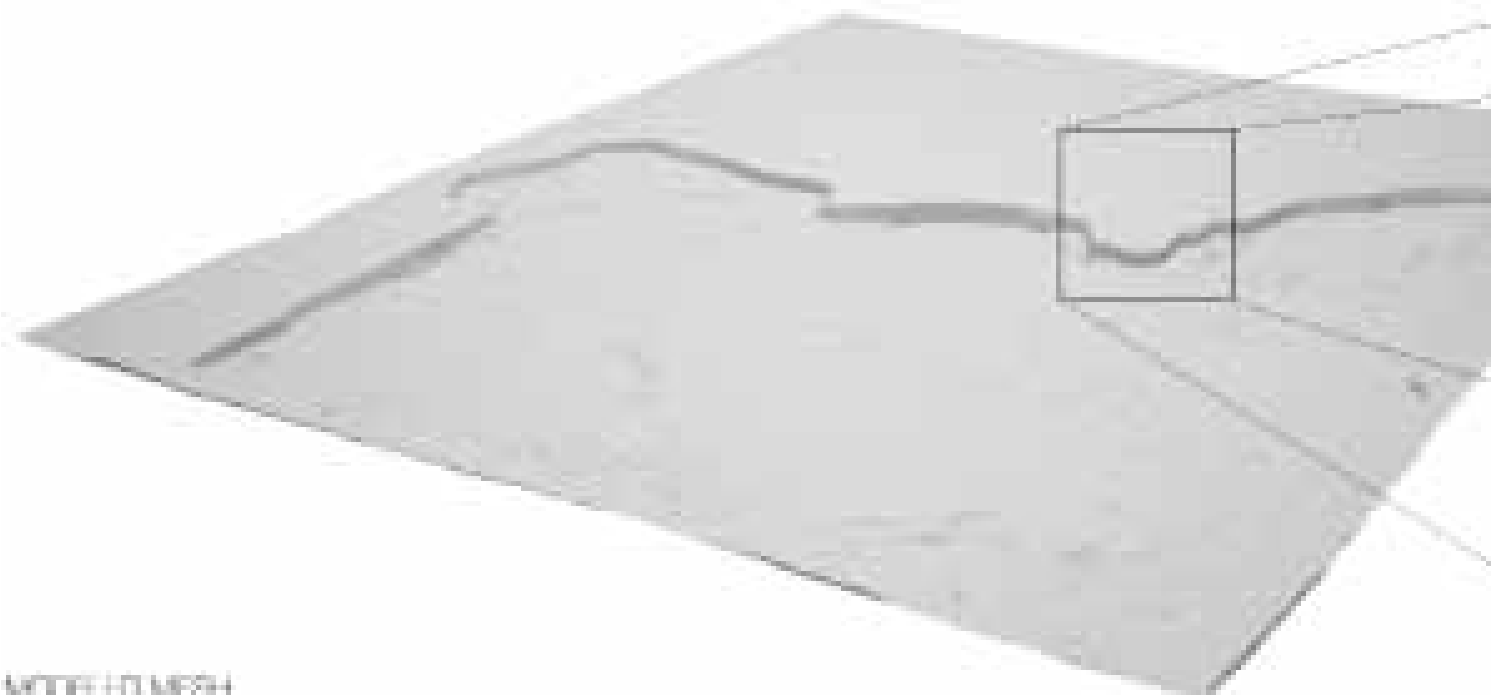
Uno studio più approfondito ha interessato il mosaico dell'ala dei bagni caldi ed il mosaico di ingresso alla Sala del Trono. Analizzando le composizioni ed i motivi geometrici risulta evidente come si segua perfettamente quelli che sono i canoni della tradizione greco-romana. Nei mosaici rilevati nel Palazzo Occidentale dopo una attenta ricostruzione tridimensionale, realizzata interamente attraverso rilievo fotogrammetrico e orientamento attraverso rilievo laser scanner, della geometria e dell'aspetto materico, si è passati alla ricerca della "misura" che avrebbe dovuto regolare la composizione dei mosaici e ne è risultato che il modulo utilizzato è quello del "cubito reale egizio", cioè 52 cm.



Processo di elaborazione dei dati.



MODELLI DI TEXTURE

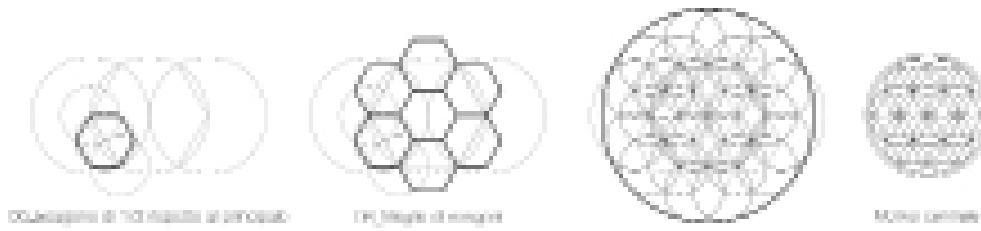


MODELLI DI MESH

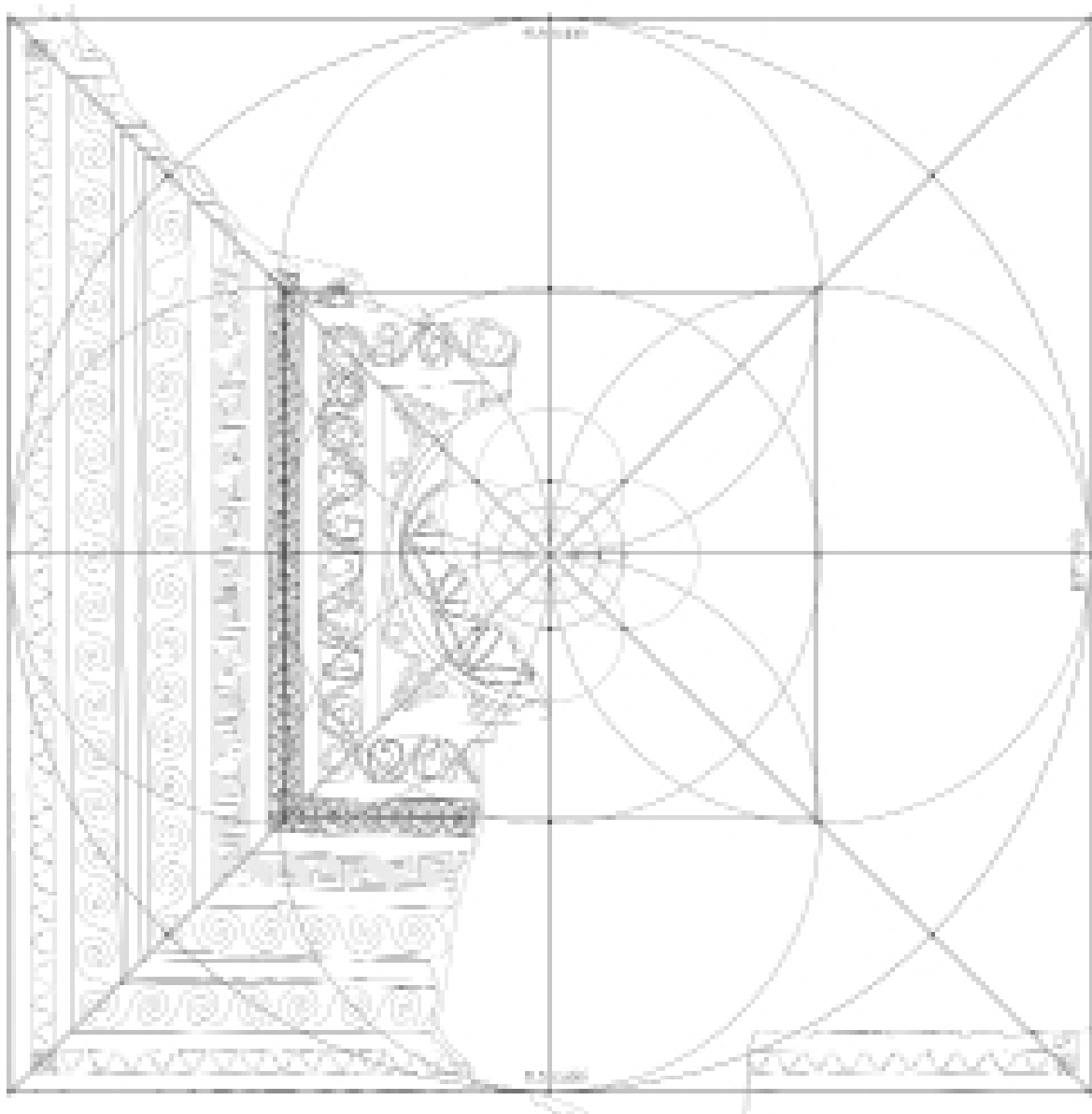


Modello texturizzato e modello neutro del mosaico all'ingresso della Sala del Trono del Palazzo Occidentale di Masada.





Ricostruzione ipotetica, del mosaico situato all'interno del Palazzo Occidentale, a Masada.



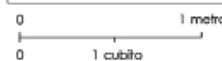
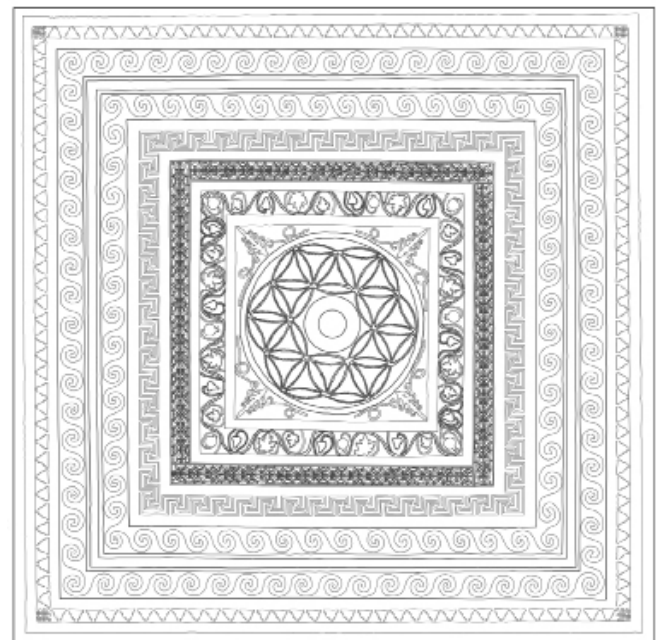
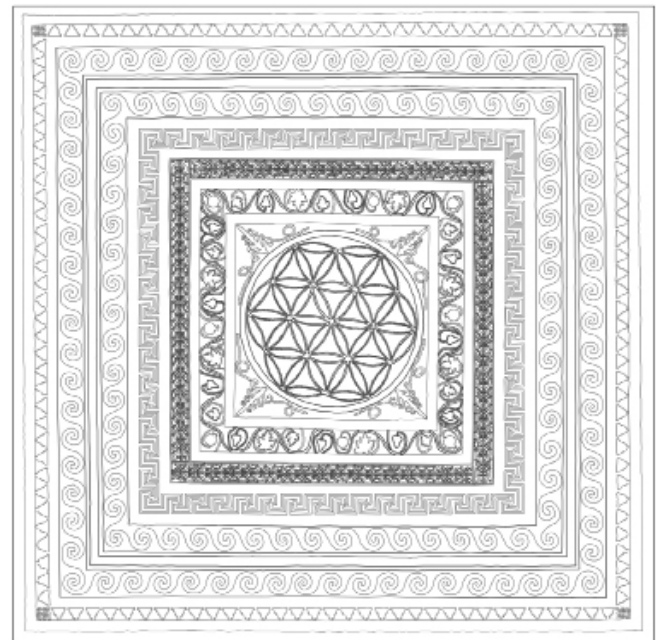
Nell'ingresso alla Sala del Trono il mosaico risulta di 6 cubiti e mezzo per 6 cubiti e mezzo e le cornici concentriche e le singole decorazioni geometriche continuano a seguire il modulo originario. Stessa cosa vale per il mosaico dei bagni caldi all'interno del nucleo centrale del palazzo che risulta essere un quadrato con lato di 3 cubiti.

Nell'antichità le misure lineari erano in relazione al corpo umano e nel Vicino Oriente l'unità fondamentale era il cubito che rimase il sistema di misura più utilizzato nel mediterraneo in tutto il periodo antico fino all'epoca romana quando venne sostituito dal piede. Il cubito è un'unità di misura ricavata misurando la distanza che intercorre tra il gomito e la punta del dito medio a mano aperta. Due cubiti formano un braccio, due braccia una tesa. Il palmo è invece un sesto di cubito, mentre un ventiquattresimo di cubito è il dito. Essendo un'unità di misura utilizzata per vari secoli e da vari popoli la lunghezza del cubito tende a variare. Presso i Sumeri, ad esempio, il cubito era di 49,5 cm. In epoca egiziana il cubito reale misurava 52 cm, mentre il cubito punico 51,4 cm. Il cubito ebraico, infine, misurava 44,45 cm. Nel mondo greco e romano l'unità fondamentale divenne il piede che mantenne un rapporto metrologico con il cubito il quale risulta essere pari a un piede e mezzo. In conclusione, si evidenzia come il rilievo ai fini del restauro e della ricostruzione, se pur in questo caso virtuale, costituisca una procedura fondamentale per la conoscenza.

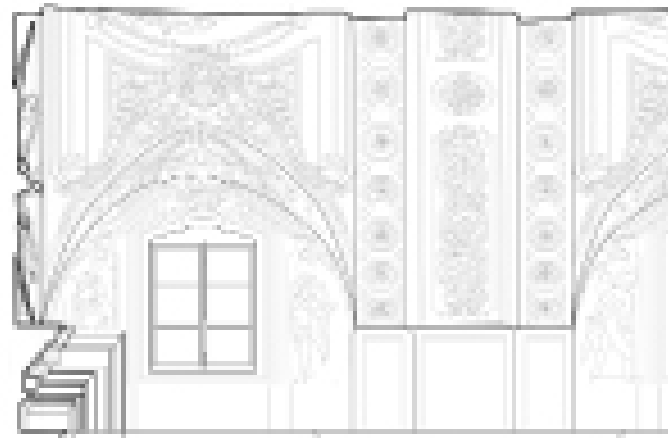
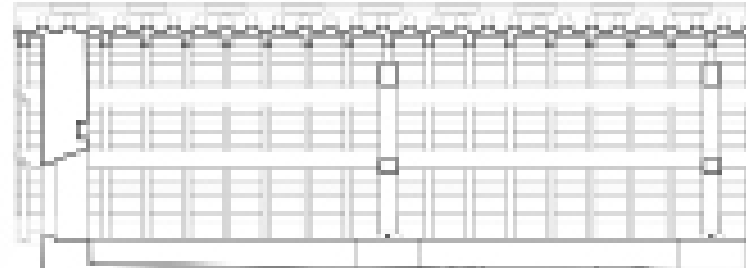
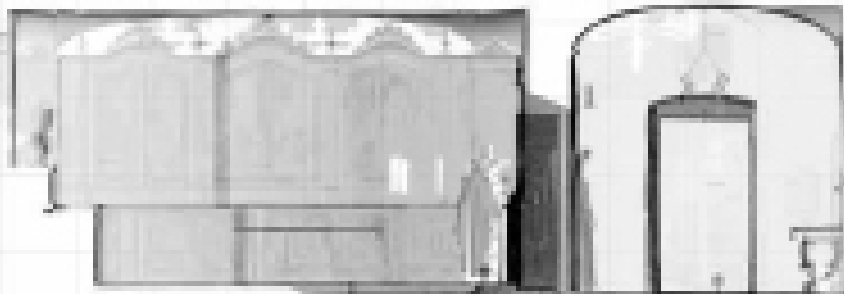
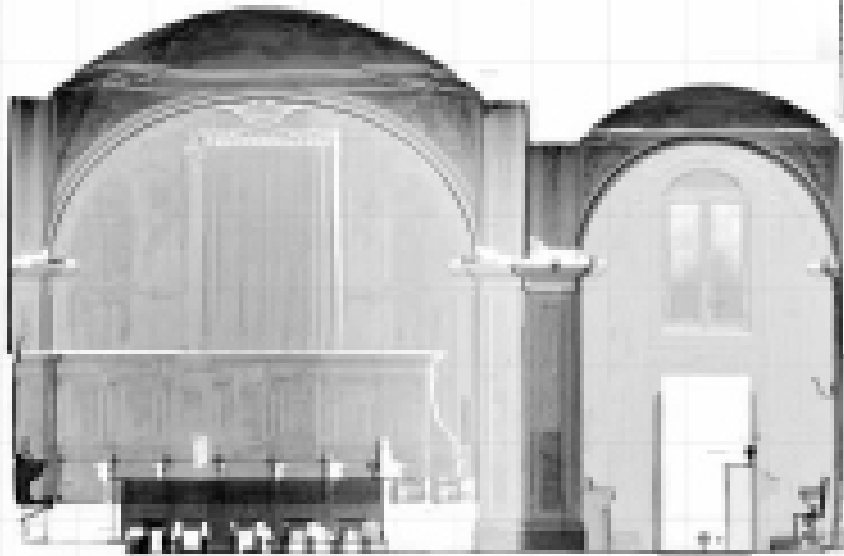
In tal modo, rilevare non è solo un operazione metrica e di conoscenza materica dell'oggetto architettonico, ma si espande in modo multidisciplinare intrecciandosi con la ricerca storica, avvalorandone o smentendone le teorie e le interpretazioni in maniera scientifica riducendo il più possibile interpretazioni soggettive. Il rilevatore misura lo spazio che lo circonda, raccoglie dati materici, morfologici e documentari individuando il corretto modo di esplicitarli in una rappresentazione che risponde alla finalità specifica del progetto di restauro.

Note

1. Bertocci, Bua, Parrinello, Picchio, 2014.



Nelle immagini, due possibili ricostruzioni della parte centrale del mosaico, andata completamente perduta.





CONCLUSIONI

Conclusioni

Il processo di rilievo e documentazione di un bene culturale, passa attraverso varie tappe: quella della ricerca e della conoscenza in *primis* e successivamente quella della tutela e valorizzazione; a queste si aggiungono altre componenti, non meno determinanti per la conservazione, da cui non si può prescindere; diventa cioè indispensabile cercare di rendere il bene visibile e riconoscibile nei suoi tratti attuali e quotidiani, non solo per una fruizione specialistica, ma anche e soprattutto per un pubblico di massa. Questa esigenza comporta la necessità di ricostruire l'esegesi del monumento, per rendere più immediata e accessibile la comprensione di quanto celato dalle rovine e dalle architetture.

Grazie alle esperienze condotte durante lo svolgimento del Dottorato, sono stati analizzati nella tesi diversi aspetti relativi alle moderne tecniche di rilevamento nel settore dei Beni Culturali, con particolare riguardo per la fotogrammetria digitale ed il laser a scansione terrestre; gli aspetti esaminati sono relativi soprattutto al momento dell'acquisizione del dato metrico ed alle modalità di modellazione e rappresentazione, e sono stati documentati nel lavoro con la discussione di casi di studio opportunamente scelti.

Riguardo alla fotogrammetria, si è ritenuto in primo luogo interessante un approfondimento sulle caratteristiche costruttive e tecniche dei sensori montati sulle comuni camere digitali a medio/basso costo; le sperimentazioni condotte hanno evidenziato alcune problematiche direttamente connesse con la calibrazione di questa tipologia di camere, come ad esempio il processo di formazione delle immagini a colori RGB.

All'interno di un'analisi sulle possibilità offerte dall'avvento del digitale in ogni ambito del processo fotogrammetrico, si è data particolare enfasi ai dispositivi speciali per l'acquisizione richiesti in questo campo applicativo, descrivendo in particolare un sistema di acquisizione a

bassa quota per il rilievo di aeree archeologiche; questo sistema, basato su droni che sostengono una fotocamera, ha mostrato grandi potenzialità sia in termini di risultati ottenuti che per le sue caratteristiche di maneggevolezza, relativo basso costo e flessibilità d'uso. Le sperimentazioni effettuate hanno evidenziato anche le difficoltà connesse con l'utilizzo di questo tipo di piattaforme, molto sensibili alle condizioni ambientali.

Per quanto riguarda in particolare la fotogrammetria close-range, in cui negli ultimi anni si sta assistendo ad una vera esplosione di tecniche e sperimentazioni, l'analisi degli approcci perseguibili per il rilievo di edifici, strutture e oggetti, ha evidenziato che, l'utilizzo sempre più spinto di camere digitali a medio-basso costo per l'acquisizione diretta delle immagini, pone di primaria importanza la problematica della calibrazione. Infatti, il raggiungimento di un'elevata accuratezza geometrica nella restituzione presuppone che sia realizzata la calibrazione completa della camera, determinando quindi non solo la focale (della quale un valore approssimato è in genere oggi memorizzato all'interno della struttura file), ma anche i parametri che permettono di compensare gli errori sistematici.

Per quanto riguarda il laser a scansione terrestre applicato al settore dei Beni Culturali, sono state analizzate le fasi operative del rilievo e del data processing; risulta evidente la velocità di acquisizione che questo tipo di strumenti consente, insieme con l'enorme quantità di dati che è possibile generare, ma si è confermata, soprattutto a causa della geometria spesso complessa degli oggetti rilevati, la necessità di un pesante intervento dell'operatore nella gestione dei dati acquisiti, con la conseguente esigenza di lunghi tempi di elaborazione e di software capaci di gestire la modellazione di superfici irregolari.

La seconda parte della ricerca si è incentrata sulla re-

stituzione, sulla rappresentazione e sulla modellazione delle superfici. Le sperimentazioni condotte sulla generazione di prodotti raster come fotoraddrizzamenti e ortofoto hanno evidenziato la loro importanza nella documentazione dei Beni Culturali, ma anche la necessità, in contesti come quelli esaminati in cui gli oggetti hanno geometria complessa, di trovare nuove soluzioni, che coniughino l'elevata accuratezza geometrica con la possibilità di uno studio flessibile, interattivo e su più livelli dell'oggetto. Esempi interessanti sono costituiti soprattutto dai modelli tridimensionali foto-realistici, che stanno divenendo sempre più importanti e diffusi in questo settore.

Le sperimentazioni condotte sulla correlazione d'immagini con un software commerciale hanno evidenziato l'importanza che l'algoritmo di matching ha nella generazione di Modelli Digitali delle Superfici, adatti allo scopo dell'ortorettifica di immagini e della modellazione tridimensionale; in particolare si è evidenziato che nei software commerciali, nonostante l'elevato livello di automazione raggiunto, è sempre necessaria una fase di post-editing del modello creato, con l'introduzione di numerose breaklines, soprattutto al fine della generazione di una corretta ortofoto. Per quanto riguarda invece la generazione di modelli tridimensionali, si è constatato che, soprattutto nel campo del close-range, gli algoritmi area - based ai minimi quadrati implementati nei software commerciali non sono talvolta sufficienti alla generazione di nuvole di punti che permettano la creazione di modelli tridimensionali image-based corretti e accurati.

In questo campo il laser a scansione si dimostra sicuramente il prodotto vincente in termini di capacità di ricostruzione della geometria completa dell'oggetto, ma le prove effettuate con un software dedicato riguardo alla modellazione di oggetti di interesse archeologico dimostrano che la fotogrammetria permette di raggiungere risultati assolutamente paragonabili in termini di accuratezza e precisione nella rappresentazione dei dettagli morfologici, con in più la possibilità di un'acquisizione del dato più semplice, più veloce e più economica.

Ciò che appare fondamentale sottolineare è la ricchezza che un approccio integrato fra le due tecniche può

portare, in termini di maggiore accuratezza e leggibilità dei prodotti finali; la fotogrammetria può aiutare la comprensione del dato laser e facilitare la pulitura del rumore e di quei dati che non possono essere eliminati in modo automatico dal software; la possibilità di texturizzare il modello con una foto orientata dell'oggetto permette dall'altra parte di unire dato metrico e descrittivo.

Il futuro delle scienze del rilevamento nel campo dei Beni Culturali risiede probabilmente in un approccio multidisciplinare e multi-tecnico; la fusione di dati provenienti da diverse tecniche (fotogrammetria, laser scanner, GPS), consentita in primo luogo dalla condivisione di un unico sistema di riferimento, permette la lettura e la comprensione di ogni oggetto di interesse non solo come oggetto isolato, ma nel contesto in cui esso si trova, approfondendone le possibilità di studio e comprensione.

La possibilità di utilizzare i modelli tridimensionali anche per scopi diversi dalla semplice documentazione e rappresentazione, come ad esempio per valutazioni di tipo strutturale o legate alla diagnostica dei materiali e allo stato di degrado, apre un'importante finestra sull'adozione nel close-range di metodi di *data fusion* e di analisi di immagine, affiancando all'informazione data dai sensori operanti nel campo ottico a quella derivante da altri, quali le camere termiche o in genere multispettrali, oppure gli strumenti del rilievo geofisico. Questo pone però numerose problematiche sia riguardo l'acquisizione, e quindi la calibrazione di questi sensori, sia riguardo il trattamento del dato; sono da valutare anche le possibilità di applicare in questo contesto tematiche come l'interpretazione e la classificazione automatica e semi-automatica congiunta di immagini e dati di altra natura.

A complemento di queste nuove opportunità, non va tralasciata la possibilità, certamente favorita dalle tecniche digitali, di adottare metodiche per il recupero a fini metrici della fotogrammetria d'archivio, per uno studio oggettivo e rigoroso delle trasformazioni che un oggetto ha subito nel tempo mediante l'utilizzo di foto storiche, opportunamente calibrate ed elaborate.

Infine, attraverso le applicazioni di modellazione tridi-

mensionale, la ricostruzione dell'architettura nei suoi tratti originali (soprattutto per i siti archeologici), sia pur virtuale, non è più un'utopia ma è diventata pratica attuale.

Le moderne tecnologie digitali consentono, infatti, di poter fruire di un oggetto architettonico riportandolo al passato nella completezza di strutture e apparati decorativi, avendo oltretutto la possibilità di approfondire delle tematiche e verificare delle ipotesi che un normale disegno bidimensionale non consentirebbe.

I contenuti scientifici scaturiti dai diversi progetti di ricerca, sono importanti e consistenti, composti innanzitutto dalla corposa mole di dati metrici, la visualizzazione in 3D di tutte le parti rilevate e le classiche rappresentazioni bidimensionali di piante, sezioni e prospetti. All'interno della complessità insita nella narrazione di un sito archeologico e architettonico, il progetto di comunicazione può nascere dalla definizione di un'interfaccia capace di offrire l'opportunità di interrogazioni tematiche, alcune individuabili anche grazie alle analisi comparative scaturite dal presente percorso formativo. Tale progetto può essere concepito quale strumento di riorganizzazione e razionalizzazione dei molteplici contenuti inerenti al luogo in oggetto, che potranno essere posti all'attenzione dei possibili fruitori anche online.

Bibliografia

I riferimenti bibliografici sono in ordine alfabetico. Sono utilizzate le seguenti abbreviazioni:

ISPRS: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing

ASPRS: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing

IAPRS: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing

CIPA: International Committee for Architectural Photogrammetry

SIFET: Società Italiana Fotogrammetria e Topografia

ASITA: Federazione delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e ambientali

BAR: British Archaeological Reports

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

PRS: Photogrammetry and Remote Sensing

SPIE: International Society for Optical Engineering

IS&T: Society for Imaging Science and Technology

AA. VV., "An addendum to the metric survey specifications for English Heritage – The collection and archiving of point cloud obtained by terrestrial laser scanning or other method". Sul sito web: www.english-heritage.org.uk

AA. VV. An addendum to the metric survey specifications for English Heritage – The collection and archiving of point cloud obtained by terrestrial laser scanning or other method.

Sul sito web: www.english-heritage.org.uk

Abdel-Aziz, Y. I. and Karara, H.M. Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry. Proceedings Symposium on Close-Range Photogrammetry, ASPRS, Falls Church, Virginia. 1971.

Akca, D. Grün, A. Least squares 3d surface matching. Proceedings IAPRS, Vol. 34(5/WG16), Dresden, Germany. 2004.

Akca, D. Remondino, F. Novak, D. Hanusch, T. Schrotter, G. Grün, A. Recording and modeling of cultural heritage objects with coded structured light projection systems. Proceedings of 2° International conference on Remote Sensing in Archaeology, BAR International Series 1568, pp. 375-382, Roma. 2006.

Amenta, N. Bern, M. Surface Reconstruction by Voronoi Filtering, Discrete & Computational Geometry, Volume: 22, Issue: 4, December, 1999, pp. 481-504.

Baarda, W.A testing procedure for use in geodetic networks. Netherlands Geodetic Commission, Publication on Geodesy, 2(5), 1968.

Baltsavias, E. P. Geometrically constrained multiphoto matching, Mitteilungen Nr. 49, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zürich, Switzerland, 1991.

Beraldin, J.-A. Picard, M. El-Hakim, G. Latouche, S. Go-

- din, C. Valzano, V. and Bandiera, A. Exploring a Byzantine crypt through a high-resolution texture mapped 3D model: combining range data and photogrammetry. Proceedings of ISPRS/CIPA Int. Workshop Scanning for Cultural Heritage Recording. Corfù, Greece, 2002.
- Beraldin, J.-A. Picard, M. El-Hakim, S. Godin, G. Valzano, V. and Bandiera, A. Combining 3D technologies for cultural heritage interpretation and entertainment. In Videometrics VIII, Beraldin/El Hakim/Grün/Walton (Eds), SPIE Vol. 5665, pp. 108-118, 2005.
- Baratin, L. Peloso, D. Archivi digitali 3D per la gestione di siti archeologici: i templi megalitici di Malta. In Atti 13a Conferenza Nazionale ASITA - Bari 1-4 dicembre 2009.
- Baratin, L. Bitelli, G. Unguendoli, M. Zanutta, A. Digital orthophoto as a tool for the restoration of monuments", IAPRS, 33(5), pp. 62-69. 2000.
- Benedetti, B. Gaiani, M. Remondino, F. Modelli digitali 3D in archeologia. Il caso di Pompei. Editto da Scuola Normale Superiore, 2011.
- Bertocci, S. Bini, M. Manuale di rilievo architettonico e urbano, CittàStudi Edizioni, Torino, 2012.
- Bertocci, S. Bua, S. Parrinello, S. Picchio, F. Montepulciano 3D: modelli virtuali per l'urbanistica e lo sviluppo dell'ambiente urbano. (Montepulciano 3D: virtual models for urban planning and development of the urban environment) In DISEGNAREcon 13/2014_Town files-città stratificate, a cura di Francesca Fatta, Sebastiano Nucifora e Chiara Scali.
- Bertocci, S. Parrinello, S. Vital, R. Masada notebooks. Report of the research project 2014. Vol. II. Editto da Edifir, Firenze, 2014.
- Bertocci, S. Parrinello, S. Vital, R. Masada notebooks. Report of the research project 2013. Vol. I. Editto da Edifir, Firenze, 2013.
- Bertocci, S. Parrinello, S. Digital Survey and Documentation of the Archaeological and Architectural sites, Unesco World Heritage List. Editto da Edifir, Firenze, 2015.
- Bitelli, G. Vittuari, L. Un sistema a controllo remoto per l'acquisizione di immagini fotogrammetriche mediante aquilone. In Bakchias VIII – Rapporto preliminare della campagna di scavo del 2000, a cura di S. Pernigotti, M. Capasso, P. Davoli, 91-98, La Mandragora. 2001
- Bitelli, G. Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei Beni Culturali. in Atti della 6° Conferenza Nazionale ASITA, Vol.1, IX-XXIV, Perugia, 2002.
- Bitelli, G. Girelli, V.A. Tini, M.A. Vittuari, L. Zanutta, A. Laser a scansione terrestre e fotogrammetria digitale nel rilevamento dei Beni Culturali: esempi dalla Piazza di S. Stefano in Bologna. Atti 7° Conferenza Nazionale ASITA, Volume 1, pp. 345-350, Verona. 2003.
- Bitelli, G. Girelli, V.A. Tini, M.A. Vittuari, L. Low-height aerial imagery and digital photogrammetrical processing for archaeological mapping. Proceedings of ISPRS 2004 (dvd ISSN 1682-1777), Istanbul, Turkey. 2004.
- Bitelli, G. Girelli, V.A. Tini, M.A. Vittuari, L. Utilizzo di un sistema non convenzionale di fotogrammetria aerea per la produzione di ortofoto a grande scala

in ambito archeologico. Atti 8° Conferenza Nazionale ASITA, Volume 1, pp. 443-448, Roma. 2004.

Böhler, W. Comparison of 3D laser scanning and other 3D measurement techniques, in 'Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage' - E.Baltsavias, A.Gruen, L.Van Gool, M.Pateraki (Eds), Taylor & Francis / Balkema, ISBN 0 415 39208 X, pp. 89-99, May 22-27, Ascona, Switzerland, 2005.

Brown, D. Close-range camera calibration". Photogrammetric Engineering, Vol. 37(8), pp. 855-866, 1971.

Cerasetti, B. Girelli, V. A. Luglio, G. Rondelli, B. Zanfini, M. From monument to town and country: integrated techniques of surveying at Tilmen Höyük in south-east Turkey. Proceedings of 5° International Conference on the Archaeology of the Ancient Near East, Madrid, Spain, 2006.

Bua, S. Picchio, F. Esperienze di rilievo integrato per la documentazione del Ninfeo di Palazzo a Villa Adriana mediante laser scanner e fotogrammetria, in Forma Urbis "Villa Adriana. Storia, archeologia, restauro e conservazione" Anno XVIII n°8, Settembre 2013. ISSN 1720-884X. Pp. 50-51.

Bua, S. Ceccarelli, R. Parrinello, S. Il rilievo per l'indagine storico-evolutiva della Chiesa dei SS. Martiri Donato e Ilarino a Camaldoli, in Architettura eremitica. Sistemi progettuali e paesaggi culturali. Atti del Terzo Convegno Internazionale di Studi Camaldoli 21-23 Settembre 2012, a cura di Stefano Bertocci e Sandro Parrinello. Editore Edifir, Firenze, 2012.

Chen, Y. and Medioni, G. Object modeling by registration of multiple range images. Image and Vision Computing, 10 (3), 145-155. 1992.

Cheung, J.T.-M. Jason Tak-Man; Zhang, Ming; Leung, A.K.-L. Aaron Kam-Lun; Fan, Y.-B. Yu-Bo, Three-dimensional finite element analysis of the foot during

standing - a material sensitivity study, Journal of Biomechanics, Volume: 38, Issue: 5, May, 2005, pp. 1045-1054.

Colombo, L. Dalla rappresentazione fotogrammetrica ai modelli raster tridimensionali. Bollettino SIFET, St. Vincent, Aosta, 1994.

De Luca, L. La fotomodellazione architettonica: Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie, Flaccovio Editore, 2011

Dubbini, M., Girelli, V.A., Zanutta, A. Rilievi fotogrammetrici non convenzionali per la valutazione dell'evoluzione storico-architettonica e recupero della chiesa di S. Giuseppe in Venola. Atti Convegno Nazionale SIFET, Palermo. 2005.

El-Hakim, S. F. Beraldin, J.-A. Blais, F. Critical factors and configurations for practical 3D image-based modeling. 6th Conference on 3D Measurement techniques, Zürich, Switzerland, Vol. II, pp. 159-167. 2003.

El-Hakim, S. F. Beraldin, J.-A. Picard, M. Godin, G. Detailed 3D reconstruction large-scale heritage sites with integrated techniques. IEEE Computer Graphics and Application, 24(3), pp. 21-29. 2004.

Fangi, G. Note di Fotogrammetria, Clua Edizioni, Ancona, 1996.

Fraser, C. S. Network design. In Close-range Photogrammetry and Machine Vision, Atkinson (Ed.), Whittles Publishing, UK, pp. 256-282, 1996.

Funatomi, Takuya; Moro, Isao; Mizuta, Shinobu; Minoh, Michihiko, Surface reconstruction from point cloud of human body by clustering, Systems and Computers in Japan, Volume: 37, Issue: 11, October 0, 2006, pp. 44-56.

Georgopoulos, A. Karras, G.E. Makris, G.N. The Photogrammetric survey of a prehistoric site undergoing removal. Photogrammetric Record, 16(93): 443-456,

- National Technical University of Athens, Greece. 1999.
- Gesafidis, S. Kambourakis, A. Karras, G.E. Lymperopoulos, E. Madani, M. Mavrelis, G. Mavromati, D. Digital orthophotography in archaeology with low-altitude non-metric images. *IAPRS*, 32(5W11): pp. 8-11. 1999.
- Grün, A. Remondino, F. Zhang, L. Photogrammetric reconstruction of the Great Buddha of bamiyan, Afghanistan. *The Photogrammetric Record*, 19 (107), pp. 177-199. 2004.
- Grün, A. Remondino, F. Zhang, L. The Bamiyan project: multi-resolution image-based modeling, in 'Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage', E.Baltsavias, A.Gruen, L.Van Gool, M.Pateraki (Eds), Taylor & Francis/Balkema, pp. 45-54, May 22-27, Ascona, Switzerland. 2005.
- Guarnieri, A. Remondino, F. Vettore, A. Photogrammetry and round – based laser scanner: Assessment of metric accuracy of the 3D model of Pozzoveggiani Church. *FIG Working Week 2004. TS on Positioning and measurement Technologies and Practices II – Laser Scanner and Photogrammetry*. 2004.
- Guarnieri, A., Vettore, A. Validazione di dati laser scanner per applicazioni di metrologia close-range. *Atti 8° Conferenza Nazionale ASITA, Volume 2*, pp. 1261-1266, Roma, 2004.
- Guidi A. *I metodi della ricerca archeologica*, Roma-Bari, Laterza, 1994.
- Habib, A. Lee, Y. and M. Morgan, Bundle adjustment with self-calibration using straight lines. *Photogrammetric Record Journal*, 17(100): 635-650. 2002
- Les A. Piegl e Wayne Tiller, *The NURBS book*, Springer-Verlag, New York 1966.
- Netzer, E. MASADA III. *The Yigael Yadin Excavations 1963-1965. Final Reports. The Buildings Stratigraphy and Architecture*. (1994),
- Parrinello, S. Bertocci, S. Pancani, G. *Between east and west, transposition of cultural systems and military technology of fortified landscapes*, a cura di Edito da Edifir, Firenze, 2012.
- Remondino, F. and Fraser, C. Digital camera calibration methods: consideration and comparisons. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.36(B5), Dresden, Germany, 2006.
- Remondino, F. And L. Zhang Surface reconstruction algorithms for detailed close-range object modeling. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.36(B3), Bonn, Germany, 2006.
- Saint Aubin, J. P. *Il rilievo e la rappresentazione dell'architettura*". Moretti & Vitali (Eds), Bergamo. 1999.
- Tini, M. A. *Fotogrammetria e realtà visuale per la documentazione metrica, la rappresentazione e la gestione dei dati in archeologia*. Tesi di Dottorato, Università di Bologna, Italia. 2002.

Crediti

In riferimento ai casi studio affrontati e le considerazioni fatte sulle sperimentazioni riportate in questa tesi di dottorato, si riportano di seguito i crediti ai Progetti di Ricerca, del quale questi fanno parte.

Sono stati riportati, per ogni progetto, i nomi dei componenti del team di ricerca e dei laureandi o degli studenti che hanno partecipato a seminari tematici.

Le immagini elaborate dai laureandi o dagli studenti nel corso dei seminari tematici, che ho personalmente seguito, sono indicate a termine di ogni paragrafo del progetto di ricerca.

Rilievo e Documentazione del sito UNESCO di Masada, Israele

Responsabile Scientifico del Progetto:
Stefano Bertocci, Sandro Parrinello, Rebeka Vital

Coordinatore scientifico del progetto:
Sara Bua

Partnership e Istituzioni Pubbliche:
Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura; Università degli Studi di Pavia, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura; Shenkar College of Design and Engineering of Ramat Gan, Israele, Department of Interior Building and Environment Design; Ambasciata Italiana a Tel Aviv; Israel Nature and Parks Authority; CyArk 500

Partnership e Supporto Tecnico:
Autodesk, Leica Geosystems, Mabat 3D Technologies Ltd

Partecipanti al progetto:

Gruppo di ricerca: S. Bertocci, S. Bua, D. Bursich, F. Fantini, M. T. Grassi, S. Parrinello, F. Picchio, S. Porzilli, R. Vital.

Studenti: M. Benedetti, M. Bercigli, B. Bertoglio, N. Centrone, A. Cottini, A. Scalabrelli, E.Y. Barel, N. First, A. Ticho, R. Rabia, A. Buchkov, L. Kopp, A. Magen, M. Golan, S. Cohen, O. Eliyahu, A. Shissel, T. Sherman

Alcuni dei risultati del rilievo, sono stati estrapolati dalle Tesi di Laurea di:

Marco Benedetti in Architettura magistrale dell'Università degli studi di Firenze dal titolo: "Palazzo di Erode il Grande a Masada (Israele), Sistemi integrati per il Rilievo Archeologico". Relatore Prof. Stefano Bertocci, Correlatore Prof. Sandro Parrinello, Correlatore esterno Prof. Rebeka Vital. A.A. 2013/2014.

Andrea Scalabrelli in Architettura magistrale dell'Università degli studi di Firenze dal titolo: "Masada: rilievo integrato e fotomodellazione per la documentazione del Palazzo Occidentale". Relatore Prof. Stefano Bertocci, Correlatore Prof. Sandro Parrinello, Correlatore esterno Dott.ssa Sara Bua. A.A. 2013/2014.

Rilievo e Documentazione del sito UNESCO di Villa Adriana, Tivoli, Italia

Responsabile Scientifico del Progetto:
Stefano Bertocci, Luca Cipriani, Sandro Parrinello

Coordinatore scientifico del progetto:
Filippo Fantini, Sergio Di Tondo

Partnership e Istituzioni Pubbliche:

Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura; Università degli Studi di Pavia, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura; Alma Mater Studiorum, Università degli Studi di Bologna, Dipartimento di Architettura; Soprintendenza per i Beni Archeologici del Lazio, Area Archeologica di Villa Adriana

Partnership e Supporto Tecnico:

Microgeo srl

Partecipanti al progetto:

Gruppo di ricerca: A. Arrighetti, S. Bertacchi, S. Bertocci, S. Bua, L. Cipriani, S. Di Tondo, F. Fantini, S. Parrinello, F. Picchio

Studenti: Gli studenti, coinvolti fanno parte dei corsi di Rilievo dell'Architettura e Rappresentazione del Paesaggio delle Facoltà sopra menzionate, (a.a 2013, 2014, 2015)

Alcuni dei risultati del rilievo, sono stati estrapolati dall'esame delle studentesse Jvonne Franco, Laura Gli-scoff e Simona Landucci del corso di rilievo della Facoltà di Architettura di Firenze e dell'esame di Andrea Salabrelli del corso di orientamento della Facoltà di Architettura di Firenze. A.A. 2012/2013.

Rilievo e Documentazione del centro storico UNESCO di Are, Israele**Responsabile Scientifico del Progetto:**

Stefano Bertocci, Paola Puma, Rebeka Vital

Coordinatore scientifico del progetto:

Sara Bua

Partnership e Istituzioni Pubbliche:

Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura; Shenkar College of Design and Engineering of Ramat Gan, Israele, Department of Interior Building and Environment Design; Ambasciata Italiana a Tel Aviv

Partecipanti al progetto:

Gruppo di ricerca: S. Bertocci, S. Bua, P. Puma

Studenti: M. Bercigli, B. Bertoglio, N. Centrone, A. Cottini, A. Scalabrelli

Rilievo e Documentazione deArchitetture Eremitiche Toscane: il Monastero e l'Eremo di Camaldoli**Responsabile Scientifico del Progetto:**

Stefano Bertocci, Sandro Parrinello

Coordinatore scientifico del progetto:

Andrea Pagano

Partnership e Istituzioni Pubbliche:

Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura; Università degli Studi di Pavia, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura; Comunità Camaldolese

Partecipanti al progetto:

Gruppo di ricerca: S. Bertocci, S. Bua, R. Ceccarelli, Andrea Pagano, S. Parrinello

Studenti: Gli studenti, coinvolti fanno parte dei corsi di Rilievo dell'Architettura e Rappresentazione del Paesaggio delle Facoltà sopra menzionate, (a.a da 2008 al 1012)

Sara Bua

Alcuni dei risultati del rilievo, sono stati estrapolati dalla Tesi di Laurea di:

Sara Bua e Riccardo Ceccarelli in Architettura magistrale dell'Università degli studi di Firenze dal titolo: Rilievo 3D per la valorizzazione e la conoscenza della chiesa dei SS. Martiri Donato e Ilarino a Camaldoli. Relatore Prof. S. Bertocci, Correlatore Prof. S. Parrinello. A.A. 2009/2010.

Progetto di Ricerca Montepulciano Tour

Responsabile Scientifico del Progetto:
Stefano Bertocci, Sandro Parrinello

Coordinatore scientifico del progetto:
Sara Bua, Francesca Picchio

Partnership e Istituzioni Pubbliche:
Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura; Università degli Studi di Pavia, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura; Comune di Montepulciano (SI)

Partnership e Supporto Tecnico:
Qrsit; Idem Adv

Partecipanti al progetto:
F. Bardini, S. Bua, F. Picchio

Abstract

Technological developments available in the field of the Scientific Documentation, have given great new opportunities not only for the general subject of the Survey of the Architecture, but especially in the Cultural Heritage Survey field. New technologies have improved specific methodologies for the acquisition of information relating to the object of investigation, it represents the acquisition phase of the metrical information, and also they have given an important improvement related to the question of the representation and dissemination.

This Ph.D. work thesis proposes, on the basis of many experiences developed during the Ph.D. course, thanks to the participation in many research activities of the Laboratory of Survey and of the Joint Laboratory LS3D of the University of Florence, to address and investigate through the problems related to the use digital photogrammetry and laser scanning methods for applications in the specific field of Cultural Heritage, trying to solve the main problems related to the representation techniques and linked to the use of digital systems for archive data.

The research is strictly experimental and based on direct experiences and experimentations. That's the reason why one of the primary need was to collect real study cases on which test and improve technical approaches and methodologies. At the same time it was important to emphasize that the scientific field of the Survey of the Architecture presents its own char-

acteristics and peculiarities and it cannot hardly be approached with conventional schemes and standardized methodologies.

Problems emerged during the research phases have addressed and helped the research, pushing the scientific activities in deep. The experiences performed has showed that the field of Cultural Heritage is perhaps the most emblematic in terms of presence of numerous potential available today thanks to the presence of detection technologies, and especially thanks to the possibilities offered by an integrated, multidisciplinary approach with sophisticated and different technologies. For this reason were highlighted several aspects carried out in archaeological contexts, describing the methodological approach adopted in many works.

In this field usually it's necessary to use different integrated techniques in order to rigorously implement a multiscale survey that starts from the huge metric scale of the territory, through the archaeological site "medium" metric scale until the detailed an singular excavation, down to the individual findings.

This approach is characterized by having all the data and the related processing in a single, well-defined reference system. Through this constant exercise, the attention can be focused on the analysis of the two techniques which are today the most used: photogrammetry and the digital and terrestrial laser scanning methods.

The thesis structure follows the classic stages of the process that from the survey lead to the representation and to the generation of the final outputs; the second and the third chapters, geared to the acquisition of the metric data, concerning the acquisition methods with laser systems and the acquisition through digital sensors; during the first chapters there are described the methodological and technical-operational characteristics and related issues of the two main survey techniques.

The fourth chapter is devoted, through the illustration of the selected case studies, to the problem of two-dimensional vector and raster representation systems; the fifth chapter aims to present, through the previously illustrated case studies, an overview of the possibilities offered by modern technologies for photo-realistic three-dimensional representation, generated either from photogrammetric data, both from the laser scanner data directly and indirectly through nurbs modeling. The final part of the thesis concerns the output and in particular the systematization of the acquired and processed data for any further use.

In fact, borrowing the concept of ‘smart city’, theorized over a decade ago by William J. Mitchell, the possibility to have and manage informations with digital systems allows to take advantage with the ability to integrate informations and processes quickly in a single instrument, and they can then readily make available to the end user; however, this implies

a careful design of the database structure that contains the information itself.

In the final part of this work is treated the problematic of the storage procedure, related to the use of the metric data that, starting from the construction of a system of three-dimensional models capable of returning scientifically correct information and re-usable also for management purposes, becomes a kind of object container real that appears completely virtual. This is not meant to be a duplicate of the reality but a system that enriched with new meanings the model itself.

3D models then are not thought of as “isolated systems”, as a pure object that might remain identical to itself over time, but they constitute a collection of digital three-dimensional models designed as an “evolving dynamic systems”, able not only to set the date, but also able to be an effective tool for the future management thanks to the return of the geometrical shape, their own materiality, in addition to being a cognitive architectural system within a georeferenced information system created for the object of the investigation. With this kind of operative system this scientific approach will be applied to an historical town center, to an archaeological site or definitely to a Cultural Architectural Heritage.

