

**Politecnico di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per il  
restauro e la valorizzazione del patrimonio

Tesi di Laurea Magistrale

**IL PALAZZO DUCALE DI GUBBIO,  
TECNICHE DI RILIEVO INTEGRATE**

Relatore: Fulvio Rinaudo  
Corelatore: Paola Mercurelli Salari

Candidato: Vittorio Scolamiero

A.A. 2018-2019



**POLITECNICO DI TORINO**

**Corso di Laurea Magistrale  
in Architettura per il Restauro e Valorizzazione del patrimonio**

Tesi di Laurea Magistrale

**IL PALAZZO DUCALE DI GUBBIO,  
TECNICHE DI RILIEVO INTEGRATE**



**Relatore**  
FULVIO RINAUDO

**Candidato**  
VITTORIO SCOLAMIERO

**Corelatore**  
PAOLA MERCURELLI SALARI

A.A.2018-2019



*Alla mia famiglia, a Barbara  
e ad Iris*

# INDICE

<b>Premessa</b>	<b>4</b>
<b>1. Introduzione</b>	<b>5</b>
<b>2. Documentazione dei beni culturali</b>	<b>6</b>
2.1.    Importanza della documentazione dei beni culturali	
2.2.    Rilievo 3D come strumento di conoscenza e condivisione	
<b>3. Il Palazzo Ducale di Gubbio</b>	<b>12</b>
3.1.    Cronologia fasi storiche	
3.1.1 Fase 1_pre XV secolo	
3.1.2 Fase 2_XV secolo	
3.1.3 Fase 3_post XV secolo	
<b>4. La conoscenza attraverso il rilievo</b>	<b>22</b>
4.1.    Il rilievo metrico architettonico	
4.2.    La campagna di rilievo	
4.3.    Inquadramento topografico	
4.3.1 La rete topografica	
4.3.2 Il rilievo celerimetrico	
4.4.    Tecnologia LIDAR	
4.4.1 Acquisizione delle scansioni laser	
4.4.2 Registrazione delle scansioni laser	
4.4.3 Elaborazione della nuvola di punti	

- 4.5. Fotogrammetria UAV
  - 4.5.1 Acquisizione dei fotogrammi
  - 4.5.2 Elaborazione dei dati fotogrammetrici
- 4.6. Mobile mapping SLAM
  - 4.6.1. Acquisizione delle scansioni
  - 4.6.2. Registrazione delle scansioni
  - 4.6.3. Elaborazione della nuvola di punti

## **5. Confronto ed integrazione delle tecniche di rilievo utilizzate**\_\_\_\_\_71

- 5.1. Confronto tra i dati acquisiti
- 5.2. Integrazione dei dati elaborati

**Conclusioni**\_\_\_\_\_84

**Bibliografia – Sitografia**\_\_\_\_\_85

**Fonte delle immagini**\_\_\_\_\_88

**Allegati**\_\_\_\_\_90

**Elaborati Grafici**

**Ringraziamenti**

## PREMESSA

L'obiettivo principale della tesi è quello di documentare il Palazzo Ducale di Gubbio al fine di ottenere un modello complesso dell'architettura come strumento privilegiato su cui poter costruire, in futuro, un sistema informativo o un progetto di restauro. Quindi, fornire un modello, metricamente corretto, del complesso architettonico ed in particolare di alcune zone che ne sono sprovviste, derivante da un rilievo eseguito con diverse tecnologie integrate tra loro. Con lo scopo di ottenere un rilievo globale delle intere parti che formano il Palazzo Ducale in modo da poter leggere la struttura unitariamente.

Il lavoro svolto per conseguire tale obiettivo è stato diviso in diverse fasi temporali. La fase preliminare è stata quella della ricerca bibliografica che ha permesso di individuare il materiale utile per approfondire i temi oggetto di studio; conseguenza di questa fase è una prima conoscenza del manufatto architettonico avvenuta attraverso lo studio di diverse monografie e la comparazione di rilievi e documentazione storica. La seconda fase è stata quella della campagna di rilievo; fase che ha permesso di acquisire i dati necessari allo sviluppo del lavoro, attraverso l'impiego di diverse tecnologie al servizio del patrimonio culturale come: tecnologia LIDAR, tecnologia UAV e tecnologia SLAM. Fase che ha previsto un preliminare studio in grado di ottimizzare il dispendio di energie e tempo, che ha permesso di acquisire un numero di dati adeguati al lavoro da svolgere. La terza fase ha previsto una prima e preventiva organizzazione ed archiviazione dei dati, conseguentemente tali dati sono stati elaborati in tre momenti differenti. Si è deciso quindi di elaborare prima i dati provenienti dalle scansioni lidar, poi i dati provenienti dalla fotogrammetria UAV e per ultimo i dati acquisiti tramite tecnologia SLAM; questi dati sono stati poi analizzati e comparati.

Questo lavoro rappresenta una base, utile per ulteriori approfondimenti, alla conoscenza esaustiva del complesso architettonico e delinea una metodologia che, sfruttando le moderne tecnologie per il rilievo dei beni culturali, risulti applicabile anche in altri contesti.

## 1.INTRODUZIONE

Uno dei campi in cui la disciplina della Geomatica<sup>1</sup> trova maggior utilizzo è la documentazione dell'esistente, prerogativa essenziale per la conservazione del patrimonio culturale. La Geomatica offre, attraverso l'utilizzo di tecnologie innovative, un supporto per la conoscenza del patrimonio, grazie alla grande quantità di informazioni che permette di acquisire. Il rilievo è quindi una necessità volta ad apprendere la conoscenza di un bene culturale attraverso la documentazione al fine di garantirne il monitoraggio, la conservazione e la valorizzazione. Dunque, la duplice funzione del rilievo, di documentazione e interpretazione, gli conferisce un ruolo di supporto per tutte le operazioni successive.

*“Ogni architettura in genere è costruita da un universo di dati, spazi e volumi, colori, materiali, piani, luci e ombre, è inoltre solitamente una struttura dotata di significati per l'uomo che la usa e vi abita; si connota come il prodotto di una determinata cultura che suggerisce metafore, analogie, confronti e concreta in un certo qual modo idee e concetti astratti”<sup>2</sup>*

In questo contesto, il caso studio preso in oggetto, ovvero il Palazzo Ducale di Gubbio, che è parte del patrimonio culturale del nostro Paese, rappresenta il frutto di un processo evolutivo consolidato nel tempo che descrive una testimonianza storica unica. Costruito, su preesistenze medievali, a partire dal 1474 è un complesso caratterizzato dalla presenza di diverse stratificazioni storiche. Questa complessità di forma e la mancanza di un rilievo comprendente le diverse parti che compongono il Palazzo, esprimono la necessità di un rilievo basato sull'integrazione di diverse tecnologie che permettono di cogliere le diverse peculiarità del complesso. Il rilievo integrato<sup>3</sup>, infatti, rappresenta un processo capace di seguire le necessità proprie del progetto nel presente e nel futuro, infatti il punto di forza di tale processo si manifesta nel caso di rilievi reiterati nel tempo allo scopo di monitoraggio, integrazioni e valutazioni diagnostiche, nel caso di eventi disastrosi.

---

<sup>1</sup> Disciplina che integra le nuove tecnologie informatiche con i diversi settori tecnico-scientifici relativi al rilevamento e al trattamento dei dati ambientali e territoriali

<sup>2</sup> Bertocci, Bini, Manuale di rilievo architettonico e urbano, Città studi, 2012

<sup>3</sup> Il rilievo integrato rappresenta un processo basato sull'utilizzo di diverse tecnologie per raggiungere l'obiettivo finale come: stazione totale, strumentazione gnss, laser scanner, drone, mobile mapping.

## 2. DOCUMETAZIONE DEI BENI CULTURALI

In questo capitolo si introduce la documentazione dei beni culturali e l'importanza del rilievo 3D e delle moderne tecnologie in questo campo. La prima parte riguarda infatti l'importanza della documentazione in relazione ai beni culturali, mentre la seconda parte riguarda la conoscenza dei beni e la condivisione dei dati che si può operare grazie al rilievo 3D.

DETTAGLIO CORTILE DEL PALAZZO DUCALE



## 2.1 L'IMPORTANZA DELLA DOCUMENTAZIONE DEI BENI CULTURALI

*“Il patrimonio architettonico è una testimonianza del passato e, come tale, documenta l’attività umana, dai piccoli manufatti ai paesaggi culturali, da edifici storici a monumenti antichi, da centri storici a siti archeologici. Il patrimonio culturale di tutto il mondo è da sempre soggetto a conflitti, catastrofi naturali e negligenze umane, pertanto è assolutamente necessario documentarne i suoi valori.”<sup>4</sup>*

Per tale ragione le organizzazioni internazionali più importanti a livello internazionale, come l’ICOMOS<sup>5</sup>(Consiglio Internazionale dei Monumenti e dei Siti), l’UNESCO<sup>6</sup> (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Educazione, la Scienza e la Cultura) e l’ICCROM<sup>7</sup>(International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property), si occupano di rilasciare carte, risoluzioni e dichiarazioni, ovvero linee guida che sottolineano l’importanza della documentazione del patrimonio esistente ai fini di conservazione, gestione e valutazione. In questo scenario è utile richiamare la definizione proposta nel documento conclusivo del Convegno Verso una “carta del rilievo”<sup>8</sup> tenutosi a Napoli nel 1999, in cui tale attività risulta consistere nel “complesso di operazioni, misurazioni e di analisi atto a comprendere e documentare un bene culturale nella sua configurazione complessiva, nelle sue caratteristiche metriche, nella sua complessità storica, nelle sue caratteristiche strutturali e costruttive oltre che in quelle formali.”

---

<sup>4</sup> Cristiana Bartolomei, La documentazione dei Beni Culturali, Cultural Heritage Documentation, in DISEGNARECON, dicembre 2010

<sup>5</sup> ICOMOS è un’organizzazione internazionale non-governativa, senza fini di lucro impegnata a promuovere la conservazione, la protezione, l’uso e la valorizzazione del patrimonio culturale mondiale. Si dedica allo sviluppo di dottrine comuni, l’evoluzione e la diffusione delle conoscenze, la creazione di migliori tecniche di conservazione, e la promozione del patrimonio culturale.

<sup>6</sup> UNESCO istituita a Parigi 4 novembre 1946, è nata al fine di assicurare il rispetto universale della giustizia, della legge, dei diritti dell’uomo e delle libertà fondamentali che la Carta delle Nazioni Unite riconosce a tutti i popoli, senza distinzione di razza, di sesso, di lingua o di religione.

<sup>7</sup> ICCROM è un’organizzazione intergovernativa che opera al servizio dei suoi Stati membri per promuovere la conservazione di tutte le forme di patrimonio culturale, in ogni regione del mondo. L’istituzione opera nello spirito della Dichiarazione Universale dell’Unesco sulla Diversità Culturale del 2001, che afferma che “il rispetto della diversità delle culture, la tolleranza, il dialogo e la cooperazione in un clima di fiducia e di mutua comprensione sono tra le migliori garanzie di pace e di sicurezza internazionali.”

<sup>8</sup>C. Cundari, L. Carnevali, Il rilievo dei beni architettonici per la conservazione, KAPPA, Roma, 2000

Di conseguenza il presupposto per qualsiasi intervento sul patrimonio culturale<sup>9</sup> è la conoscenza del bene e del suo ambiente. Documentare, quindi, è necessario per acquisire conoscenza, per promuovere l'interesse e il coinvolgimento della collettività e per garantire la manutenzione e la conservazione.

Altro aspetto molto importante per la conservazione dei beni culturali riguarda la loro vulnerabilità, e leggendo quanto scrive l'ICCROM sul proprio sito web:

*“Cicloni, tifoni, inondazioni e terremoti sono stati definiti come le principali minacce per lo sviluppo umano. Tali eventi hanno un impatto altrettanto devastante sul patrimonio culturale. Per esempio, il terremoto del 2015 in Nepal ha causato danni stimati a 169 milioni di dollari su oltre 700 siti del patrimonio culturale. Analogamente, i conflitti violenti minacciano la pace nel mondo e la diversità culturale, entrambe legate allo sviluppo umano. La distruzione intenzionale del patrimonio culturale è diventata un'arma di guerra, mentre il traffico illecito delle antichità contribuisce a sostenere i conflitti.”*<sup>10</sup>

Appare evidente come un bene culturale rappresenti una risorsa non rinnovabile. In questo contesto va inserito il concetto di Restauro Preventivo<sup>11</sup> concretizzato dal progetto Carta del Rischio<sup>12</sup> che ha come obiettivo definire un sistema per individuare velocemente, nell'ambito

---

<sup>9</sup> Codice dei Beni culturali e del paesaggio, Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42, Articolo 2 Patrimonio culturale:

1. Il patrimonio culturale è costituito dai beni culturali e dai beni paesaggistici.

2. Sono beni culturali le cose immobili e mobili che, ai sensi degli articoli 10 e 11, presentano interesse artistico, storico, archeologico, etnoantropologico, archivistico e bibliografico e le altre cose individuate dalla legge o in base alla legge quali testimonianze aventi valore di civiltà.

3. Sono beni paesaggistici gli immobili e le aree indicati all'articolo 134, costituenti espressione dei valori storici, culturali, naturali, morfologici ed estetici del territorio, e gli altri beni individuati dalla legge o in base alla legge.

<sup>10</sup> ICCROM.it

<sup>11</sup> formulato da Cesare Brandi già alla metà del secolo scorso, il restauro preventivo è quell'insieme di misure volte a rallentare il più possibile quei processi che potrebbero compromettere l'integrità e la lettura dell'opera. Nel caso più specifico di un contesto urbano, il restauro preventivo può riferirsi anche alle disposizioni legislative che impediscono il danneggiamento di un'architettura o complesso architettonico.

C. BRANDI, Cosa debba intendersi per restauro preventivo, Bollettino dell'Istituto Centrale del Restauro 27-28 (1956), pp. 87-92

<sup>12</sup> La "Carta del Rischio" è un sistema informativo territoriale di supporto scientifico e amministrativo agli Enti statali e territoriali preposti alla tutela del patrimonio culturale. Il SIT è un sistema di banche dati, alfanumeriche e cartografiche, in grado di esplorare, sovrapporre ed elaborare informazioni intorno ai potenziali fattori di rischio che investono il patrimonio culturale.

[www.cartadelrischio.it](http://www.cartadelrischio.it)

dell'esteso patrimonio del nostro paese, quali siano i beni più esposti a rischio o a perdita, al fine di programmare gli interventi più urgenti.<sup>13</sup> Pertanto l'acquisizione delle informazioni necessarie per documentare deve essere intrapresa per creare un sistema di gestione del patrimonio.

Detto ciò, appare chiaro come il rilievo di un bene culturale sia alla base dei processi di conservazione, monitoraggio e successivamente di valorizzazione. Il rilievo, quindi, rappresenta attraverso la documentazione lo stato di fatto in un determinato momento del bene. Oltre a tale aspetto, documentare un bene, attraverso l'uso delle moderne tecnologie, esposto a rischio o soggetto ad un evento disastroso, consente anche di crearne una riproduzione digitale che rappresenta in qualche modo una memoria, non più materiale, di tale bene.

---

<sup>13</sup> A. M. Ferroni, C. Cacace, Carta del Rischio: la vulnerabilità archeologica, [http://www.icr.beniculturali.it/documenti/allegati/Vulnerabilita\\_archeologica.pdf](http://www.icr.beniculturali.it/documenti/allegati/Vulnerabilita_archeologica.pdf)

## 2.3 RILIEVO 3D COME STRUMENTO DI CONOSCENZA E CONDIVISIONE

*“Moltiplicare le informazioni, moltiplicare le connessioni, nel vivo nesso fra i risultati della ricerca specialistica e l’organizzazione dell’informazione per un pubblico più vasto”<sup>14</sup>*

Il rilievo 3D, grazie alle tecnologie sempre più innovative, è in grado di fornire un modello metricamente corretto che rappresenta un documento, un testo storico-critico del bene oggetto di studio. Questo modello deriva dall’applicazione ed integrazione di diverse tecnologie ai fini di tutela, monitoraggio, conservazione, valorizzazione e condivisione della conoscenza. Infatti, la valorizzazione del patrimonio culturale non si esaurisce con la prevenzione della sua materialità ma si realizza anche a condizione che il bene e la conoscenza del bene possano essere goduti e fruiti dalla collettività. Ancora, catturare ed archiviare in 3D il patrimonio culturale permette di tramandare realtà uniche che rischiano di andare perdute. Infine, i modelli 3D generati mediante un corretto approccio di indagine metrica sono la base per lo sviluppo di diversi tipi di rappresentazioni che vanno dai tradizionali disegni 2D fino alle strutture BIM, soluzioni AR / VR, stampa 3D ecc..<sup>15</sup>.

Grazie all’utilizzo delle tecnologie di acquisizione 3D come strumento di conoscenza si può parlare di digitalizzazione dei beni culturali ovvero di cultural data<sup>16</sup>. In quest’ottica di acquisizione e condivisione di cultural data sono nati archivi digitali come Europeana<sup>17</sup> e Google Art & Culture<sup>18</sup> che incoraggiano alla produzione e all’utilizzo di questo materiale digitale. Nel campo dell’architettura e del patrimonio culturale costruito uno degli esempi

---

<sup>14</sup> Salvatore Settis, Italia S.P.A., l’assalto al patrimonio culturale, Einaudi, 2002

<sup>15</sup> Metric survey and possible representations of Historic Architectural Heritage: the case of the Santa Giustina Abbey /Piovano, Alessandro; Rinaudo, Fulvio; Spallone, Roberta.

<sup>16</sup> . Il termine “cultural data” è stato coniato da Lev Manovich, docente di Computer Science Program alla City University di New York nel 2007 e ripreso nel 2014 dall’archeologo Neil Asher Silberman, sulla rivista giuridica International Journal of Cultural Property profetizzando il passaggio da beni culturali “materiali” a cultural data ossia riproduzioni, in formato digitale, di opere d’arte o monumenti esistenti o, più in generale, il corredo di informazioni culturali in cui l’arte è smaterializzata. (Giuditta Giardini-Il sole 24 ore)

<sup>17</sup> Europeana è una biblioteca digitale europea che riunisce contributi già digitalizzati da diverse istituzioni dei 28 paesi membri dell’Unione europea in 30 lingue.

<sup>18</sup> Google Arts & Culture collabora con oltre 1200 musei, gallerie e istituti in 70 paesi per rendere le esposizioni disponibili a tutti online.

più significativi e discussi di utilizzo di cultural data è stato la Ricostruzione 3D della città di Palmyra<sup>19</sup>, in Siria. In questo caso le tecnologie di acquisizione 3D più avanzate sono poste al servizio della memoria storica, con il risultato di condivisione del sapere e ricostruzione di beni in aree soggette a rischio. Tali strumenti, sottoforma di database, permettono un controllo approfondito dello stato di conservazione delle opere rilevate consentendo anche una possibile fruizione dei beni da parte di un'utenza allargata, fornendo a questa la possibilità di consultazione sul web.

Il rilievo 3D, ed in particolare le tecnologie che permettono ciò, offrono dunque da un lato la possibilità di una documentazione che mira esclusivamente all'accuratezza della misura e della conseguente riproduzione dell'oggetto, e dall'altro la possibilità di ipotizzare la genesi della forma per simularne poi lo sviluppo<sup>20</sup>, che in architettura significa ricostruirne il processo evolutivo.



Figura 1

Shows preliminary reconstruction of the Arch of Triumph before the explosion (in red), using old surveys and crowd sourced pictures overlapping the actual state of the temple (in white).<http://www.dgam.gov.sy/index.php?d=314&id=1989>

<sup>19</sup> #NEWPALMYRA\_Building the future upon the past è un progetto governativo che colleziona dati provenienti da partners internazionali, li analizza e ricostruisce in ambiente virtuale Palmyra col fine di condividere i modelli e i dati in pubblico dominio per promuovere lo sviluppo della cultura ([www.newpalmyra.org](http://www.newpalmyra.org))

<sup>20</sup> Frontiere del Rilievo, dalla matita alle scansioni 3d, a cura di Riccardo Migliari, pp.9

### 3. IL PALAZZO DUCALE DI GUBBIO

In questo capitolo si introduce il caso studio rappresentato dal Palazzo Ducale di Gubbio, situato a monte della città. Introdotto il Palazzo sono state individuate delle fasi cronologiche che mostrano l'evoluzione del Palazzo nel corso della storia, dalla costruzione ai giorni nostri.

DETTAGLIO CORTILE INTERNO AL PALAZZO



### 3. IL PALAZZO DUCALE DI GUBBIO

Il Palazzo Ducale, situato a monte della più importante piazza cittadina, fronteggia il duomo di Gubbio (PG) e fu fatto costruire dal duca di Urbino Federico da Montefeltro su preesistenti costruzioni medievali. Il palazzo, progettato dall'architetto senese Francesco di Giorgio Martini, è strutturato in due corpi di fabbrica, orientati uno verso la vallata ed il secondo verso la montagna, congiunti dal cortile centrale.

Come già detto il complesso del Palazzo Ducale è composto da molteplici stratificazioni storiche; originariamente a nord dell'attuale complesso si trovava il primitivo Palazzo Comunale, la Torre e un ambiente di guardia. Lungo il lato rivolto a valle fu poi costruito il Palazzo della Guardia ed al centro di questi complessi era situata la Platea Communis. Al di sotto di questa Platea trovano posto due livelli interrati caratterizzati da preesistenze murarie risalenti tra il X e il XIV secolo. Queste preesistenze testimoniano quale importanza ha avuto tale zona nello sviluppo della storia cittadina. Il Palazzo rappresenta, dunque, il frutto di un processo evolutivo consolidato nel tempo che descrive una testimonianza storica unica.

Oggi il Palazzo è sede del Museo di Palazzo Ducale che fa capo al Polo Museale dell'Umbria, istituito in base al D.P.C.M. 29 agosto 2014<sup>21</sup> e assegnato con D.M. 23 dicembre 2014.<sup>22</sup>



Figura 2 Vista del Palazzo dal giardino pensile

<sup>21</sup> Decreto del presidente del consiglio dei ministri 29 agosto 2014, n. 171

<sup>22</sup> Decreto ministeriale 23 dicembre 2014: Organizzazione e funzionamento dei musei statali

### 3.1 CRONOLOGIA FASI STORICHE

In questo paragrafo si è proceduto nell'identificare le principali fasi cronologiche che hanno interessato l'evoluzione del Palazzo. Idealmente sono state individuate tre fasi che hanno caratterizzato lo sviluppo delle principali trasformazioni avvenute nel corso della storia e che hanno prodotto il complesso del Palazzo Ducale come può essere osservato oggi.

La prima fase riguarda le trasformazioni avvenute tra il XII e il XIV secolo, fase storica in cui l'area in cui insiste oggi il Palazzo era caratterizzata dalla presenza di molteplici manufatti architettonici di carattere rappresentativo. La seconda fase identifica le principali trasformazioni avvenute nel XV secolo; questa rappresenta la fase di trasformazione principale del Palazzo, poiché proprio in questo secolo grazie all'azione dei Montefeltro il complesso architettonico viene costruito a partire dalle preesistenze medievali per opera di Francesco di Giorgio Martini. La terza fase invece comprende diverse stagioni storiche che individuano le principali evoluzioni che ha subito il Palazzo dopo l'edificazione come il precoce abbandono avvenuto nel XVII secolo, l'avanzare dell'incuria, la spoliazione degli arredi originali ed i vari cambi di proprietà fino ai primi interventi di restauro avvenuti a partire dal XIX secolo.

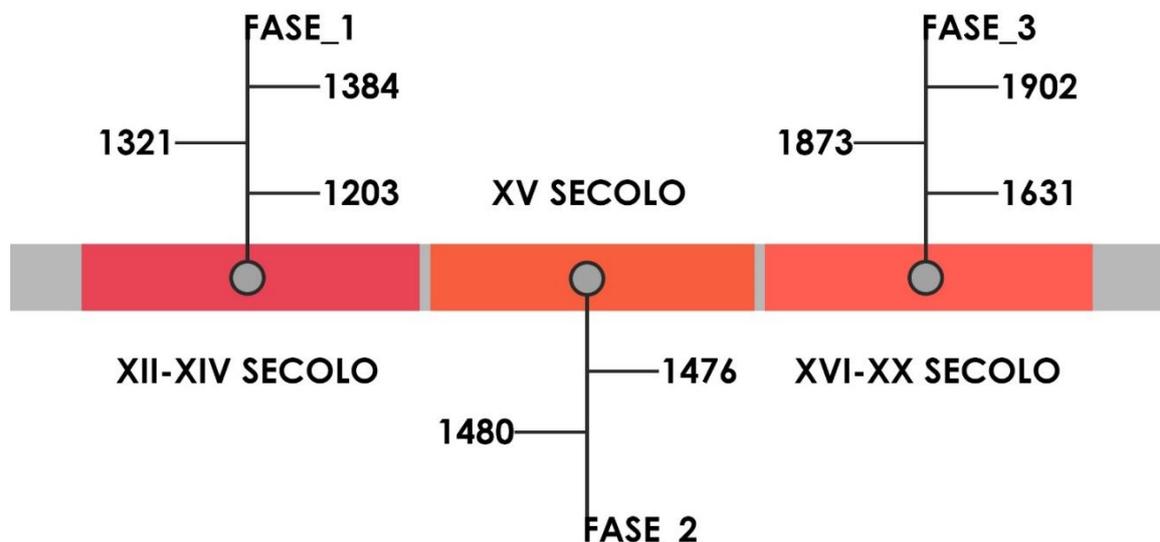


Figura 3 Timeline delle fasi cronologiche esaminate

### 3.1.1 FASE1\_PRE XV secolo

- XIII secolo - 1203

La zona a nord dell'attuale Palazzo Ducale era occupata da un complesso costituito dalla primitiva residenza comunale, (fig.5), da un sottopasso, da una torre e da un ambiente di "guardia", queste tre corpi formavano la cosiddetta corte vecchia. Le tre costruzioni erano separate da due vicoli che confluivano nell'aria pianeggiante compresa tra il palazzo e la cattedrale, quest'area costituiva la primitiva "Platea Comunis". Dunque, la parte più importante della città era decentrata ed a monte rispetto alle aree in cui si stava sviluppando la città, in questa scelta ebbe un peso importante la presenza dei resti di antichi insediamenti;

- XIII secolo

Nel corso del Duecento vennero apportate alcune modifiche al complesso: lungo il lato rivolto a valle fu costruito il Palazzo della Guardia ed al centro della platea fu posizionata una fontana detta "fons arengi";

- XIV secolo - 1321

Il Comune delibera la costruzione di un nuovo centro pubblico, più a valle del precedente, l'attuale Piazza Grande, costituito dal Palazzo dei Consoli e dal Palazzo del Podestà (o Pretorio), viene di conseguenza abbandonato il precedente centro pubblico situato a monte;

- XIV secolo - 1384

Stremati da decenni di lotte tra le fazioni cittadine nel 1384 gli eugubini si affidano ai Montefeltro per garantirsi la pace. Dunque, il Conte Antonio da Montefeltro<sup>23</sup> diventa il nuovo signore del comune di Gubbio che entra così nei domini dei Montefeltro. Al nuovo Conte viene attribuito il Palazzo della Guardia come residenza personale;

---

<sup>23</sup> Antonio da Montefeltro (Urbino 1348 – Urbino 29 aprile 1404), ottenne per consenso popolare la signoria di Gubbio;

Dunque in questa prima fase l'area in cui insiste, oggi, il Palazzo Ducale era caratterizzata dalla presenza di due corpi di fabbrica, costituenti i primi nuclei della residenza comunale: il Palazzo della Guardia a valle e la cosiddetta corte vecchia a nord, collegati dalla Platea Comunis. Ambienti che vengono abbandonati quando il Comune di Gubbio decide di realizzare un nuovo centro cittadino, più a valle, all'incrocio dei principali quartieri della città.



*Figura 4 Foto dei resti della primitiva corte vecchia*

### 3.1.2 FASE2\_XV secolo

- XV secolo anni Settanta

La costruzione del Palazzo è già avviata all'inizio degli anni Settanta, fase di trasformazione principale del Palazzo, il complesso viene costruito per volere di Federico da Montefeltro<sup>24</sup> nel corso degli ultimi anni della sua vita. La costruzione più antica rivela la sua origine medievale nella forma a sesto acuto degli archi delle finestre e nella muratura in pietra calcarea mentre le aggiunte sono in mattoni e pietra arenaria; la progettazione è affidata al senese Francesco di Giorgio Martini<sup>25</sup>, che articola la costruzione in due corpi di fabbrica, uniti da un cortile trapezoidale che si inserisce nell'area già occupata dalla "Platea Communis", l'angusto slargo compreso, oggi, tra il Palazzo e la Cattedrale è ciò che resta della platea (fig.7). L'ampio salone medievale, posto a piano terra, è diviso da Francesco di Giorgio in sala delle udienze e salone ducale, eliminando tre finestre gotiche e abbassando le altre. Una traccia sul muro mostra ancora il punto di innesto del tramezzo divisorio, rimosso poi nel corso di un intervento di restauro del XX secolo;

- XV secolo 1474

Questa data rappresenta un post-quem, ovvero un limite anteriore per la datazione dell'evento, attribuito storicamente per il titolo di Duca ottenuto da Federico con investitura di Sisto IV;

- XV secolo 04/06/1480

Donazione del Palazzo della Guardia a Federico da Montefeltro da parte del Comune di Gubbio. Il 4 giugno 1480 il comune gli donò quindi «unum palatium et tenimentum domorum olim vocatum el palazo dela guardia in quo nunc est curia nova, hedificata sive fabricata per Ipsum ill. dominum...»<sup>26</sup>, realizzato nella parte alta della città di fronte al Duomo;

---

<sup>24</sup> Federico da Montefeltro (Gubbio, 7 giugno 1422 – Ferrara, 10 settembre 1482), Alla morte di Federico gli succede il figlio Guidobaldo.

<sup>25</sup> Francesco di Giorgio Martini (Siena, settembre 1439 – Siena, 29 novembre 1501) è stato un architetto, teorico dell'architettura, pittore, ingegnere e scultore. Presso la corte di Federico da Montefeltro, tra il 1475 e il 1477 venne impiegato soprattutto come architetto civile e militare sostituendo Luciano Laurana nel completamento del Palazzo Ducale di Gubbio;

<sup>26</sup> R. Papini, Francesco di Giorgio Architetto, I-II, Firenze, 1946, I, p. 250.

Dunque, il palazzo fu ricavato utilizzando l'antico palazzo della Guardia ed accostando ad esso due sottili corpi trasversali per racchiudere in forma di cortile la retrostante platea comunis, quella che era l'antica piazza comunale di fronte alla Corte vecchia, ed al duomo sul rimanente lato a monte. Il fulcro dell'intero complesso è individuato nella corte interna che funge da raccordo tra preesistenze e nuove costruzioni; infatti l'impianto trapezoidale di questa è ereditato dalla platea comunis. In particolare, l'edificio deriva da una nuova cultura umanistica che sfocia nell'architettura con le opere e le idee di F. Brunelleschi e L.B. Alberti e nella forma del Palazzo Ducale di Urbino.



*Figura 5 Foto dello slargo che porta all'ingresso principale del Palazzo*

### 3.1.3 FASE3\_POST XV SECOLO

- XVI secolo  
Guidobaldo da Montefeltro <sup>27</sup>, terzo Duca di Urbino, aggiunge al complesso le nuove ali della sua residenza collegata al Palazzo tramite il cosiddetto “passetto”;
- XVII secolo - 1631  
A questa data risale il Palazzo passa in mano ai Medici che fanno redigere un primo inventario, una descrizione dello stato di fatto compilata da Nicolò Cerretani;  
XVII secolo - 1634  
Con il passaggio del Palazzo in mano ai Medici e grazie al matrimonio nel 1643 di Vittoria, ultima discendente dei Montefeltro della Rovere, con il granduca Ferdinando, molti degli arredi e delle opere d’arte conservati al suo interno migrano a Firenze e il Palazzo viene abbandonato come attesta una relazione compilata intorno alla metà del XVII secolo con una stima dei lavori da svolgere, particolarmente ingenti al piano superiore, dove i tetti sono in rovina;
- XVII secolo - 1694  
Nel 1694 il Palazzo è ereditato dal cardinale Francesco Maria dei Medici, secondogenito di Ferdinando e Vittoria.
- XVII secolo - 1743  
Con l’estinzione dei Medici, il Palazzo è acquisito dai Granduchi di Lorena, ma nel 1763 tutte le proprietà già appartenute ai Montefeltro della Rovere sono vendute a Papa Clemente XIII. Dieci anni dopo, nel 1773, Papa Clemente XIV lo vende alla famiglia Balducci di Gubbio.
- XIX secolo - 1873  
Il Palazzo viene rilevato dall’architetto tedesco Paul Laspeyres<sup>28</sup>. Rispetto ai disegni del 1631 si possono riscontrare alcune differenze: nella planimetria del piano terra uno dei due setti murari che dividevano l’attuale salone non è più presente; nel piano primo,

---

<sup>27</sup> Guidobaldo da Montefeltro (Gubbio, 24 gennaio 1472 – Fossombrone, 11 aprile 1508) fu il terzo duca di Urbino.

<sup>28</sup> Paul Laspeyres (Halle, 1840 – Roma, 1881), rileva il Palazzo Ducale di Gubbio nel corso di uno studio sui monumenti rinascimentali dell’Umbria

invece, il vestibolo di accesso alla scala elicoidale non è più suddiviso in due camerini ma è costituito da un ambiente unico;

- XIX secolo - 1874

Con il passaggio in mani private ha inizio la rimozione e la vendita di porte, architravi e stipiti che ha portato all'alienazione del complesso ligneo dello Studiolo, che viene venduto nel 1874 dalla famiglia Balducci al principe Lancellotti per la sua Villa di Frascati, nel 1937-1938 il Lancellotti lo cede ad un mercante, Adolph Loewi, che a sua volta lo esporta nel 1939 a New York e lo cede al Metropolitan Museum of Art;

- XIX-XX secolo

Tra fine XIX e inizio XX secolo l'intero complesso è restaurato con i finanziamenti del Genio Civile e sotto la direzione di Dante Viviani<sup>29</sup>, operazione questa che consente il salvataggio della struttura;

- XX secolo 1902-1905

In questa data il Palazzo viene dichiarato di interesse culturale nazionale attraverso la Dichiarazione di Interesse con Regio Decreto 18 agosto n.298, e viene avviato un nuovo progetto di recupero. Il progetto di restauro è affidato a Cornelio Budinich<sup>30</sup>, che nell'ottica del restauro filologico<sup>31</sup> sceglie di riportare in vista la struttura medievale. Nel 1905 invece diviene di proprietà dello Stato;

- XX secolo

Negli anni Ottanta, durante i lavori di recupero e restauro del Palazzo, furono eseguiti dei saggi di scavo nell'area sottostante il cortile d'onore (fig.10). Fu così messa in luce una vasta zona di strutture murarie databili tra X e XIV secolo, che documentano le dinamiche insediative della zona;

---

<sup>29</sup> Viviani, Dante, architetto, (Arezzo 1861- Arezzo 1917) collaborò con l'architetto Sacconi al restauro di numerosi edifici sacri, tra cui la basilica e il convento di S. Francesco di Assisi, e civili (palazzo dei consoli di Gubbio, palazzo dei priori di Todi)

<sup>30</sup> Cornelio Budinich (o Budinis); Fiume, 17 maggio 1873 - Trieste, 14 marzo 1935, fu architetto e storico dell'architettura.

<sup>31</sup> Il restauro filologico è l'insieme delle posizioni teoriche e operative che cercano di contemperare l'esigenza di intervenire sulle preesistenze con la tutela della loro autenticità, individuando criteri che guidano l'intervento nei casi di aggiunte di parti; per filologia si intende il complesso di indagini che mirano a riportare un testo alla sua forma originaria.



*Figura 6 Foto degli ambienti interessati dall'area di scavo archeologico*

## 4. LA CONOSCENZA ATTRAVERSO IL RILIEVO

In questo capitolo vengono esposti gli obiettivi principali del rilievo metrico e l'attività di rilievo svolta durante il periodo di Settembre 2018, indicando i requisiti necessari alla progettazione di una campagna di rilievo e gli strumenti impiegati in tale fase. Esplicitando i metodi operativi che compongono questa fase viene esposta la posizione del rilievo nei confronti della conoscenza della realtà.

ORTOFOTO DELLA FACCIATA SU GIARDINO



## 4.1 IL RILIEVO METRICO ARCHITETTONICO

Gli obiettivi principali del rilievo metrico architettonico sono quelli di definire forma e dimensione di uno spazio o di un oggetto architettonico, ed oggi è ormai consolidata la concezione che il rilevamento dei beni architettonici sia da effettuarsi attraverso l'integrazione di più metodi, come quello topografico, fotogrammetrico e laser scanner, in quanto ciò permette l'acquisizione di dati da un punto di vista sia generale che di dettaglio e, permette, ancora di fermare in maniera virtuale l'oggetto di studio a una data, ponendolo come dato certo di paragone per il futuro.

Questi diversi metodi operativi del rilievo metrico architettonico sottostanno a due aspetti fondamentali del progetto di rilevamento: l'estensione dell'oggetto da rilevare e la scala di rappresentazione degli elaborati grafici. Alla scelta di quest'ultima sono legati la precisione con la quale devono essere determinate le coordinate dei punti ed il grado di dettaglio del rilievo sul territorio.

In questo scenario nel 2009 Bryan, Blake e Bedford propongono un nuovo modello di rilievo metrico architettonico per i beni culturali, il Metric Survey<sup>32</sup>. Questo modello è caratterizzato da un'impostazione metodologica e prestazionale, fornisce una serie di indicazioni che riguardano: le norme generalmente valide in tutti i casi di rilievo; il livello di precisione attesa nel rilievo; le caratteristiche dell'archiviazione, rappresentazione e presentazione dei dati e gli standard per i rilievi image-based e topografici. Fornisce, quindi, il procedimento tecnico del rilievo dalla sua progettazione fino alla sua rappresentazione, in base alla metodologia utilizzata.<sup>33</sup>

Tali indicazioni impongono una preliminare fase di progettazione del rilievo, in cui determinato l'obiettivo e di conseguenza la scala di rappresentazione degli elaborati grafici, ovvero le finalità del rilievo, si delinea un percorso mirato di integrazione di metodi e tecniche di acquisizione dei dati, quindi si scelgono gli strumenti adatti all'ottenimento dello scopo prefissato, poiché gli strumenti stessi possiedono caratteristiche prestazionali soggettive. In definitiva dagli scopi del rilievo dipendono le metodologie di acquisizione dei dati, la scala di rappresentazione, la precisione delle misure ed il grado di dettaglio della restituzione finale.

---

<sup>32</sup> P. Bryan, B. Blake, J. Bedford, Metric Survey Specifications for Cultural Heritage, English Heritage, 2013

<sup>33</sup> G. Sammartano, Cinque terre : conservazione dell'ordinario e rischio dello straordinario : una proposta di database geografico-spaziale per il patrimonio paesaggistico di Vernazza, Politecnico di Torino, 2014

Il prodotto di tali operazioni costituisce, quindi, un insieme ordinato di dati, frutto di una attività di discretizzazione dei molteplici aspetti della realtà<sup>34</sup>, che attraverso un lavoro di conoscenza ed interpretazione trasmette modelli descrittivi, grafici e/o virtuali, in grado di divulgare la conoscenza acquisita.

Required maximum tolerance for precision of detail	
Scale	Acceptable precision
1:10	+/- 5 mm
1:20	+/- 6 mm
1:50	+/- 15 mm
1:100	+/- 30 mm
1:200	+/- 60 mm
1:500	+/- 150 mm

*Figura 7 tabella relativa alla precisione attesa in base alla scala di dettaglio scelta per la restituzione grafica del rilievo*

<sup>34</sup> Bertocci, Bini, Manuale di rilievo architettonico e urbano, Città studi edizione, 2012

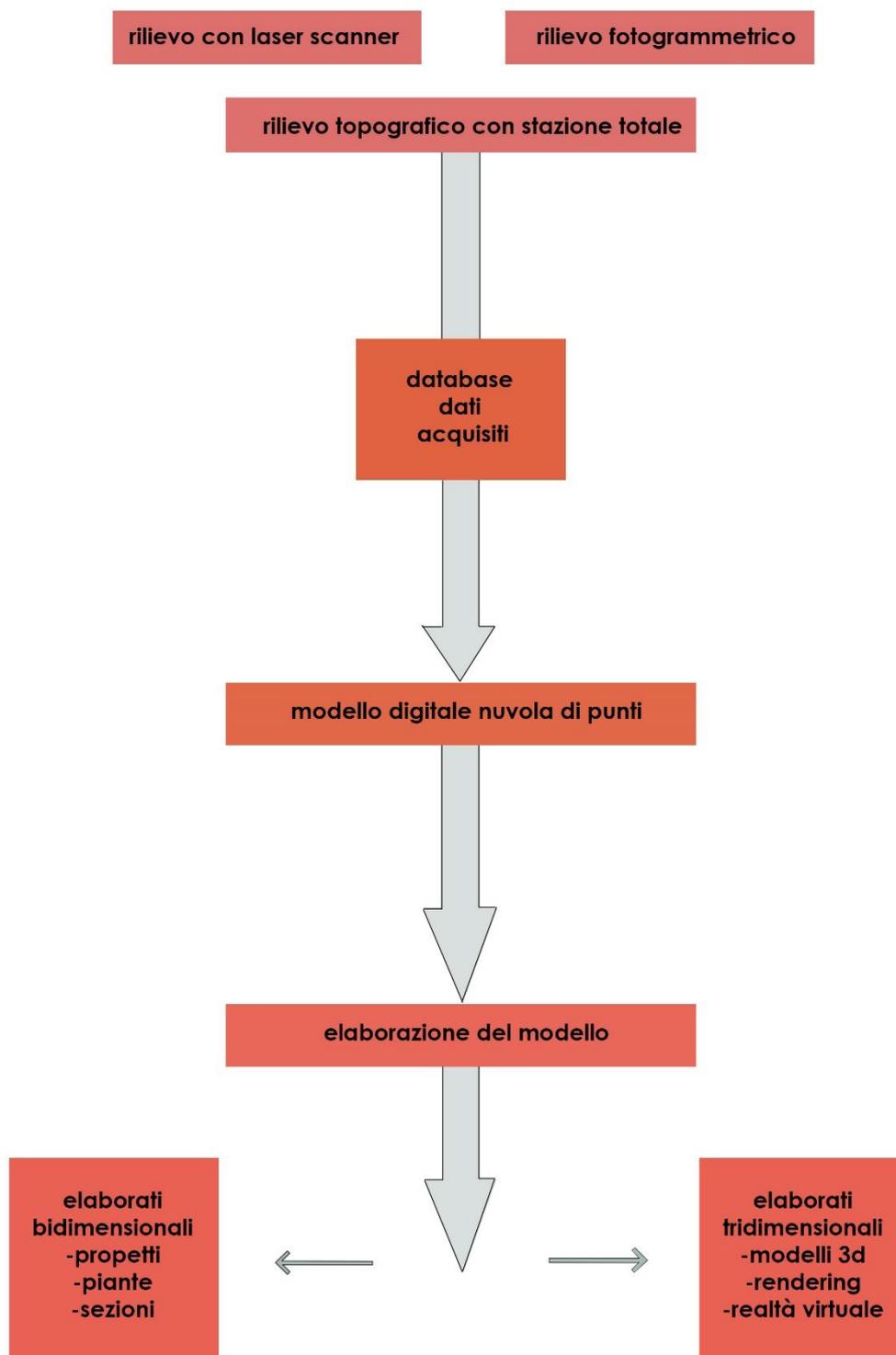


Figura 8 Organigramma per un rilievo integrato

## 4.2 LA CAMPAGNA DI RILIEVO

La campagna di rilievo, precedentemente organizzata, è avvenuta tra il 10 ed il 14 settembre 2018. In questi giorni sono stati ottenuti tutti gli elementi (dati) alla base delle elaborazioni successive. Per l'acquisizione dei dati necessari allo sviluppo del rilievo sono stati impiegati: un drone (UAV - Unmanned Aerial Vehicles o APR – Aeromobile a Pilotaggio Remoto) che ha consentito di ottenere immagini aeree; due laser scanner per il rilievo range-based della maggior parte degli spazi interni ed esterni del complesso architettonico; uno strumento di mobile mapping basato su tecnologia range-based per il rilevamento degli spazi più difficili da raggiungere tramite i laser scanner; una stazione totale utilizzata per la misura della rete topografica e per il rilievo celerimetrico ed un rilevatore satellitare GNSS per il rilevamento di alcuni vertici della rete topografica.

Durante questa fase, oltre all'acquisizione dei dati, è fondamentale elaborare alcuni schemi in cui sono indicate diverse informazioni relative all'attività di rilievo, come gli Eidotipi e le Monografie.

- Gli Eidotipi rappresentano la configurazione schematica della zona di rilievo inerente alla disposizione dei target e delle scansioni laser, in modo che in fase di elaborazione dei dati questi siano di ausilio all'operatore.
- Le Monografie dei vertici sono essenziali in quanto il loro scopo è quello di indicare con esattezza il punto in cui sono stati materializzati i vertici della rete topografica; con particolare riguardo ai rilievi reiterati nel tempo, in cui conoscere la posizione di vertici già calcolati può rivelarsi molto efficace.

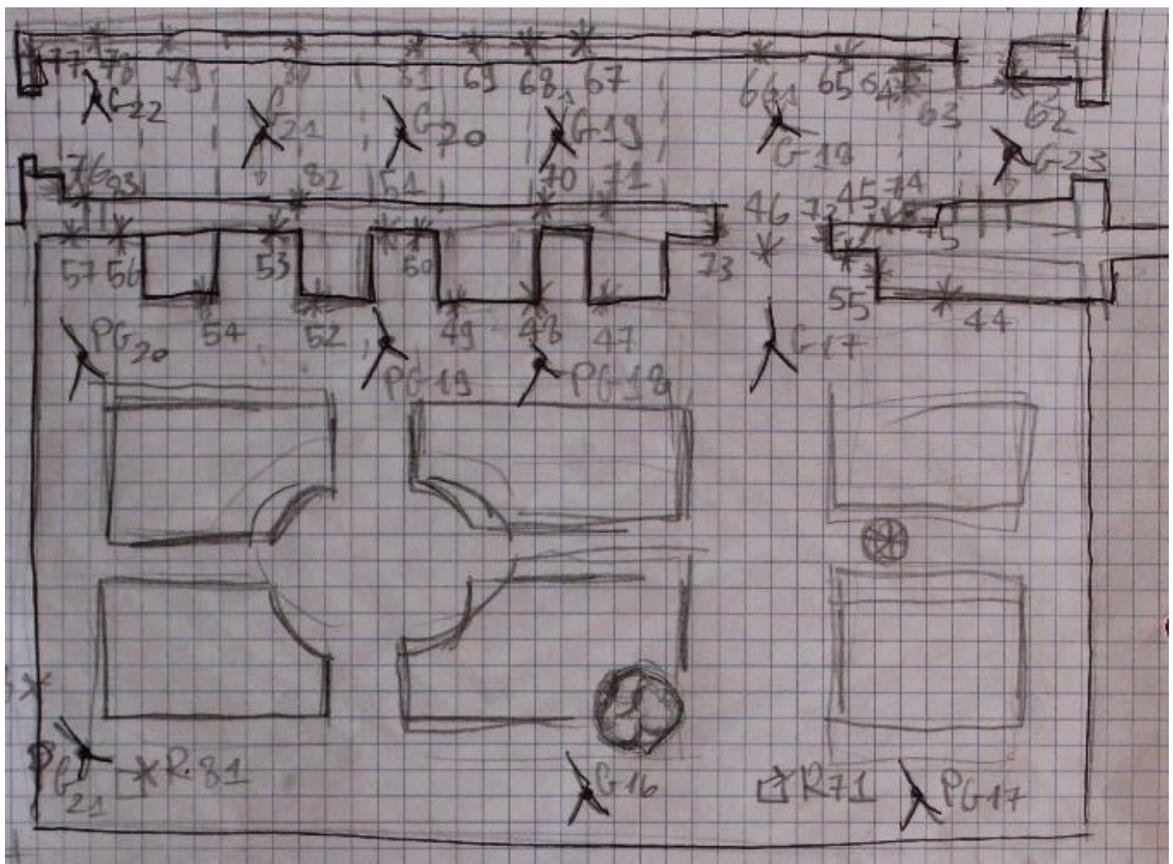
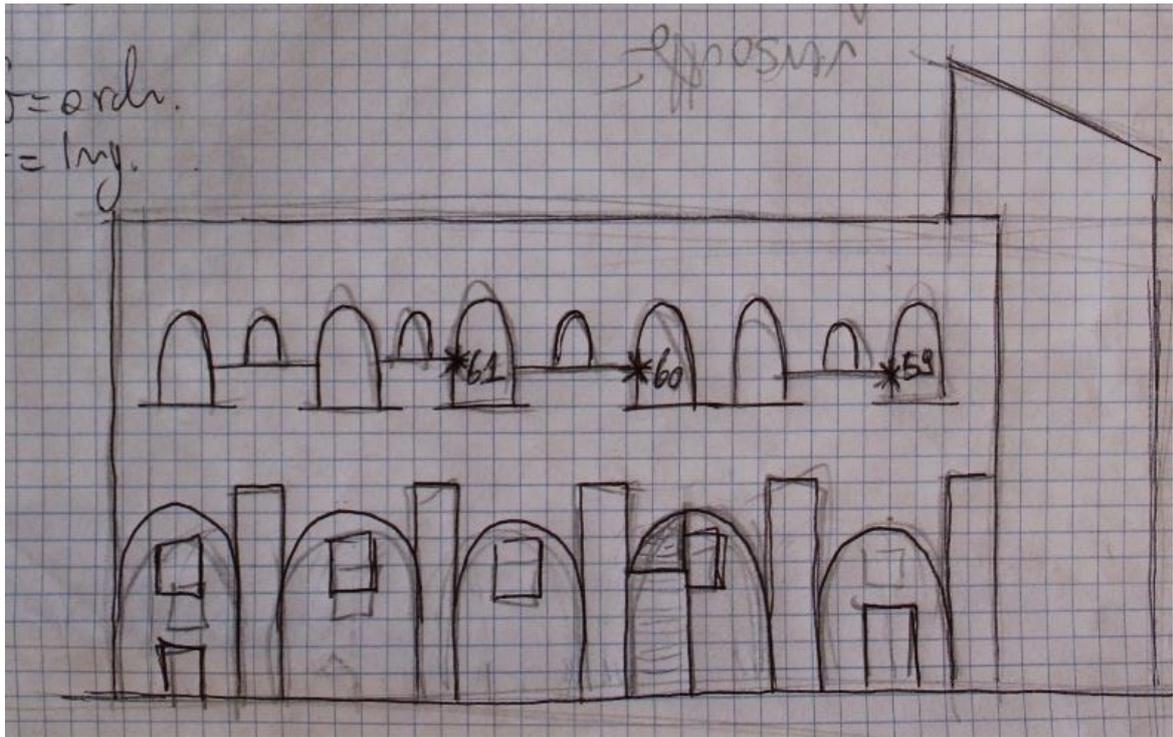


Figura 9-10 Eidotipi con indicazione di target e punti di presa delle scansioni laser, zona di rilievo: giardino e voltone

## 4.3 INQUADRAMENTO TOPOGRAFICO

In questo capitolo si intende ripercorrere le fasi riguardanti l'inquadrimento topografico; nella prima parte vengono esposti i metodi impiegati per la misura dei vertici utile alla definizione della rete topografica mentre nella seconda parte è trattata la misura dei punti noti denominati target.

VERTICE DELLA RETE TOPOGRAFICA



### 4.3.1 LA RETE TOPOGRAFICA

Il metodo di rilevamento topografico ha lo scopo di definire la posizione spaziale di un certo numero di punti distribuiti sul territorio, e dalla precisione e accuratezza di queste misure dipendono tutte le successive elaborazioni. Le fasi operative dell'inquadramento topografico sono essenzialmente due:

- La prima fase riguarda la misura della rete di inquadramento, costituita da un numero limitato di vertici distribuiti sul territorio;
- La seconda fase riguarda, invece, le misure di dettaglio, con essa si misurano i punti appartenenti all'oggetto del rilievo; ed i vertici precedentemente misurati vengono impiegati come punti di appoggio del rilievo di dettaglio.

Una parte dei punti della rete sono stati rilevati attraverso la tecnica GNSS (acronimo di Global Navigation Satellite System), in modalità statica, dunque per determinare la posizione di questi vertici è stato posizionato e messo in stazione un ricevitore satellitare per un certo periodo di tempo che ha determinato le coordinate di quei punti. Il ricevitore satellitare misura il tempo che un segnale di velocità nota emesso da un satellite impiega a raggiungere l'antenna di ricezione dello strumento. Il principale strumento utilizzato in questa fase di rilievo è la Stazione Totale, strumento che misura tre grandezze: l'angolo azimutale (angolo misurato sul piano orizzontale), l'angolo zenitale (angolo misurato sul piano verticale) e la distanza inclinata tra il proprio centro strumentale e il punto da misurare. Per poter usare correttamente lo strumento, questo viene posizionato e messo in stazione su un treppiede; lo strumento è dotato di un accessorio chiamato basetta che funge da livella tra il treppiede e lo strumento.

I vertici della rete topografica (45 in totale) sono stati distribuiti sull'intera area in cui insiste il Palazzo e prima di essere misurati sono stati materializzati adottando diverse soluzioni. Negli ambienti di maggior pregio del Palazzo è stato utilizzato del nastro carta, in cui è stata tracciata una croce, per preservare la pavimentazione storica, come nel caso dello Studiolo. Mentre nelle zone esterne sono stati impiegati dei chiodini, laddove fosse permesso, come per il vertice R10, o in altri casi sono stati scelti dei punti naturali, come per i vertici misurati nel giardino R7 e R8, in cui il terreno instabile non assicurava una misurazione attendibile. Queste accortezze assolvono ad una duplice funzione: evitare un intervento invasivo che potrebbe causare danni

alla struttura e permettere il facile riconoscimento del vertice, al fine di ottenere una misura il più attendibile possibile.



*Figura 10 Stazione GNSS durante il rilevamento del vertice topografico R8*



*Figura 11 Materializzazione del vertice topografico R10 attraverso chiodino*

## COORDINATE DEI VERTICI MISURATI

NOME VERTICE	X (m)	Y (m)	Z (m)
R1	100,000	100,000	100,000
R2	71,076	100,000	91,197
R3	109,420	124,343	97,625
R4	108,165	136,158	97,639
R5	127,951	109,618	115,537
R6	117,752	143,275	110,823
R7	82,006	148,525	90,968
R8	79,633	138,792	90,786
R9	72,560	114,573	90,720
R10	92,868	125,867	97,846
R11	102,930	141,744	97,855
R13	87,696	107,532	97,819
R14	81,052	109,171	97,791
R15	83,174	117,367	97,763
R16	84,005	121,683	97,776
R17	87,548	120,892	97,765
R18	88,301	127,386	97,936
R19	91,485	137,555	97,950
R20	81,247	137,973	97,927
R21	76,845	146,231	97,818
R22	67,679	113,295	97,937
R23	70,508	107,854	97,910
R24	78,922	105,823	97,837
R25	83,055	105,097	97,825
R26	123,274	138,507	101,664
R27	122,816	134,831	102,203
R28	114,494	136,817	104,867
R29	110,995	122,836	104,868
R30	110,502	115,157	104,887
R31	109,956	110,020	104,892
R32	92,431	113,463	104,890
R33	80,747	119,251	105,010
R34	81,754	122,402	105,002
R35	83,098	129,581	105,003
R36	84,773	136,095	105,048
R37	86,072	141,551	105,050
R38	96,395	139,999	104,898
R39	104,551	139,000	104,877
R40	114,722	139,146	104,864
R41	115,941	122,447	104,976
R42	115,359	118,780	104,980
R71	48,189	119,843	90,155
R81	51,656	140,784	90,137
RI1	129,394	127,470	115,120
RI2	129,718	140,633	114,681

### 4.3.2 IL RILIEVO CELERIMETRICO

In questa fase sono stati posizionati, sulla superficie dell'oggetto da rilevare, e poi misurati attraverso la stazione totale una serie di punti noti chiamati target. Sono stati impiegati dei target di carta a scacchiera, numerati; questo schema permette una facile collimazione sia in fase di misura che in fase di registrazione delle scansioni lidar. Questi sono stati distribuiti in maniera omogenea su gran parte della superficie del Palazzo, in modo che in fase di registrazione siano visibili nel maggior numero possibile di scansioni. I target così disposti sono stati misurati mediante l'utilizzo della Stazione Totale, in totale sono stati misurati circa 412 target e molti di questi sono stati registrati da più vertici. Mentre i target posizionati ma non rilevati sono stati comunque riportati sugli eidotipi realizzati durante il rilievo. Questa fase risulta importante poiché la misura di tali coordinate permette di rototraslare, in un unico sistema di riferimento globale, le nuvole di punti lidar successivamente elaborate. Detto ciò un'accurata disposizione dei target permette una più facile ed accurata fase di registrazione delle scansioni. I target rappresentano, dunque, dei punti di controllo noti, ovvero di cui si conoscono le proprie coordinate rispetto al sistema di riferimento scelto.

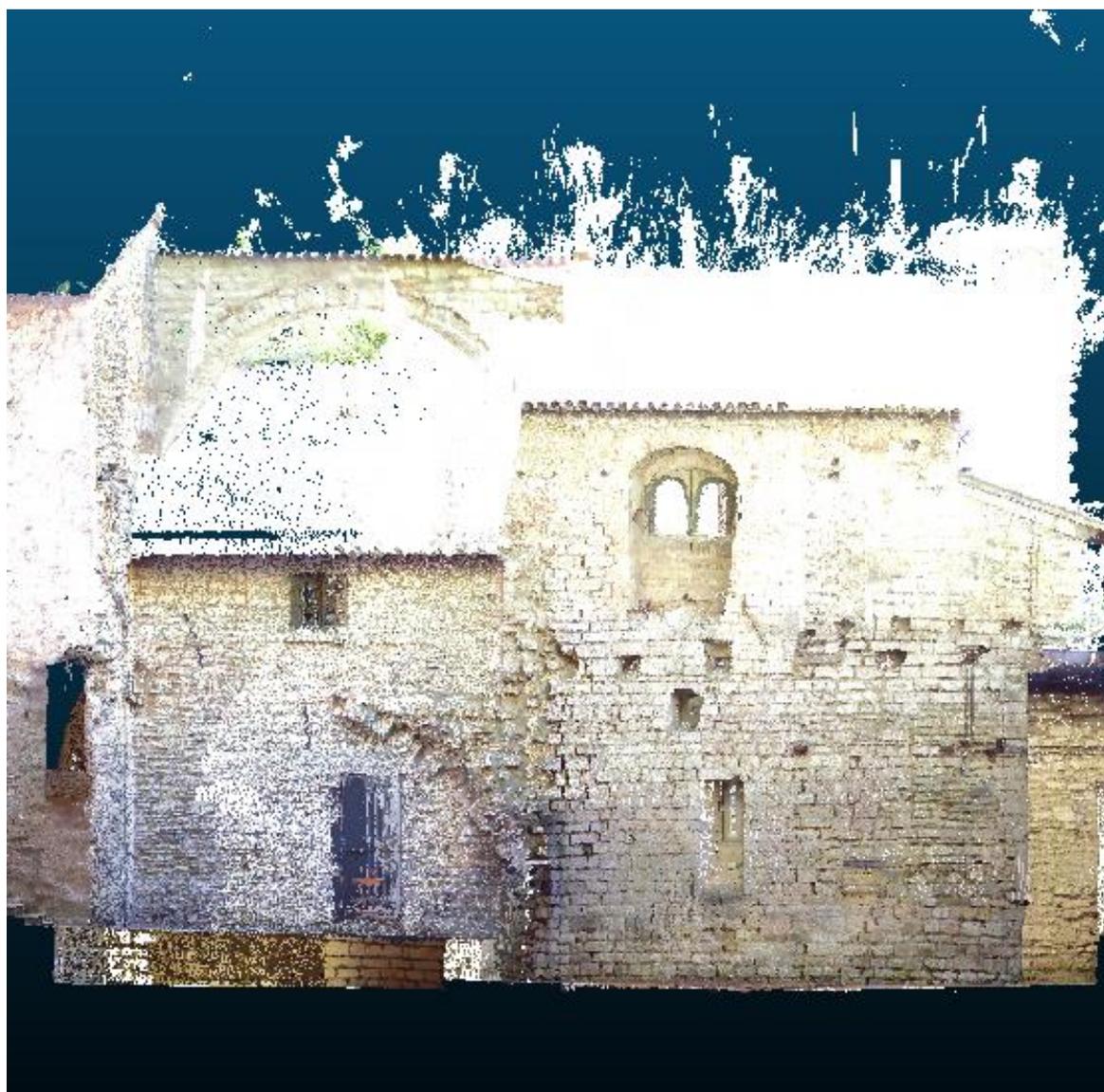


*Figura 12* Disposizione del target a scacchiera n. 100 sulla cornice di una porta interna

## 4.4 TECNOLOGIA LIDAR

In questo capitolo vengono ripercorsi i principali procedimenti effettuati a partire dall'acquisizione delle scansioni fino alla loro registrazione ed elaborazione attraverso i software dedicati. Nella prima parte del capitolo si parla dell'acquisizione delle scansioni e delle caratteristiche dello strumento impiegato; nella seconda parte invece viene ripercorso il procedimento di registrazione dei dati e vengono esposti i principali risultati ottenuti; mentre nella terza parte viene esposto il processo di riduzione del rumore delle nuvole di punti precedentemente registrate.

NUVOLA DI PUNTI PRIMITIVO PALAZZO COMUNALE



#### 4.4.1 ACQUIZIONE DELLE SCANSIONI LASER

Quando si utilizzano sistemi a scansione è necessario prevedere una fase di progettazione delle operazioni al fine di permettere di sfruttare a pieno la strumentazione utilizzata. Le prime attenzioni devono riguardare le precisioni che si devono ottenere e i prodotti che si devono restituire, che dipendono dallo scopo per cui viene fatto il rilievo; il tempo di esecuzione delle scansioni stesse; le caratteristiche dello strumento e le condizioni ambientali nelle quali si esegue il rilievo. Dunque, gli aspetti principali che si devono considerare sono:

- Copertura dell'intero oggetto rilevato;
- Documentazione dell'oggetto rilevato con il giusto livello di dettaglio;

In questa fase si sono utilizzati due laser scanner Faro Focus 120S che hanno permesso di acquisire 142 scansioni tra i giorni 10 e 14 settembre 2018. Nei primi due giorni sono state eseguite scansioni all'esterno del Palazzo; ottenute queste si è provveduto ad acquisire scansioni all'interno, limitandosi al piano terra ed al piano primo, che rappresentano gli spazi più comodi da raggiungere con tale strumentazione. Tutte le scansioni sono state acquisite in modo da evitare zone d'ombra ovvero zone in cui non si sono raccolti dati, ed in modo che le scansioni tra loro abbiano una certa sovrapposizione, quindi una ridondanza del dato rilevato che permette durante la fase di registrazione delle scansioni un overlap di una porzione tale da garantire il ritrovamento automatico di una serie di punti comuni alle scansioni.

Detto ciò, prima di avviare una scansione va effettuata la messa in stazione dello strumento montato su di un cavalletto e vanno impostati i parametri di scansione come risoluzione e qualità. Si sono impostati perciò una risoluzione di 1/5 e una qualità di 4x, che hanno generato una scansione con una durata di circa 8:54 minuti ed una dimensione di 8192x3414 (Pt). Gli strumenti utilizzati sono dotati anche di una fotocamera interna che permette di acquisire immagini della superficie rilevata e che associa ad ogni punto acquisito la radiometria rilevata, quindi per ogni misurazione, oltre alle coordinate cartesiane (x, y, z), lo strumento fornisce l'intensità del segnale di ritorno e definisce la risposta radiometrica della superficie rilevata (x,y,z). Durante la fase di scansione è stato importante (e utile per la successiva fase

di registrazione) annotare informazioni come la disposizione delle scansioni nello spazio, il nome con cui vengono registrate dallo strumento ed i target ripresi tramite l'elaborazione degli eidotipi.

Il risultato di una scansione può essere considerato come una serie di informazioni, ovvero nuvole di punti di coordinate note che descrivono la superficie dell'oggetto scansionato, ai quali è associato un valore di riflettività, a partire dalle quali deve iniziare una fase intelligente di interpretazione e codifica dell'informazione.<sup>35</sup>

Caratteristiche dello strumento impiegato:

- Peso: 5 kg
- Raggio d'azione: 153,49 m
- Range Indoor/outdoor con poca luce ambientale: 0,6 m/120 m
- Velocità di misura: 976.000 punti/sec
- Risoluzione fotocamera integrata: 70 Megapixel
- Margine di errore: circa 2 mm



Figura 13 Laser Scanner Faro Focus

---

<sup>35</sup> F. Sacerdote, G. Tucci, Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio, Alinea, 2007



*Figura 14 Fase di settaggio dello strumento*



*Figura 15 Strumentazione durante l'acquisizione di una scansione*

## 4.4.2 REGISTRAZIONE DELLE SCANSIONI LASER

La possibilità offerta dal laser scanner di posizionare un punto nello spazio con una precisione elevata (da  $\pm 3$  mm a  $\pm 7$  mm per i laser distanziometrici) è un aspetto di fondamentale importanza, che però può essere rovinato da una procedura di registrazione e restituzione non adeguata. Avendo operato durante la fase di rilievo con più stazioni di presa, ognuna delle quali riferita ad un particolare sistema di riferimento locale arbitrariamente orientato ha implicato che le nuvole di punti risultanti, dalle singole scansioni, sono fra loro indipendenti e prive di una relazione geometrica nota. Pertanto, in fase di registrazione è indispensabile ricostruire il legame geometrico tra le nuvole di punti rilevate, che dovranno successivamente essere georeferenziate rispetto ad un unico sistema di riferimento predefinito, introducendo inevitabilmente, per effetto dell'incertezza di posizionamento dei punti, ulteriori approssimazioni. Perché queste molteplici prese possano essere ricomposte tra loro è necessaria la definizione di una serie di elementi comuni di collocazione certa, ovvero i punti noti (target) misurati attraverso la stazione totale.

La registrazione delle scansioni è stata organizzata in base alla loro posizione di presa rispetto all'intero oggetto del rilievo, il Palazzo. Si è scelto, quindi, di registrare le scansioni in quattro progetti differenti, in modo da non appesantire troppo il software e rallentare di conseguenza le elaborazioni. Per svolgere questo processo è stato usato il software FARO® SCENE<sup>36</sup>, un programma in grado di elaborare e registrare i dati di scansione. Per ricostruire la relazione geometrica delle scansioni, come già detto sono stati strutturati quattro progetti differenti contenenti i dati rilevati dallo scanner, suddivisi in macro-zone che compongono l'intero complesso architettonico, principalmente suddivise in zone esterne e zone interne.

---

<sup>36</sup> Il software SCENE è stato ideato in specifico per tutti i laser scanner Focus, gestisce i dati di scansione utilizzando la registrazione in loco in tempo reale, il riconoscimento automatico dell'oggetto, la registrazione della scansione e il posizionamento; incorpora immagini dal posizionamento automatico delle scansioni con o senza target.

Questa procedura di registrazione può essere divisa in quattro principali fasi:

- Caricamento delle scansioni
- Applicazione del colore (radiometria) alle scansioni
- Allineamento per forma (cloud to cloud)
- Allineamento per target

#### FASE 1\_CARICAMENTO DELLE SCANSIONI

##### Progetto n.1\_ESTERNO PALAZZO DUCALE 47 SCANSIONI

Sono state elaborate tutte le scansioni esterne al Palazzo, comprese quelle del passo carrabile adiacente al giardino detto “il voltone” e quelle del cortile interno. All’interno del progetto, la presenza di numerose scansioni, ha comportato la creazione di diverse cartelle in cui suddividere in ulteriori microzone le scansioni: Cortile, Giardino, Esterno, Loggia e Nord.

##### Progetto n.2\_PALAZZO COMUNALE VECCHIO 15 SCANSIONI

Sono state elaborate tutte le scansioni eseguite nello scavo archeologico riguardante il vecchio Palazzo Comunale, a monte dell’attuale Palazzo Ducale. In questo caso il numero esiguo di scansioni ha permesso di lavorare senza suddividere ulteriormente il progetto in cartelle.

##### Progetto n.3\_PIANO TERRA 35 SCANSIONI

Sono state elaborate tutte le scansioni eseguite nei locali interni del piano terra. Anche in questo caso la presenza di molte scansioni ha portato alla suddivisione del progetto in diverse cartelle di lavoro rappresentanti tre microzone: Salone, Stanze, Studiolo.

##### Progetto n.4\_PIANO PRIMO 30 SCANSIONI

Sono state elaborate le scansioni eseguite nei locali interni del piano primo. Sono state create all’interno del progetto delle cartelle per dividere le scansioni tra loro: Bagno, Corridoio, Salone, Stanze.

#### FASE 2\_APPLICAZIONE DEL COLORE ALLE SCANSIONI

In questa fase si procede con l’applicazione della radiometria rilevata dallo scanner, ciò permette una più facile e veloce fase di allineamento per forma, poiché il colore applicato alla nuvola di punti rende più leggibile gli elementi che permettono l’allineamento.

### FASE 3\_ALLINEAMENTO PER FORMA (CLOUD TO CLOUD)

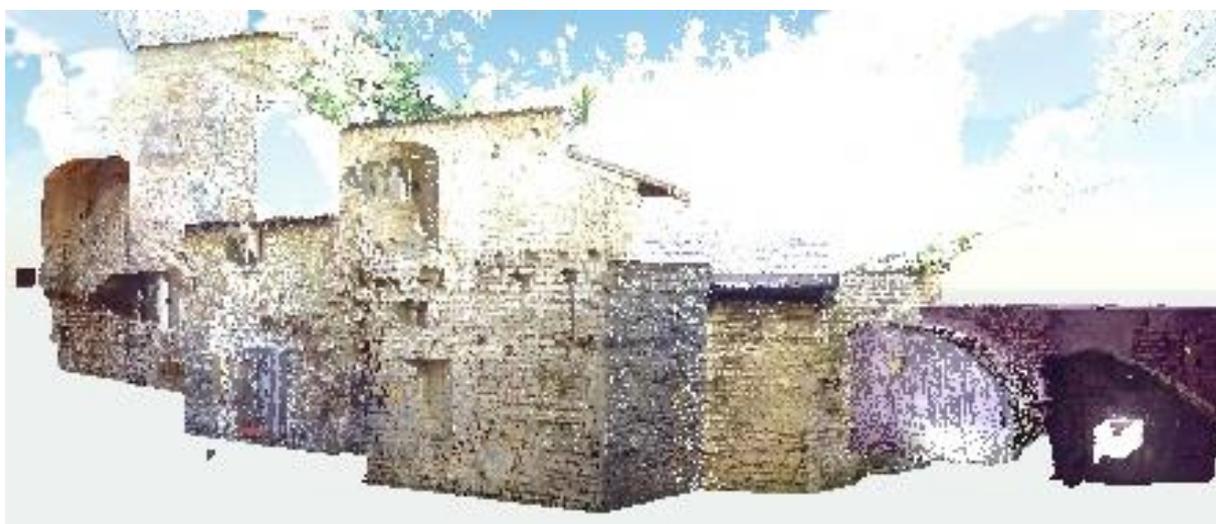
L'allineamento avviene cercando di avvicinare le nuvole tra loro riconoscendo manualmente i punti naturali in comune tra le scansioni, in questo modo si tenta di ricostruire la geometria dello spazio rilevato. Il risultato di questa prima fase è quello di ricostruire il legame geometrico tra le scansioni, il vantaggio di questa operazione è che il software utilizza tutti i punti della nuvola per eseguire la registrazione. L'allineamento avviene quindi grazie al ricoprimento reciproco delle scansioni. Questo processo comporta una serie di approssimazioni dette *errore di registrazione*, che il software calcola, verificato che questi scarti non siano troppo alti e che quindi il risultato sia soddisfacente, rispetto allo scopo prefissato, si procede con la fase successiva. In questa fase le scansioni risultano allineate in un sistema locale di coordinate.

### FASE 4\_ALLINEAMENTO PER TARGET

Una volta bloccate le scansioni allineate per forma si procede con il riconoscimento e la collimazione dei target, in questa fase tornano di ausilio gli eidotipi prodotti in fase di campagna ed a questo punto si inserisce il file contenente le coordinate nel workspace del programma. Perché questa fase sia positiva è necessario che per ogni scansione siano visibili almeno tre target. Questo processo di registrazione permette la rototraslazione delle nuvole di punti nel sistema di riferimento globale e comporta ulteriori errori di registrazione ovvero approssimazioni rispetto alla precisione dei dati rilevati. In seguito alla trasformazione, durante la quale la posizione di ciascun target viene fatta coincidere alla posizione misurata per via topografica e calcolata nell'unico sistema di riferimento, è possibile visualizzare una finestra di report che riporta gli scarti prodotti dalla trasformazione.



*Figura 16 Nuvola di punti Progetto\_1*



*Figura 17 Nuvola di punti Progetto\_2*



Figura 18 Nuvola di punti Progetto\_3

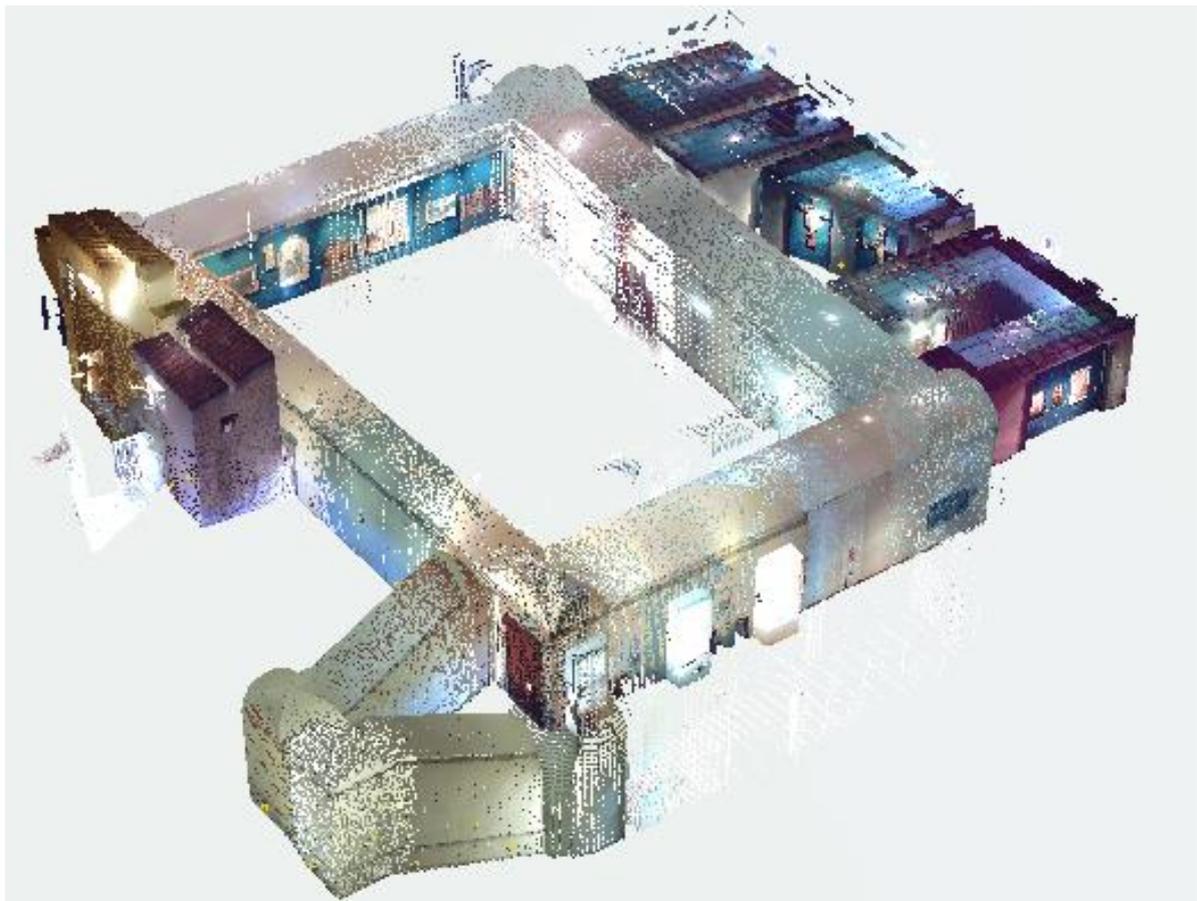


Figura 19 Nuvola di punti Progetto\_4

TABELLA RIEPILOGATIVA DEGLI ERRORI DI REGISTRAZIONE

PROGETTO N.1 ESTERNO P. DUCALE	N. SCANSIONI	ERRORI REGISTRAZIONE PER FORMA	ERRORI REGISTRAZIONE PER TARGET
CORTILE	10	2.09 mm < 4 mm: 75.9%	media 3.75 mm
ESTERNO	11	3.19 mm < 4 mm: 61.0%	media 5.05 mm
GIARDINO	13	2.56 mm < 4 mm: 67.6%	media 4.13 mm
LOGGIA	8	1.62 mm < 4 mm: 80.3%	media 3.72 mm
NORD	5	3.70 mm < 4 mm: 53.9%	media 3.62 mm

PROGETTO N.2 PALAZZO C. VECCHIO	N. SCANSIONI	ERRORI REG. PER FORMA	ERRORI REG. PER TARGET
PALAZZO VECCHIO	15	1.73 mm < 4 mm: 77.5%	media 3.12 mm

PROGETTO N.3 PIANO TERRA	N. SCANSIONI	ERRORI REG. PER FORMA	ERRORI REG. PER TARGET
SALONE	10	2.61 mm < 4 mm: 66.3%	media 3.54 mm
STANZE	21	1.68 mm < 4 mm: 78.6%	media 3.93 mm
STUDIOLO	4	1.59 mm < 4 mm: 84.3%	media 3.16 mm

PROGETTO N.4 PIANO PRIMO	N. SCANSIONI	ERRORI REG. PER FORMA	ERRORI REG. PER TARGET
BAGNO	3	1.42 mm < 4 mm: 79.2%	media 3.00 mm
CORRIDOIO	13	1.87 mm < 4 mm: 78.0%	media 3.88 mm
SCALONE	6	1.41 mm < 4 mm: 89.9%	media 3.22 mm
STANZE	8	1.42 mm < 4 mm: 80.7%	media 3.52 mm

Questa tabella restituisce la precisione con la quale sono stati elaborati i dati in laboratorio, ovvero gli errori di registrazione delle nuvole di punti. Ma un rilievo può dirsi accurato quando la posizione dei punti restituiti è vicina alla posizione reale. Per questa ragione si è cercato di misurare l'accuratezza del rilievo lidar: alcuni punti di controllo (target) sono stati usati per georeferenziare e rototraslare il modello generato dalle nuvole di punti lidar; generato il modello si usano le coordinate di altri punti di controllo, non usati precedentemente, per verificare quanto si discostano dalle coordinate dell'oggetto reale gli stessi punti elaborati dal software.

## ACCURATEZZA DEL RILIEVO

PROGETTO N.2 PALAZZO VECCHIO	COORDINATE DELL'OGGETTO REALE	COORDINATE ELABORATE DAL SOFTWARE
TARGET N. 205	X: 122,757 Y: 95,769 Z: 107,227	X: 122.759 Y: 95.764 Z: 107.227
TARGET N. 209	X: 122,802 Y: 103,459 Z: 106,214	X: 122.792 Y: 103.456 Z: 106.212
TARGET N. 217	X: 124,101 Y: 114,475 Z: 105,473	X: 124.101 Y: 114.478 Z: 105.470
TARGET N. 219	X: 123,905 Y: 120,222 Z: 105,834	X: 123.907 Y: 120.224 Z: 105.833
TARGET N. 222	X: 121,547 Y: 115,058 Z: 105,535	X: 121.549 Y: 115.058 Z: 105.534
TARGET N. 224	X: 118,654 Y: 115,521 Z: 107,944	X: 118.651 Y: 115.523 Z: 107.947
TARGET N. 225	X: 116,236 Y: 114,827 Z: 106,158	X: 116.233 Y: 114.825 Z: 106.152
TARGET N. 232	X: 121,635 Y: 122,603 Z: 106,108	X: 121.632 Y: 122.605 Z: 106.109

Per misurare l'accuratezza è stato scelto il Progetto n.2 come campione dei dati elaborati e, come si può notare la differenza delle coordinate dei punti di controllo (ovvero i punti che appartengono alla nuvola di punti elaborata) rispetto alle coordinate reali rimane nell'ordine di 2-3 mm.

Il prodotto finale ottenuto da queste elaborazioni è una nuvola di punti completa che rappresenta il punto di inizio di un processo volto all'interpretazione dei dati rilevati. Infatti, queste nuvole di punti rappresentano la base per le diverse applicazioni e analisi che si possono svolgere su un oggetto architettonico storico come il Palazzo Ducale di Gubbio, come l'interpretazione e di conseguenza la vettorializzazione e la restituzione grafica degli elementi rilevati.

### 4.4.3 ELABORAZIONE DELLA NUVOLA DI PUNTI

Per elaborazione della nuvola di punti georeferenziata si intende un processo capace di interpretare le informazioni rilevate. Le fasi principali di tale processo sono:

- Importazione nuvola di punti georeferenziata;
- Decimazione della nuvola;
- Ripulitura della nuvola e rimozione di punti indesiderati;

Le nuvole di punti derivate dalle elaborazioni eseguite in FARO® SCENE sono state esportate dal software nel formato .las<sup>37</sup>, questa estensione permette di leggere le nuvole di punti su un altro software specifico 3DReshaper. In questo momento le nuvole importate su 3DR vengono prima decimate, poiché lo strumento utilizzato acquisisce punti ridondanti, che appesantiscono le elaborazioni. Dunque, è stato applicato alle nuvole di punti un filtro di 1cm in modo da snellire, senza perdere informazioni utili, la nuvola di punti. Successivamente si è proceduto alla rimozione di quei punti inutili ai fini dello studio del Palazzo. Questi punti indesiderati sono stati selezionati manualmente e di conseguenza cancellati. Una volta effettuate tali operazioni si dispone di nuvole di punti più snelle e quindi è stato possibile integrare tutti i progetti elaborati separatamente nella fase precedente. A questo punto è possibile osservare tutte le nuvole di punti, georeferenziate, in un unico progetto. Tale fase, dunque, permette una prima interpretazione del manufatto che consente di verificarne tutte le parti, rilevate, che lo compongono.

---

<sup>37</sup> Il file LAS è un LIDAR Data Exchange File

DIMENSIONE NUVOLE DI PUNTI LIDAR DOPO APPLICAZIONE DEL FILTRO 1CM

NUVOLA DI PUNTI	DIMENSIONE ORIGINALE	DIMENSIONE DOPO FILTRO
PROGETTO N.1 ESTERNO	349.581.870 pt	145.217.020 pt
PROGETTO N.2 PALAZZO VECCHIO	87.690.783 pt	17.458.603 pt
PROGETTO N.3 PIANO TERRA	235.571.802 pt	52.931.793 pt
PROGETTO N.4 PIANO PRIMO	286.904.607 pt	50.414.631 pt

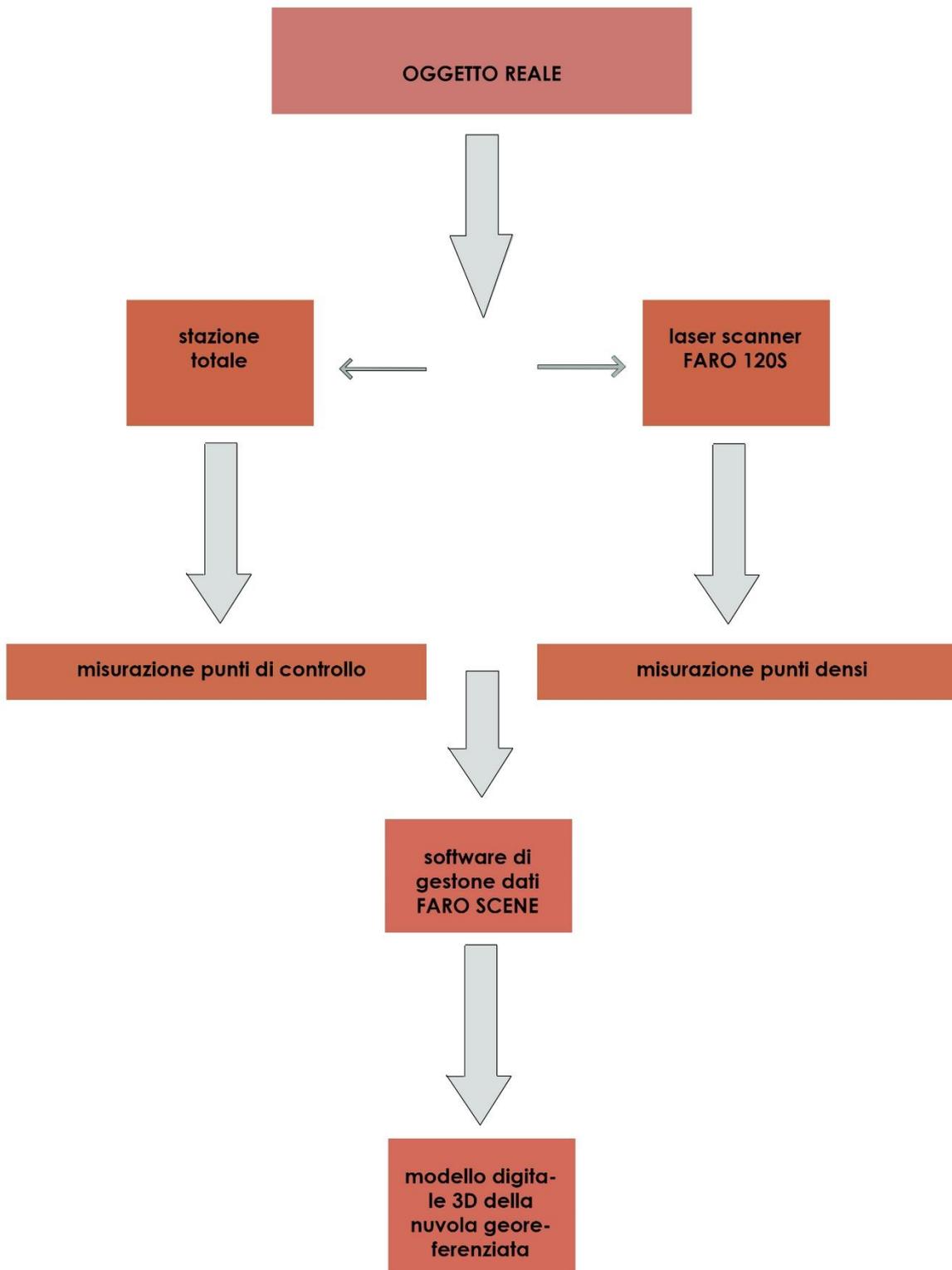


Figura 20 Organigramma della fase di rilievo e successiva elaborazione

## 4.5 FOTOGRAMMETRIA UAV

In questo capitolo vengono ripercorsi i principali procedimenti effettuati a partire dall'acquisizione dei fotogrammi fino alla loro elaborazione sul software Photoscan. Nella prima parte del capitolo si parla della fotogrammetria aerea esplicitando gli aspetti che la caratterizzano; nella seconda parte invece viene ripercorso il procedimento di elaborazione dei dati e vengono esposti i principali risultati ottenuti.

ORTOFOTO DELL'AREA OGGETTO DI STUDIO



## 4.5 FOTOGRAMMETRIA UAV

Nell'ambito della Geomatica la fotogrammetria è diventata una tecnica fondamentale e consolidata nei processi di rilievo indiretto. La fotografia, infatti, si è imposta come soluzione per registrare il reale accompagnata dal rilievo tramite stazione totale o GPS di alcuni punti per introdurre un'unità di misura all'interno della scena modellata. Questa tecnica di rilievo permette di estrarre dai dati acquisiti le informazioni capaci di descrivere le forme architettoniche e di rappresentarle in funzione di archiviazione, analisi e valorizzazione. Per definizione infatti la fotogrammetria è la scienza utile a determinare la posizione e la forma degli oggetti a partire da fotografie.

La fotogrammetria da dispositivi aerei (UAV - *Unmanned Aerial Vehicle*) ovvero da droni con fotocamera integrata, pilotati sia in remoto che in manuale viene oggi sempre più utilizzata nel campo della documentazione del patrimonio costruito grazie all'elevata quantità e dalla tipologia di dati che permette di acquisire in un tempo ristretto. La fotogrammetria aerea, come quella terrestre, si basa sull'overlapping, condizione in cui la parte di oggetto fotografata appare su almeno due fotogrammi differenti. Nelle applicazioni di fotogrammetria UAV si mira a rilevare anche gli alzati, per questo si effettuano dei voli circolari con la fotocamera inclinata a 45°.



Figura 21 fotogramma acquisito tramite volo circolare

## 4.5.1 ACQUISIZIONE DEI FOTOGRAMMI

In questa fase è stato impiegato un drone DJI MAVIC PRO che ha permesso di acquisire un dataset di fotogrammi il più completo possibile nei giorni 10 e 11 settembre 2018. In questi giorni sono stati acquisiti fotogrammi nadirali, inclinati a 45° e circolari con voli che interessavano le coperture e gli alzati del Palazzo e del contesto più prossimo. Inoltre, è stato possibile, grazie alla piccola dimensione dello strumento, acquisire fotogrammi da una distanza ravvicinata di alcuni alzati come l'ingresso al Palazzo, l'alzato che si affaccia sul giardino e quello della zona retrostante al Palazzo, situato oltre il "voltone".

Caratteristiche dello strumento impiegato

Drone DJI MAVIC PRO

- Tipologia: Tetrarotore
- Rotori: 4 motori
- Peso massimo con equipaggiamento: 0,743 kg
- Lunghezza: 19,8 cm
- Altezza: 8,3 cm
- Velocità massima orizzontale: 65 km/h
- Velocità massima verticale: 5 m/s
- Diametro Eliche: 7,6 inches

Caratteristiche Fotocamera

- Fotocamera: 1/2.3" CMOS a 12 MP-4K
- Distanza focale: 4,73 mm
- Dimensione pixel sensore: 1,61  $\mu\text{m}$
- Risoluzione immagine: 3840x2160 px



Figura 22 drone DJI MAVIC PRO

## 4.5.2 ELABORAZIONE DATI FOTOGRAMMETRICI

La fase preliminare all'elaborazione è una fase selettiva, in cui dalla mole di dati acquisiti si scelgono e si migliorano i fotogrammi. In questa fase è stato necessario schiarire alcuni fotogrammi acquisiti che risultavano troppo scuri. Una volta scelti i fotogrammi utili alle successive elaborazioni si è passato all'inserimento dei dataset nel software di fotogrammetria *Agisoft Photoscan*.

Al fine di ottimizzare le elaborazioni si è deciso di suddividere l'intero lavoro in due progetti differenti; il primo ha riguardato l'elaborazione dei fotogrammi aerei nadirali, circolari ed inclinati dell'intera area ricoperta dall'oggetto di studio, il secondo, elaborato successivamente, ha riguardato l'elaborazione dei principali fronti del complesso. Per entrambi i progetti si sono seguite le stesse indicazioni, ed hanno sostenuto le stesse elaborazioni.

I sistemi *Structure-from-motion* (SfM)<sup>38</sup> permettono di stimare la posizione 3D di punti rappresentati in molteplici immagini, ricostruendo la geometria dell'oggetto rappresentato (*structure*) e la posizione delle prese (*motion*). Detto ciò il primo passaggio eseguito per entrambi i progetti è stato quello di ottenere un'iniziale allineamento dei fotogrammi che genera una nuvola di punti rada (Point Cloud); in questa fase i parametri di orientamento non sono ancora noti.



Figura 23 Esempio fotogramma schiarito

<sup>38</sup> è una tecnica di range imaging della computer vision e della percezione visiva

## PROGETTO N.1

Prima di eseguire l'allineamento il progetto è stato suddiviso in tre chunks contenenti rispettivamente i fotogrammi nadirali, inclinati e circolari (per tale motivo ogni processo è stato ripetuto per ogni chunk). Eseguito il primo allineamento il software ha riconosciuto un numero pari a 694.415 di punti e ha permesso di visualizzare la distribuzione spaziale di questi stessi punti. Il secondo step ha riguardato l'inserimento delle coordinate dei marker aerei rilevati durante la campagna di rilievo. Queste coordinate vengono riconosciute su tutti i fotogrammi in cui sono visibili i marker; con questa operazione la nuvola di punta rada subisce una rototraslazione nel sistema di riferimento prescelto. In questo momento il software introduce degli errori di carattere geometrico. Una volta affinato questo errore, attraverso il riconoscimento manuale dei markers, si passa alla generazione della nuvola densa (Dense Cloud). Il risultato di questa operazione è l'ottenimento di tre nuvole di punti dense, a questo punto i tre chunk sono stati uniti in unica cartella di lavoro. Ultimati questi processi è stato possibile elaborare la mesh (poligonizzazione della nuvola densa) ottenendo un modello solido della superficie rilevata, e la texture, processo che consiste nella distribuzione delle informazioni cromatiche provenienti dai diversi fotogrammi alla mesh.

## RISULTATI

CHUNK	FOTO	MARKER	TIE POINTS	ERRORE (m)	ERRORE (pix)	G.R*
CHUNCK1	511	12	694.415	0.014751	0.728	1,85 mm/px

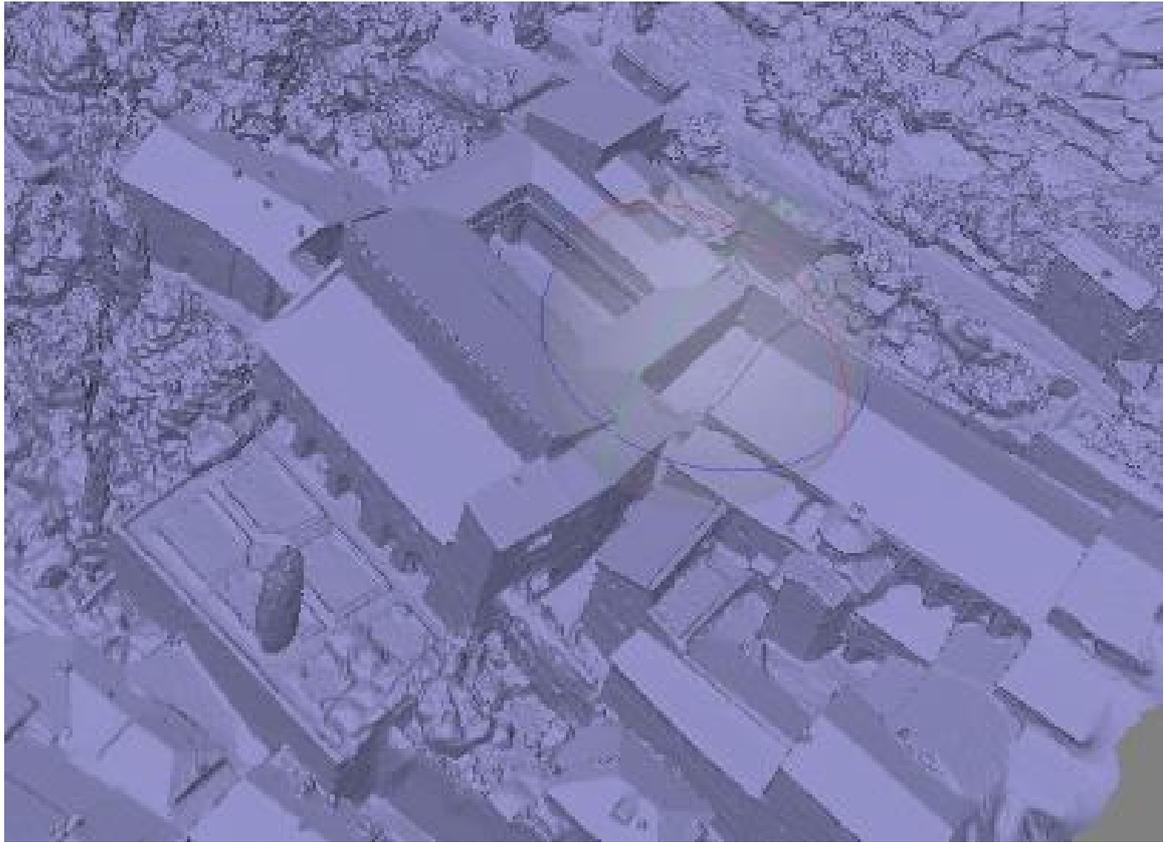
G.R\* Ground Resolution



*Figura 24 Nuvola Rada, 694.415 points*



*Figura 25 Nuvola di punti Densa, 16.846.365 points, Processing: Medium quality*



*Figura 26 Mesh modello poligonale, 3.297.242 faces*



*Figura 27 Modello texturizzato*

## PROGETTO N.2

Il progetto è stato inizialmente suddiviso in tre chunks contenenti rispettivamente i fotogrammi riguardanti le tre zone rilevate in dettaglio. Anche in questo caso i processi sono stati ripetuti per tutti i chunk. Eseguito il primo allineamento il software ha riconosciuto un numero elevato di punti ed ha permesso di visualizzare la distruzione spaziale di questi. Il secondo step ha riguardato l'inserimento delle coordinate dei marker terrestri rilevati con stazione totale. Una volta riconosciute, le coordinate, su tutti i fotogrammi in cui sono visibili i marker la nuvola di punti rada subisce una rototraslazione nel sistema di riferimento scelto. Affinato l'errore geometrico riconoscendo manualmente i marker su ogni fotogramma si genera la nuvola densa. A differenza del progetto elaborato precedentemente i tre chunks non sono stati uniti poiché comprendono tre zone differenti. Quindi per ogni chunk si è provveduto all'elaborazione della mesh e successivamente della texture. Il risultato di queste elaborazioni è stato ottenere inizialmente delle nuvole di punti dalle quali sono stati successivamente ottenuti dei modelli (superfici) e delle texture, ultimo risultato che si può ottenere attraverso l'utilizzo del software è ricavare un'ortofoto (proiezione ortografica).

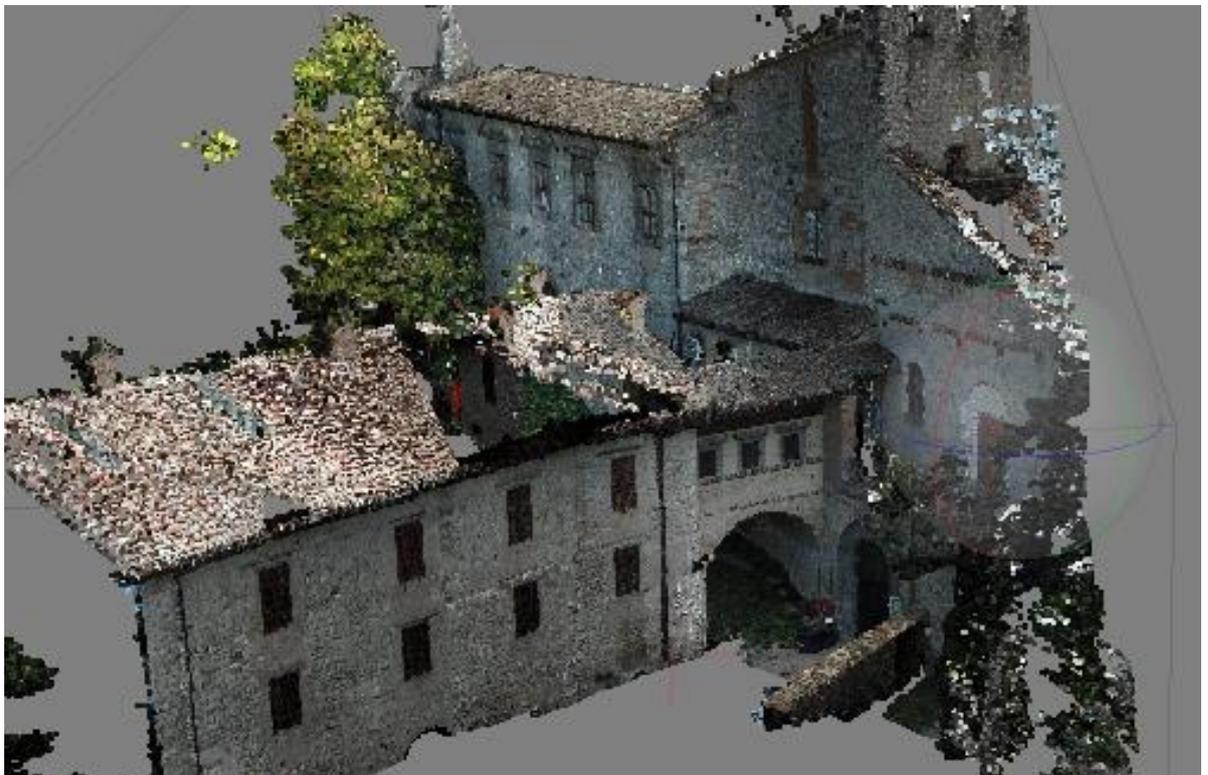
## RISULTATI

CHUNK	FOTO	MARKER	TIE POINTS	ERRORE (m)	ERROR E (pix)	G.R*
CHUNCK1 LOGGIA	316	5	1,848,737	0.00980 8	0.309	2,32 mm/px
CHUNCK2 GIARDINO	366	15	1,429,302	0.00971 9	1.755	5,34 mm/px
CHUNCK3 INGRESSO	449	10	2,339,366	0.01559 4	1.350	2,48 mm/px

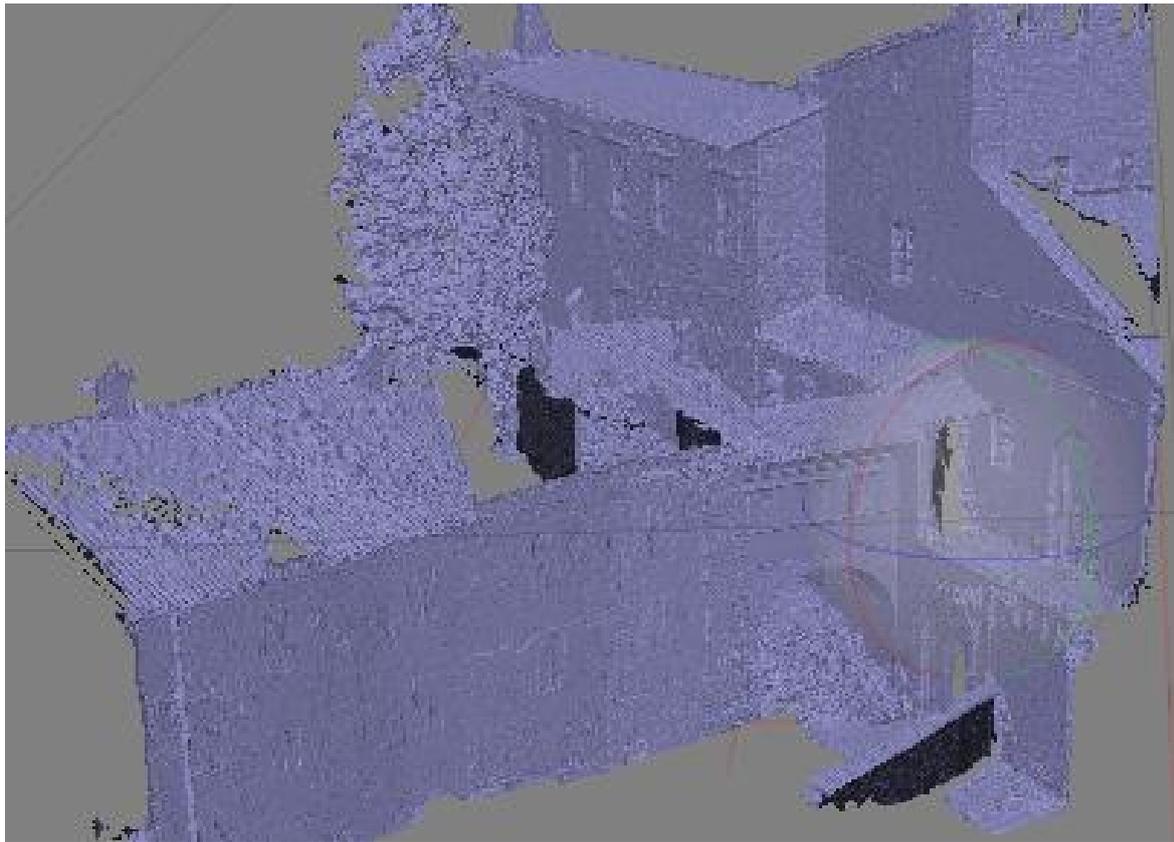
G.R\* Ground Resolution



*Figura 28 Nuvola di punti Rada chunk\_1\_Loggia, 1.848.737 points*



*Figura 29 Nuvola di punti Densa chunk\_1\_Loggia, 83.015.090 points, Processing: high quality*



*Figura 30 Mesh modello poligonale chunk\_1\_Loggia, 8.980.288 faces*



*Figura 31 Modello texturizzato chunk\_1\_Loggia*



Figura 32 Nuvola di punti Rada chunk\_2\_Giardino, 1.429.302 points



Figura 33 Dense cloud chunk\_2 Giardino, 8.178.451 points (Processing: medium quality)

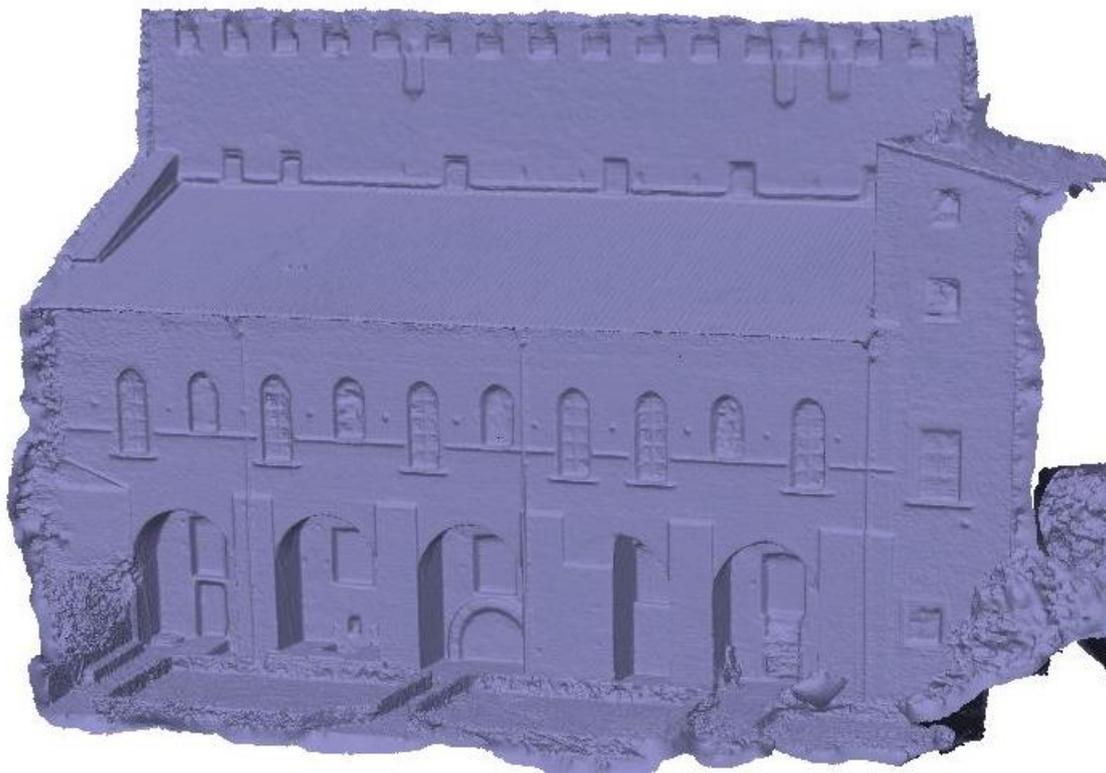


Figura 34 Mesh modello poligonale chunk\_2\_Giardino



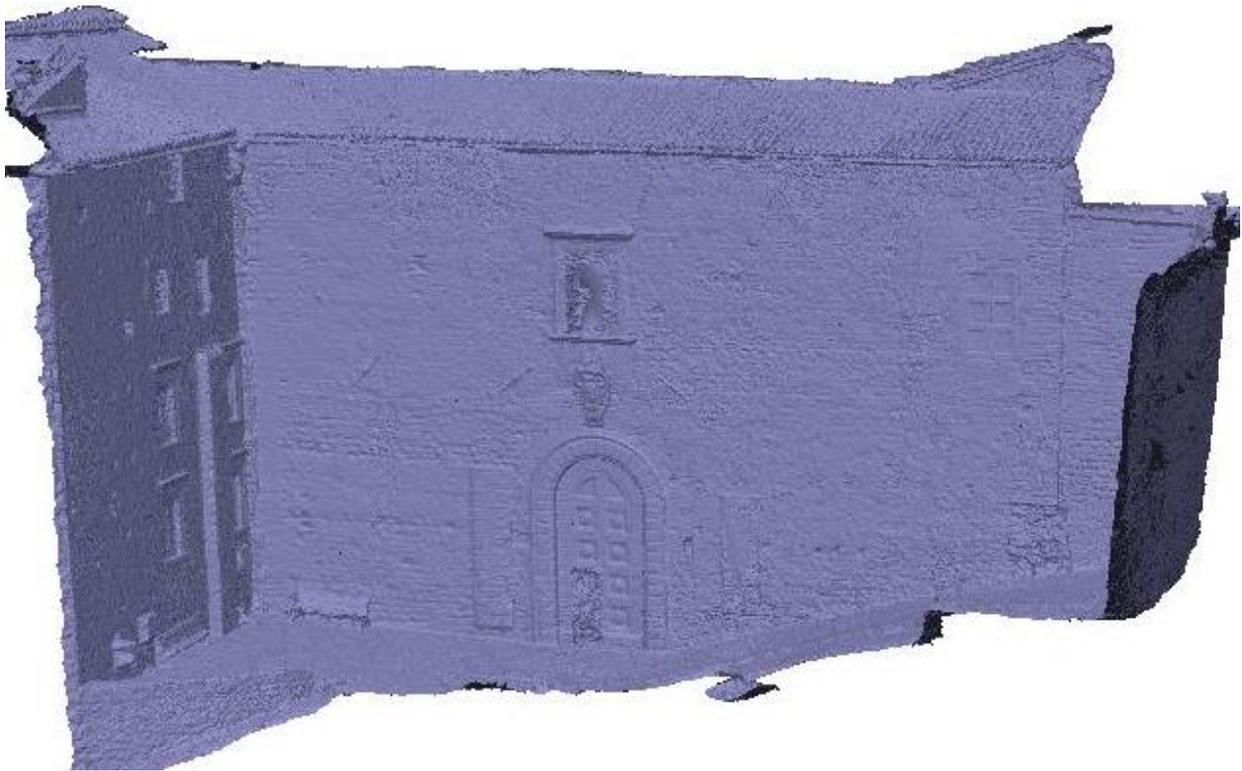
Figura 35 Modello texturizzato chunk\_2\_Giardino



*Figura 36 Nuvola di punti Rada chunk\_3\_Ingresso, 2.339.366 points*



*Figura 37 Nuvola di punti Densa chunk\_3\_Ingresso, 62.596.245 points (Processing: high quality)*



*Figura 38 Mesh modello poligonale chucnk\_3\_Ingresso*

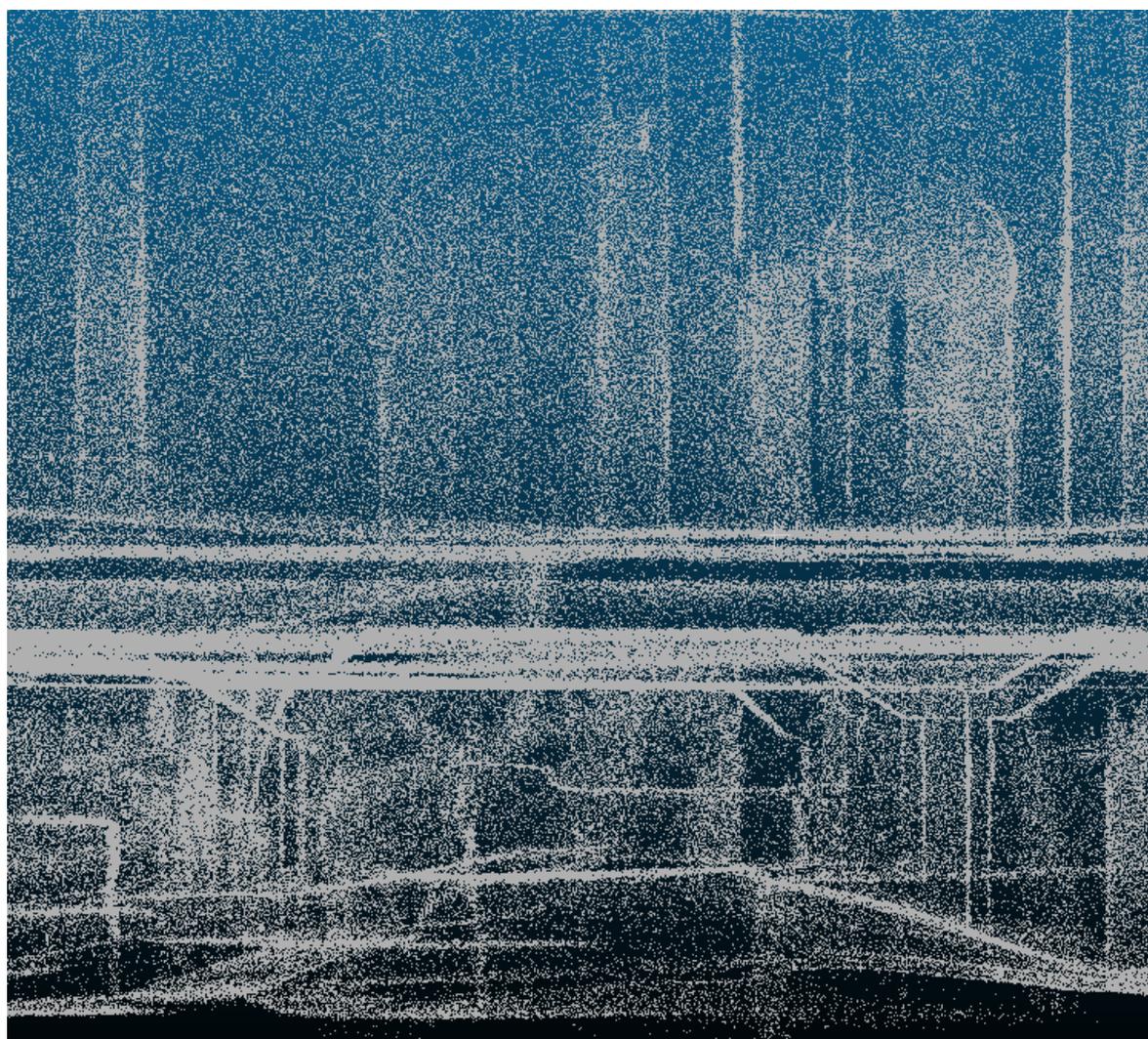


*Figura 39 Modello texturizzato chucnk\_3\_Ingresso*

## 4.6 MOBILE MAPPING SLAM

In questo capitolo si espone la tecnologia mobile mapping utilizzata per il rilievo 3D degli ambienti interni ed esterni del Palazzo. Nella prima parte viene spiegato il funzionamento di questa tecnologia mentre nella parte successiva vengono esposti il procedimento di acquisizione ed il procedimento di elaborazione delle nuvole di punti.

NUVOLA DI PUNTI ZEB



## 4.6 MOBILE MAPPING SLAM

Nel campo della documentazione digitale la ricerca offre sempre più soluzioni e strategie multi-sensore per la ricostruzione 3D del patrimonio culturale. Il Mobile Mapping (MMSs - MOBILE MAPPING SYSTEM) rappresenta il processo di registrazione di dati spaziali da dispositivi mobili. La necessità di documentare il patrimonio culturale ha spinto la ricerca verso l'utilizzo di sistemi mobili e rapidi (rapid mapping) che permettono una rapida acquisizione e visualizzazione dei dati finalizzati ad una accurata ricostruzione 3D degli elementi presenti lungo il percorso oggetto del rilievo. Dunque, esistono dispositivi portatili image e range based che permettono la produzione di modelli 3D.

La tecnologia SLAM (Simultaneous localization and mapping) adottata dallo strumento Zeb Revo Real Time sviluppata da GeoSLAM, fa parte dei dispositivi portatili range based, ed è stata adottata per rilevare gli ambienti del Palazzo più difficili da raggiungere attraverso laser scanner terrestri e caratterizzati da poca illuminazione da non permettere una perfetta acquisizione fotogrammetrica. Ma non solo, poiché si è proceduto nel mappare rapidamente anche gli ambienti già scansionati tramite laser scanner fisso fornendo la possibilità di confrontare i dati acquisiti e di allineare queste scansioni al modello 3D integrato. Questo strumento quindi integra le soluzioni di rilievo adottate fin qui fornendo una soluzione di acquisizione più rapida. Tale strumento permette di acquisire dati 3D semplicemente camminando con lo strumento nella mano, tale procedimento quindi consente di acquisire i profili degli ambienti in cui si sta camminando; questo sensore acquisisce dunque i dati spaziali grazie all'algoritmo SLAM senza la necessità di avere un supporto GNSS (global navigation satellite system). Lo strumento è dotato anche di un tablet connesso tramite WI-FI che permette di visualizzare in real-time il percorso svolto mostrando un'anteprima degli ambienti rilevati. Inoltre, lo strumento è dotato di una fotocamera integrata che permette di acquisire video durante il percorso di acquisizione.

Caratteristiche dello strumento impiegato:

#### ZEB REVO REAL-TIME

- Dimensioni dello scanner: 86 mm x 113 mm x 287 mm
- Velocità di rotazione della testa: 0,5 Hz
- Velocità della linea dello scanner: 100 Hz
- Durata della batteria: 4h
- Distanza massima: Indoor 30 m, Outdoor 15 - 20 m
- Risoluzione scanner: orizzontale 0.625°, verticale 1.8°
- Acquisizione punti: 43.200 punti/secondo
- Accuratezza relativa: 1-3 cm



Figura 40 ZEB REVO REAL TIME

## 4.6.1 ACQUISIZIONE DELLE SCANSIONI

Le scansioni sono state acquisite tramite Zeb Revo RT nei giorni 11 e 12 settembre 2018. Il metodo di acquisizione delle scansioni è avvenuto attraverso l'esecuzione di loop (percorsi) chiusi nella stessa posizione di partenza. Questa modalità di acquisizione facilita lo strumento nella ricostruzione 3D riducendo al minimo gli errori lungo la traiettoria, aumentando la rigidità del sistema. Le acquisizioni sono state eseguite seguendo dei percorsi orizzontali e verticali all'interno e all'esterno del Palazzo in modo da collegare tra loro gli ambienti a quota diversa; con un campo visivo di 360° ed una distanza di scansione interna di 30mt (ideale) l'operatore si muove attraverso gli ambienti rilevando circa 43.000 punti al secondo. Dunque, le traiettorie di acquisizione per le scansioni multi-livello hanno avuto come punto di partenza, comune anche tra alcune scansioni, un ambiente rilevato con laser scanner fisso che ha permesso una successiva e migliore fase di registrazione; questo aspetto rende la struttura del progetto di scansione più rigida. Lo strumento utilizzato consente di monitorare la traiettoria percorsa e la ricostruzione 3D durante l'acquisizione attraverso il tablet connesso; in questa preliminare ottimizzazione processata alla fine di ogni elaborazione lo strumento cerca di correggere gli errori fornendo una preliminare nuvola di punti 3D che può essere successivamente riprocessata nel software di gestione dedicato GeoSLAM.<sup>39</sup> La procedura di scansione è molto importante perché inevitabilmente influenza la qualità dei dati che si acquisiscono; per questo motivo è utile seguire alcune indicazioni operative come: identificare le zone critiche, rendere facilmente accessibili gli ambienti a quote diverse evitando di spostare oggetti durante la scansione, mantenere un passo lento per ottenere una buona copertura e dati ad alta risoluzione, quindi per sfruttare al meglio le potenzialità dello strumento, e dividere rilievi molto grandi (come nel caso del Palazzo Ducale) in più missioni di scansione evitando così file molto grandi e riducendo gli errori di traiettoria<sup>40</sup> (la traiettoria descrive la posizione del sensore durante l'acquisizione).

---

<sup>39</sup> Chiabrando, F.; Della Coletta, C.; Sammartano, G.; Spanò, A.; Spreafico, A.; "TORINO 1911" project: A contribution of a SLAM-based survey to extensive 3D heritage modeling; 2018; in International Society for Photogrammetry and Remote Sensing

<sup>40</sup> Di Filippo A.; Sanchez Aparicio L.J.; Barba S.; Martin-Jimenez J.A.; Mora R.; Aguilera D.G.; Use of a Wearable Mobile Laser System in Seamless Indoor 3D Mapping of a Complex Historical Site; 2018; in Remote Sensing, 2018

Detto ciò durante la campagna di rilievo si è proceduto ad acquisire le scansioni secondo le modalità descritte. Dunque, la mappatura degli ambienti del Palazzo è stata suddivisa in 12 missioni; ogni missione è caratterizzata da un percorso chiuso che comprende diversi ambienti:

- Scansione n.1: cortile e una porzione del piano primo;
- Scansione n.2: sottotetto torre e locale caldaia;
- Scansione n.3: primitivo palazzo comunale e una porzione del piano primo;
- Scansione n.4: cortile e primo livello di interrato;
- Scansione n.5: stanza piano terreno, secondo livello di interrato e voltone;
- Scansione n.7: piano primo;
- Scansione n.8: stanza piano terreno ed ambienti adibiti ad uffici;
- Scansione n.11: stanza piano primo ed ambienti espositivi chiusi al pubblico;
- Scansione n.12: piano terreno;
- Scansione n.14: cortile, voltone e giardino;
- Scansione n.16: cortile, piano primo e sottotetto;
- Scansione n.17: stanza piano terra e secondo livello di interrato;

SCANSIONI ACQUISITE	PIANI COPERTI	TEMPO DI ACQUISIZIONE	NUMERO DI PUNTI
1	2	7:15 min	15.302.472
2	2	11:50 min	23.851.663
3	2	8:58 min	18.420.264
4	2	12:00 min	24.918.629
5	2	12:13 min	28.176.481
7	1	9:20 min	20.162.581
8	3	11:29 min	22.349.861
11	2	9:16 min	19.636.188
12	1	10:08 min	22.173.975
14	2	12:20 min	30.639.964
16	3	12:07 min	24.225.364
17	2	9:30 min	20.050.087

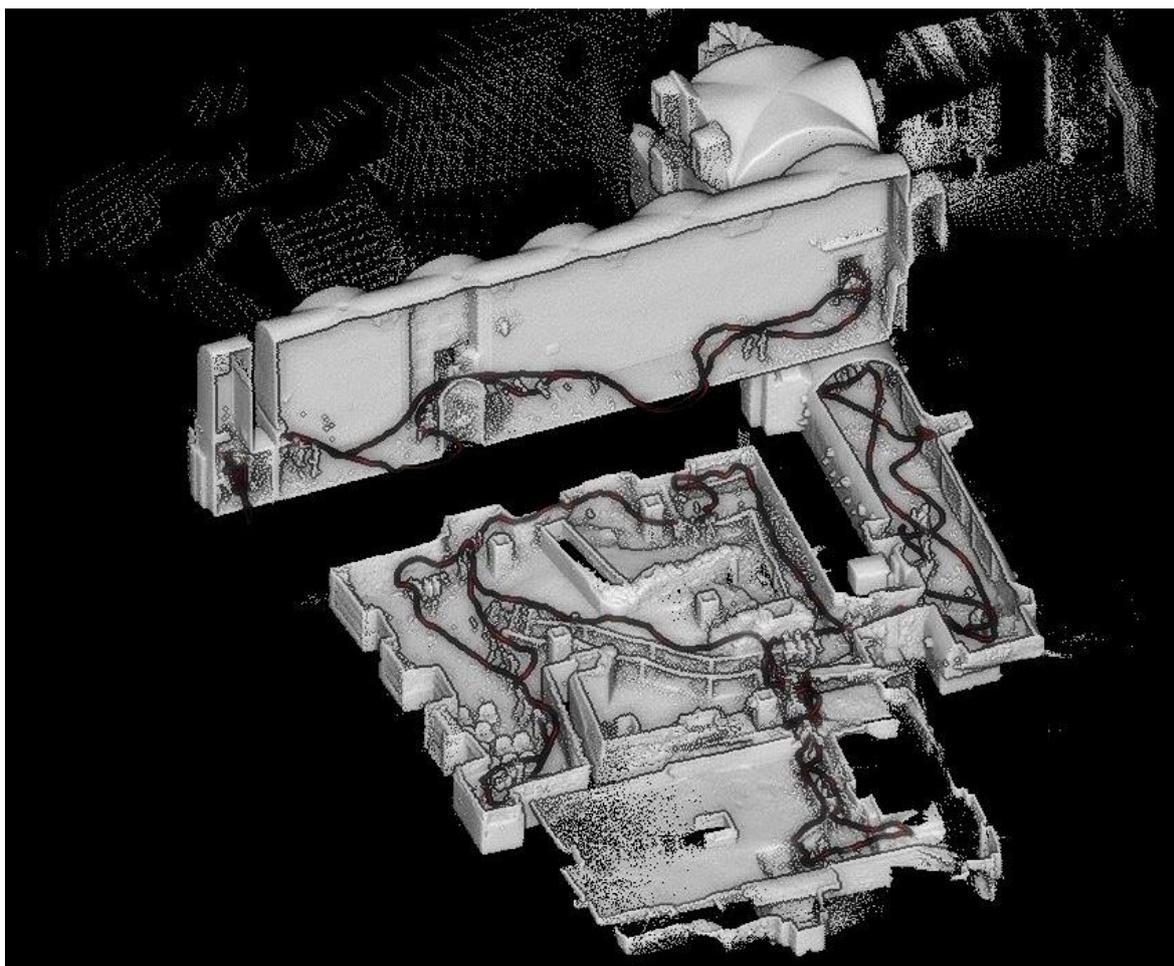


Figura 41 Scansione n.4 indicazione della traiettoria percorsa (linea rossa)

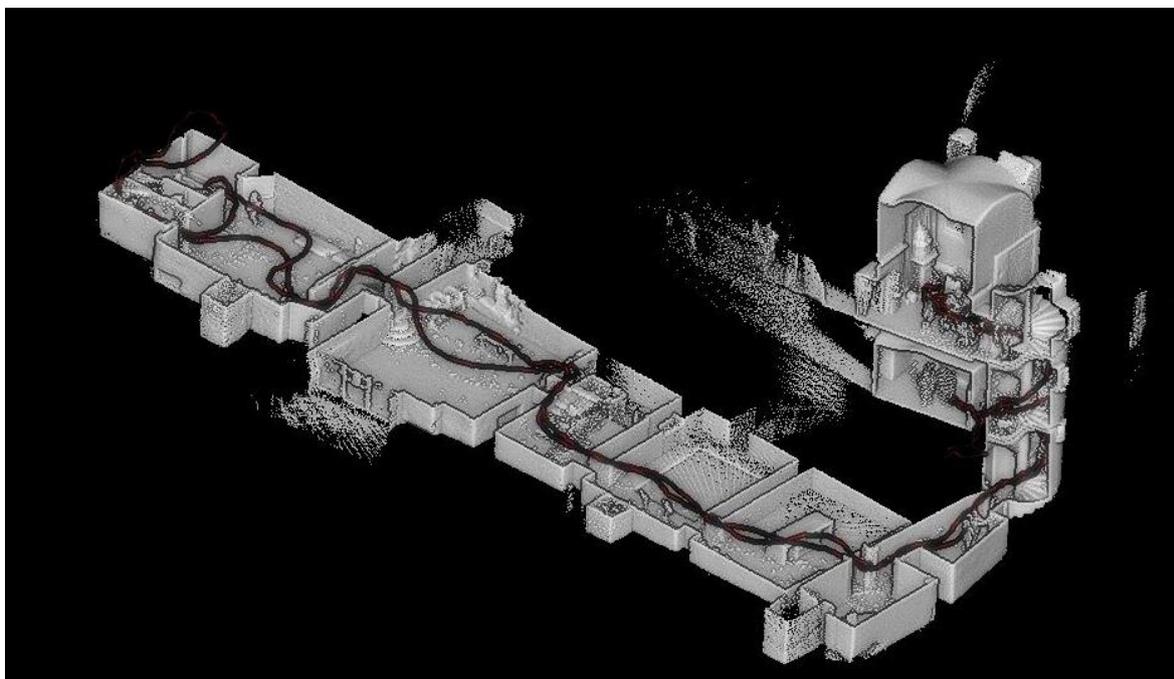
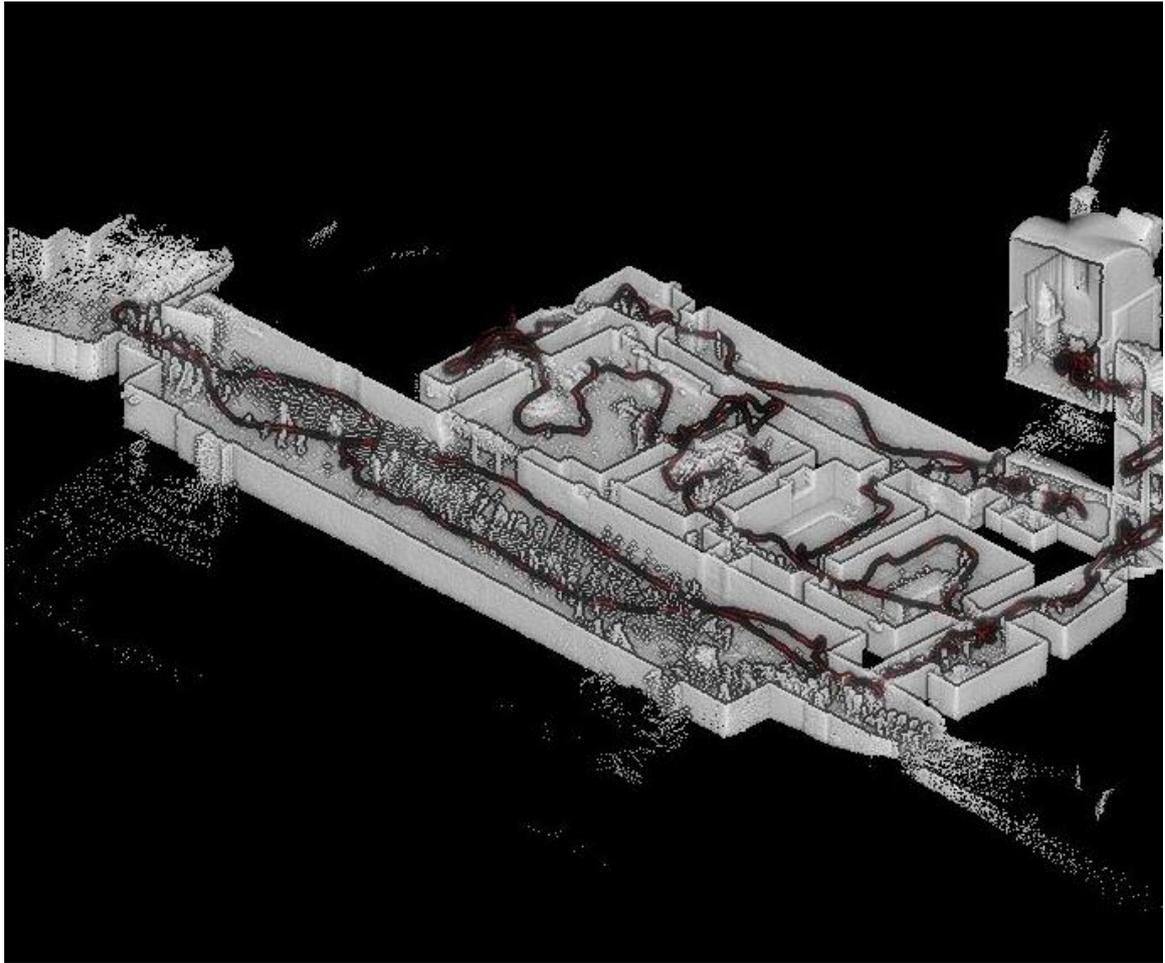
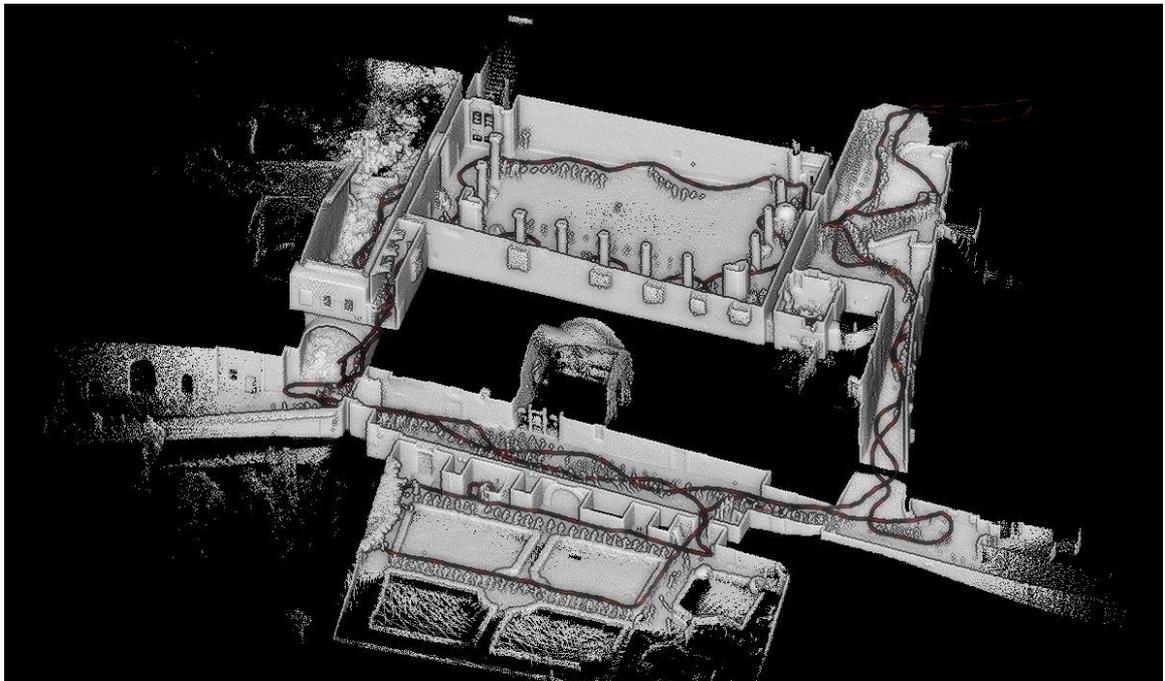


Figura 42 Scansione n.17 indicazione della traiettoria percorsa (linea rossa)



*Figura 43 Scansione n.5 indicazione della traiettoria percorsa (linea rossa)*



*Figura 44 Scansione n.14 indicazione della traiettoria percorsa (linea rossa)*

## 4.6.2 REGISTRAZIONE DELLE SCANSIONI

In questa fase le scansioni acquisite, con ambienti comuni, risultano slegate tra loro ed è necessario allinearle per poterle leggere correttamente. Il software dedicato GeoSLAM permette di elaborare in modo automatico un iniziale *merge* delle scansioni, infatti il software riconosce la posizione dei punti nello spazio in un sistema però non ancora definito, poiché lo strumento non è dotato di un rilevatore GPS. Una volta che tale allineamento è stato ottenuto occorre posizionare correttamente le scansioni nello spazio ovvero dotarle di un sistema di riferimento, comune con gli altri dati acquisiti, ciò avviene attraverso un ulteriore allineamento che fa riferimento proprio agli altri dati 3D elaborati precedentemente. In questo caso però prima di effettuare questo allineamento alcune scansioni sono state riprocessate poiché il *merge* processato automaticamente dal software non ha risolto i problemi di deriva delle scansioni 4, 7 e 14; per correggere tale errore è stato necessario riprocessarle sul software GeoSLAM con parametri diversi. Corretto questo problema si è proceduto all'allineamento con gli altri dati 3D; questo allineamento (*best-fit*) avviene vincolando attraverso dei punti le scansioni zeb alla scansione di riferimento. Nel caso in esame la nuvola di punti zeb è stata allineata alla nuvola di punti UAV e alla nuvola di punti LIDAR attraverso il riconoscimento di 8 punti distribuiti in modo omogeneo. Il risultato di questa fase è ottenere una nuvola di punti, che non possiede informazioni radiometriche, georiferita nel sistema di riferimento in comune con gli altri dati 3D e che permette una corretta integrazione dei dati.

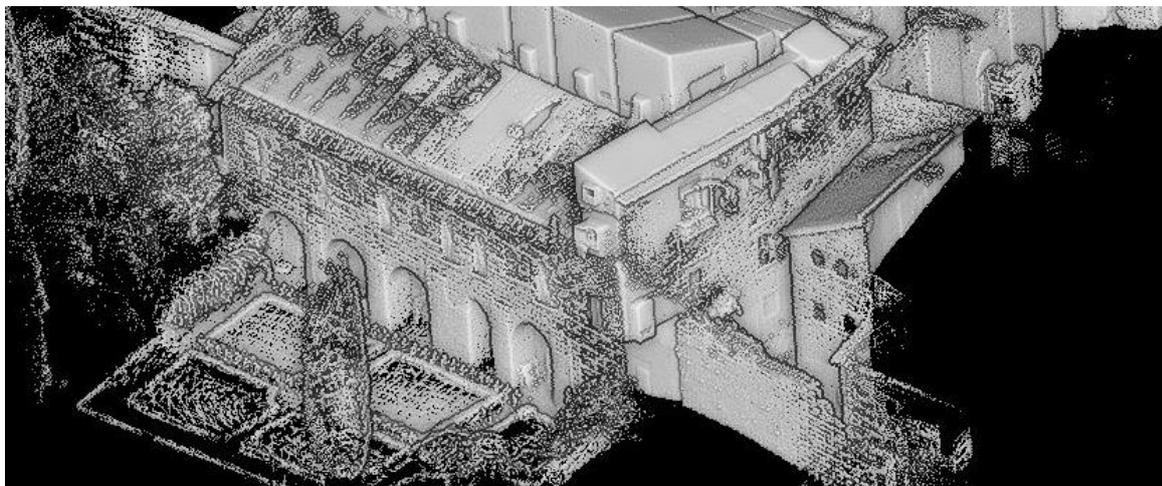


Figura 45 Porzione della nuvola di punti completa

### 4.6.3 ELABORAZIONE DELLA NUVOLA DI PUNTI

A questo punto le 12 scansioni ottenute devono essere elaborate: per elaborazione della nuvola di punti si intende un processo capace di interpretare le informazioni rilevate.

Le fasi principali di tale processo sono:

- Importazione nuvola di punti;
- Ripulitura della nuvola e rimozione di punti indesiderati;

Le nuvole di punti derivate dalle elaborazioni eseguite precedentemente sono state esportate nel formato .las, questa estensione permette di leggere le nuvole di punti sul software 3DReshaper. A questo punto si è proceduto alla rimozione di quei punti inutili ai fini dello studio del Palazzo. Questi punti indesiderati sono stati selezionati manualmente e di conseguenza cancellati; una volta effettuate tale operazione si dispone di nuvole di punti più snelle. A questo punto è possibile osservare tutte le nuvole di punti in un unico progetto. Tale fase, dunque, permette una prima interpretazione del manufatto che consente di verificare tutte le parti, rilevate, che lo compongono.

Con questa fase sono state ultimate tutte le elaborazioni dei dati acquisiti e si può procedere al confronto e all'integrazione dei dati ovvero verso la fase conclusiva del rilievo.

## 5. CONFRONTO ED INTEGRAZIONE DELLE TECNICHE DI RILIEVO UTILIZZATE

In questo capitolo si intendono esaminare le diverse tecniche di rilievo utilizzate attraverso la comparazione e l'integrazione dei dati al fine di definire una metodologia utile alla conoscenza esaustiva del complesso architettonico e che risulti applicabile anche in altri contesti.

### INTEGRAZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI



## 5.1 CONFRONTO TRA I DATI ACQUISITI

La corretta digitalizzazione del complesso architettonico del Palazzo Ducale di Gubbio come già detto ha obbligato l'utilizzo di diverse tecniche di rilievo 3D, che opportunamente confrontate, integrate ed elaborate hanno permesso di acquisire una conoscenza approfondita del complesso. Solo confrontando tali tecniche ci si rende conto dei vantaggi e degli svantaggi nell'utilizzo delle stesse per l'acquisizione dei dati e successivamente della loro elaborazione in funzione di ottenere gli elaborati già prefissati a monte, nella fase di progettazione del rilievo.

### TECNOLOGIA LIDAR

- tempo di acquisizione: 1181,44 minuti
- scansioni acquisite: 142
- tempo di elaborazione: 104 h
- numero di punti nuvola completa: 959.749.062 pt
- area coperta: 3.595 m<sup>2</sup>

### FOTOGRAMMETRIA

- tempo di acquisizione: 96 minuti
- fotogrammi acquisiti: 1690
- tempo di elaborazione: 56 h
- numero di punti totale: 170.306.151 pt
- area coperta: 66.483 m<sup>2</sup>

### TECNOLOGIA SLAM

- tempo di acquisizione: 124,66 minuti
- scansioni acquisite: 12
- tempo di elaborazione: 60 h
- numero di punti nuvola completa: 269.907.529 pt
- area coperta: 4.905 m<sup>2</sup>

Analizzando criticamente questi dati, anche attraverso l'ausilio di opportuni grafici, e considerando anche altri aspetti come la necessità di settare lo strumento per ogni stazione di presa e la conseguente messa in stazione per quanto riguarda lo scanner fisso, l'organizzazione dei piani di volo per quanto riguarda il drone e l'individuazione delle traiettorie da percorrere con lo ZEB appare evidente come ogni strumento necessiti di ulteriore tempo per ottenere una acquisizione quanto più corretta e completa possibile.

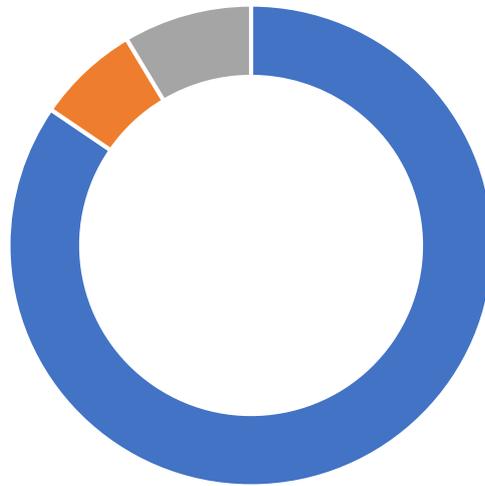
Detto ciò questi dati fanno emergere come la tecnologia LIDAR adottata dallo scanner fisso necessiti di una tempistica maggiore per quanto riguarda l'acquisizione dei dati, rispetto alle altre tecnologie. Ma comparando i tempi di acquisizione con i numeri di punti acquisiti si evidenzia che la tecnologia LIDAR dello scanner terrestre riesca ad acquisire più punti, nonostante abbia coperto una area minore. Bisogna, ancora specificare che le diverse tecnologie sono state impiegate per rilevare dati diversi, infatti nessuna di queste tecnologie è stata usata per sostituirla un'altra, ma tutto è stato utilizzato e pensato al fine di integrare i dati rilevati tra loro, per ottenere una copertura maggiore dell'area di rilievo.

È opportuno ancora porre un ulteriore confronto tra i dati acquisiti dai due scanner, quello terrestre e quello mobile. Infatti, sono stati acquisiti ambienti comuni con entrambe le tecnologie ed entrambi gli strumenti sono dotati di una accuratezza differente:

- Laser scanner terrestre FARO FOCUS 120s: circa 2mm
- Laser scanner mobile ZEB REVO REAL TIME: 1-3 cm

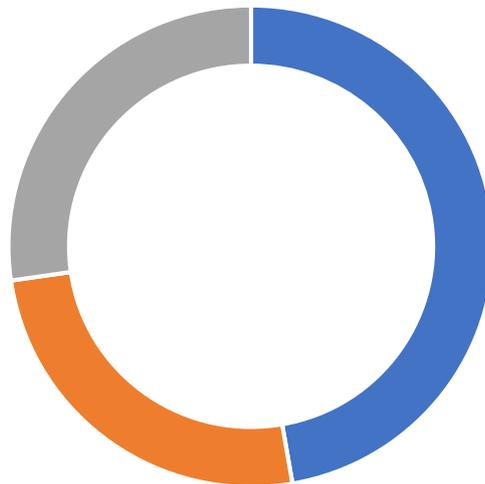
Questo margine di errore specifico dello strumento detta una differente precisione attesa, ovvero una scansione da laser scanner terrestre è dotata di un numero di punti maggiori rispetto ad una stessa scansione acquisita da laser scanner mobile. Questo aspetto caratterizza poi la scala di dettaglio in cui restituire il rilievo ed i conseguenti elaborati grafici. Quindi il solo utilizzo del laser scanner mobile non permette di ottenere degli elaborati grafici dotati di un dettaglio maggiore, ma la sua accuratezza limita la restituzione grafica ad una scala di rappresentazione 1:200.

### TEMPO DI ACQUISIZIONE DEI DATI



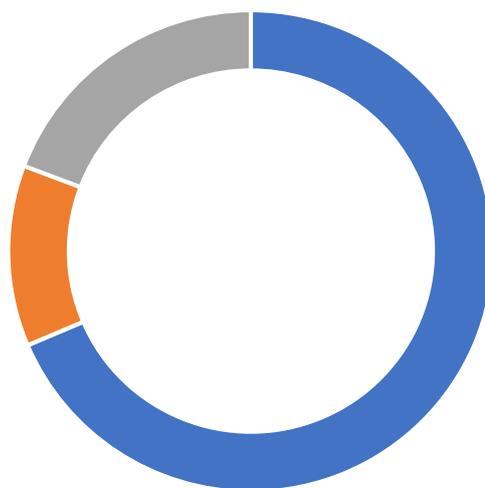
■ LIDAR ■ FOTOGRAMMETRIA ■ ZEB

### TEMPO DI ELABORAZIONE DEI DATI



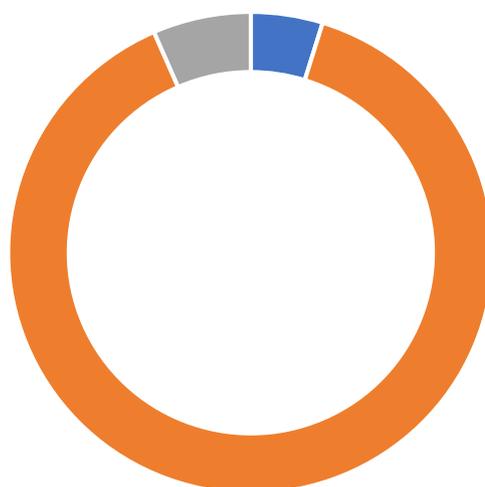
■ LIDAR ■ FOTOGRAMMETRIA ■ ZEB

### NUMERO DI PUNTI ACQUISITI



■ LIDAR ■ FOTOGRAMMETRIA ■ ZEB

### AREA COPERTA



■ LIDAR ■ FOTOGRAMMETRIA ■ ZEB

## 5.2 INTEGRAZIONE DEI DATI ACQUISITI

Tutti i dati acquisiti sono stati integrati tra loro per ottenere un rilievo completo del complesso architettonico. Parte della fase di integrazione è stata elaborata per georeferire nello stesso sistema di riferimento le scansioni acquisite da laser scanner mobile. Questa fase ha infatti prodotto una nuvola di punti comprendente tutti i dati rilevati: UAV, LIDAR, MOBILE MAPPING. Tale nuvola di punti “completa” è stata utilizzata per ottenere planimetrie, sezioni e dettagli architettonici. La fase di vettorializzazione, ovvero di restituzione bidimensionale, per generare le planimetrie e le sezioni, è stata eseguita sul software AUTOCAD, ma prima di ottenere un file dwg è stato necessario importare le nuvole di punti su un altro software specifico POINTCAB, che genera automaticamente tre viste ortogonali della nuvola, successivamente è stato possibile di impostare dei piani di sezione verticali e orizzontali. Queste sezioni (in proiezione ortogonale), ottenute dal software, sono caratterizzate da immagini raster, che importate su Autocad possono essere vettorializzate. Questa fase di restituzione grafica è caratterizzata dall’interpretazione dell’operatore, che senza difficoltà riesce ad interpretare i dati. Tale fase comunque presuppone una primitiva conoscenza del manufatto che permette una corretta interpretazione delle forme architettoniche.



Figura 46 Nuvola di punti completa

## PIANTA PIANO INTERRATO-2

INTEGRAZIONE DATI:

LIDAR

+

ZEB



## PIANTA PIANO INTERRATO-1

INTEGRAZIONE DATI:

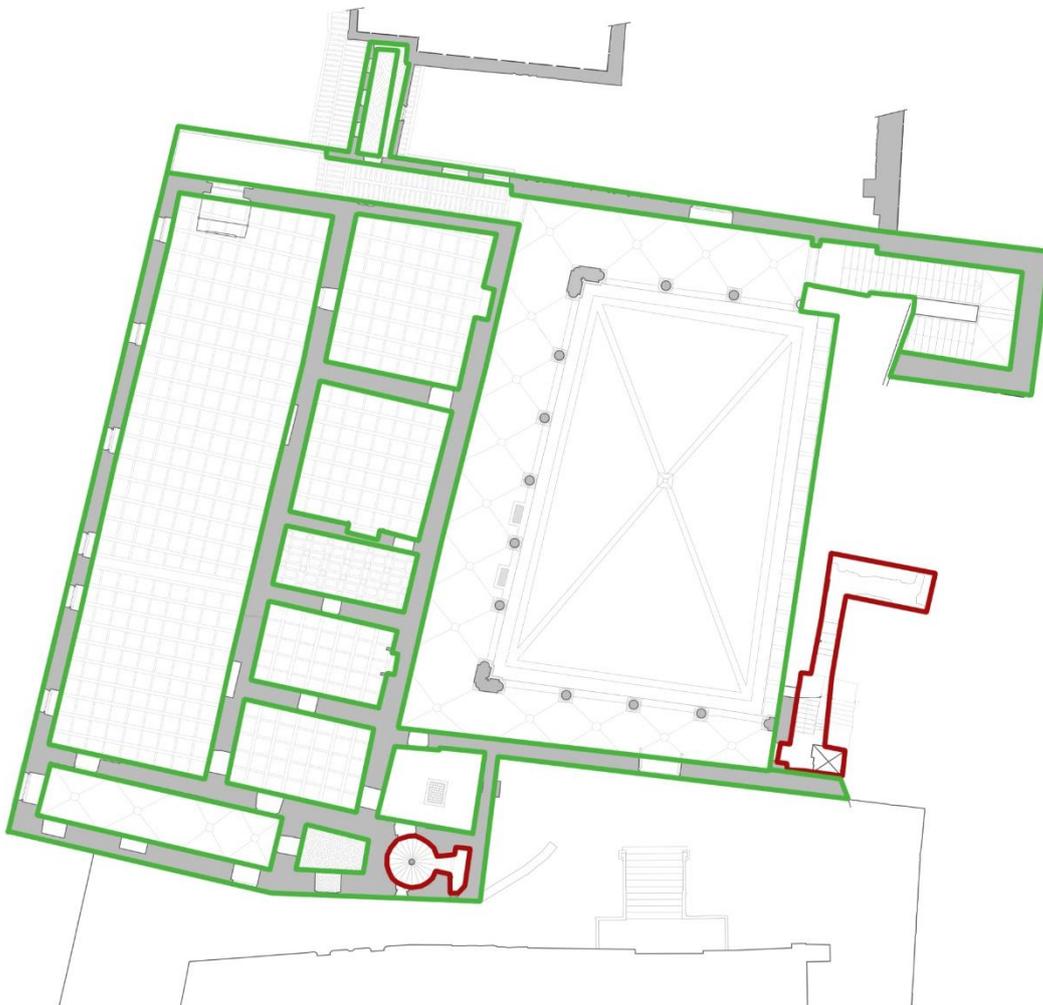
LIDAR  
+  
ZEB



# PIANTA PIANO TERRENO

INTEGRAZIONE DATI:

LIDAR  
+  
ZEB



## PIANTA PIANO PRIMO

INTEGRAZIONE DATI:

LIDAR

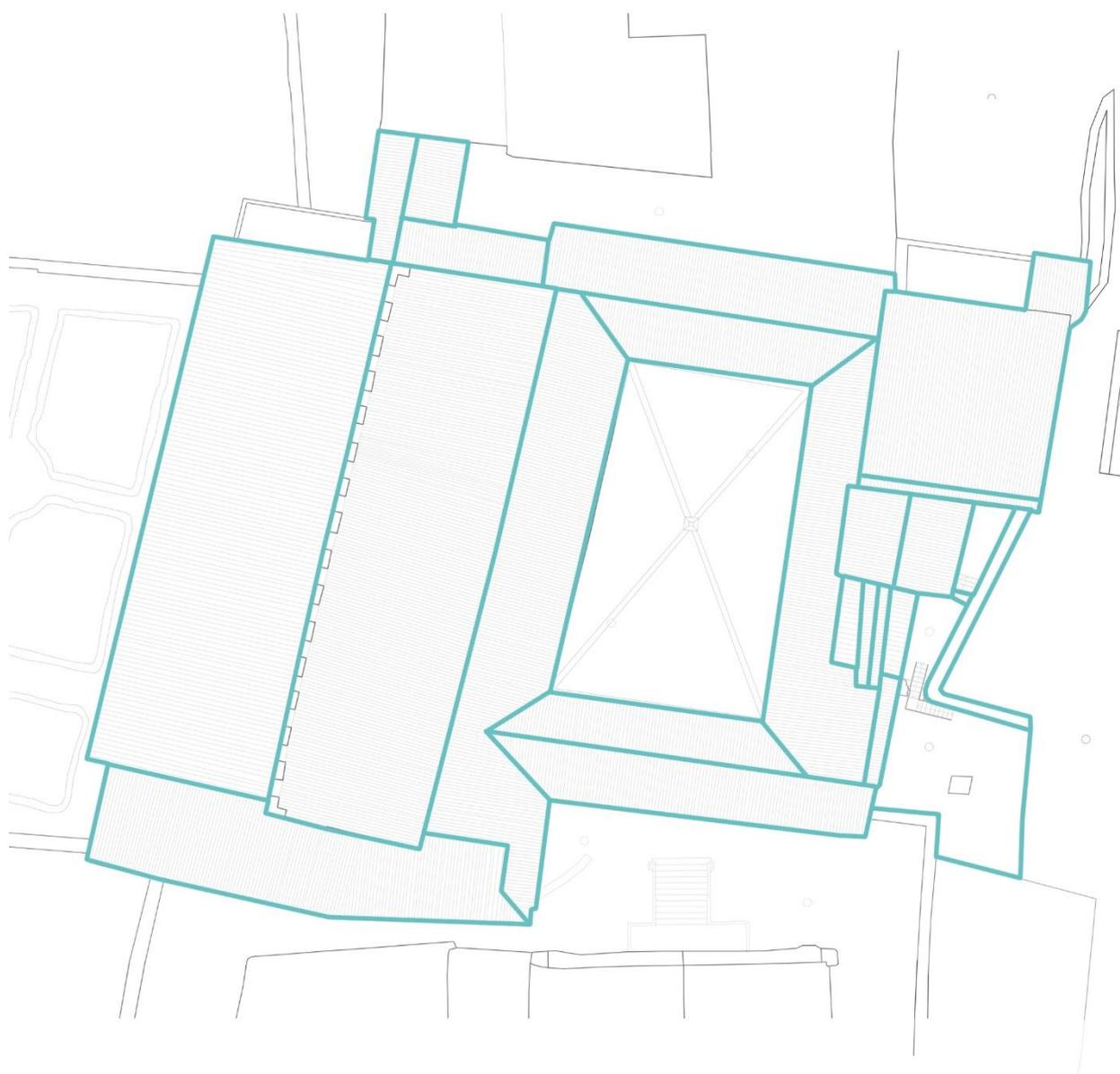
+

ZEB



PLANIMETRIA COPERTURE  
INTEGRAZIONE DATI:

FOTOGRAMMETRIA  
UAV





## CONCLUSIONI

Quando si conclude una ricerca occorre fare il bilancio dei risultati conseguiti per poterli confrontare con le ipotesi dei risultati attesi. La premessa a questo lavoro era ottenere una base utile per ulteriori approfondimenti alla conoscenza esaustiva del complesso architettonico. Quindi a partire dai dati raccolti, nuvole di punti acquisite con strumentazione laser scanner, terrestre e mobile, e fotogrammi ad alta risoluzione acquisiti tramite drone (APR), sono stati creati modelli 3D utilizzati per generare nuove planimetrie, sezioni, ortofoto e dettagli architettonici utili alla lettura del complesso e per creare una banca dati utile per i futuri sviluppi della ricerca, per il monitoraggio, per eventuali progetti di restauro e per la valorizzazione del Palazzo Ducale di Gubbio.

I risultati ottenuti rispondono anche alla richiesta di modelli 3D ad alta risoluzione e facili da usare e da gestire che l'importante domanda di documentazione che il patrimonio culturale richiede oggi e richiederà in futuro. Importante è stato infatti l'utilizzo di diverse tecniche di rilievo, dalla topografia, al laser scanner fino all'utilizzo di un aeromobile a pilotaggio remoto, tecnologie che permettono il rilievo reiterato nel tempo, prerogativa del rilievo integrato, e quindi l'aggiornamento, l'integrazione, la revisione dei dati acquisiti e la possibilità di monitorare il bene negli anni. Proprio l'integrazione di diverse tecniche ha permesso l'acquisizione dei dati necessari ad una esaustiva conoscenza del complesso.

Questo lavoro ha permesso di acquisire, personalmente, ulteriori conoscenze, sia in campo informatico che architettonico, e sviluppare una crescente passione verso la documentazione dei beni culturali. Documentazione che grazie alla potenzialità di tali strumenti, si pone come base per comunicare, divulgare e studiare un bene culturale. Da sottolineare è anche l'importanza di aver potuto lavorare su un tema, complesso, come quello del Palazzo Ducale, che ha rappresentato una situazione in grado di garantire un coinvolgimento tale da affrontare ogni problema, che si è posto, con la volontà, il desiderio e l'intenzione di arrivare in fondo al lavoro.

### Articoli e Atti di convegno

- F.P. Fiore, Interventi urbani in una signoria territoriale del Quattrocento a Urbino e Gubbio, Actes du colloque de Rome (1-4 dicembre 1986), Publications de l'École Française de Rome Année 1989 122 pp. 407-437
- D. Manconi, G. Venturini, M. Bernardi, L. Cienciaioli, Indagini archeologiche all'interno del Palazzo Ducale di Gubbio, Nuove conoscenze sulla dinamica insediativa medievale e sull'urbanistica del sito, Archeologia Medievale XVIII, 1991
- F. Bedini, Il Palazzo Ducale di Gubbio alla luce di recenti restauri e di nuove ricerche documentarie, Annali della Facoltà di Lettere e Filosofia, Università degli Studi di Perugia, 1990/1991
- Chiabrando, F.; Della Coletta, C.; Sammartano, G.; Spanò, A.; Spreafico, A.; "TORINO 1911" project: A contribution of a SLAM-based survey to extensive 3D heritage modeling; in International Society for Photogrammetry and Remote Sensing; 2018
- Di Filippo A.; Sanchez Aparicio L.J.; Barba S.; Martin-Jimenez J.A.; Mora R.; Aguilera D.G.; Use of a Wearable Mobile Laser System in Seamless Indoor 3D Mapping of a Complex Historical Site; in Remote Sensing, 2018
- Piovano A.; Rinaudo F.; Spallone R.; Metric survey and possible representations of Historic Architectural Heritage: the case of the Santa Giustina Abbey, in World Heritage and knowledge: representation, restoration, redesign, resilience; 2018

### Monografie

- C. Cundari, L. Carnevali, Il rilievo dei beni architettonici per la conservazione, KAPPA, 2000
- R. Migliari, Frontiere del rilievo. Dalla matita alle scansioni 3D, Gangemi, 2002
- S. Settis, Italia S.P.A., l'assalto al patrimonio culturale, Einaudi, 2002

- F. Sacerdote, G.Tucci, Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio, Alinea, 2007
- P. Bryan, B. Blake, J. Bedford, Metric Survey Specifications for Cultural Heritage, English Heritage, 2009
- M. Docci, D.Maestri, Manuale di rilevamento architettonico e urbano, Editori Laterza, 2009
- C. Bartolomei, La documentazione dei Beni Culturali, Cultural Heritage Documentation, in DISEGNARECON, 2010
- G. Verdiani, Il ritorno all'immagine, nuove procedure image based per il cultural heritage, Lulu, 2011
- L. De Luca, La fotomodellazione architettonica, rilievo, modellazione rappresentazione di edifici a partire da fotografie, Dario Floccovio Editore, 2011
- S. Bertocci, M. Bini, Manuale di rilievo architettonico e urbano, Città Studi, 2012
- M. Centofanti, S. Brusaporci, Modelli complessi per il patrimonio architettonico-urbano - Complex models for architectural and urban heritage, Gangemi, 2013
- A. M. Ferroni, C. Cacace, Carta del Rischio: la vulnerabilità archeologica, in Materiali e strutture, problemi di conservazione n.V-VI, 2014
- G. Venturini, Il Palazzo Ducale di Gubbio: riscoperta di antiche strutture urbane in Architettura e cultura dei materiali, Carocci, 1980
- G. Martines, La costruzione del Palazzo Ducale di Gubbio: invenzione e preesistenze, Roma, 1986
- G. Volpe, Francesco di Giorgio: Architetture nel Ducato di Urbino, Città Studi, Milano, 1991
- F.P Fiore, M. Tafari, L. Bellosi, Francesco di Giorgio : Siena 25 aprile-31 luglio 1993, Electa, 1993
- Paolo Micalizzi, Storia dell'architettura della città di Gubbio, Arte Grafica, 2010
- S. Capannelli, G. Rossi, La Platea comunis e i Palazzi pubblici di Gubbio, Media Video, 2013
- S. Capannelli, E. Sannipoli, Il Palazzo Ducale di Gubbio e Francesco di Giorgio Martini, TMM, 2018

## Tesi

- A. Mandelli, Moderne tecniche di rilievo e documentazione dei beni culturali, il Duomo di Milano: un caso studio, Politecnico di Milano, 2011
- G. Sammartano, Cinque terre: conservazione dell'ordinario e rischio dello straordinario: una proposta di database geografico-spaziale per il patrimonio paesaggistico di Vernazza, Politecnico di Torino, 2014
- G. Patrucco, Tecniche innovative UAV e LIDAR per l'analisi stratigrafica delle murature, Politecnico di Torino, 2016
- S. Perri, Metodi di Rilievo metrico 3D multiscala per il patrimonio costruito. Applicazioni aeree e terrestri in differenti scenari, Politecnico di Torino, 2018
- A. Rabbia, Indagini sulle necropoli etrusche nel parco archeologico di Baratti e Populonia, integrazione di strumenti avanzati per il rilievo metrico 3D e la rappresentazione dei dati in ambiente cartografico tramite strumenti GIS, Politecnico di Torino, 2018

## Sitografia

- [artsandculture.google.com](http://artsandculture.google.com)
- [agisoft.com](http://agisoft.com)
- [cartadelrischio.it](http://cartadelrischio.it)
- [dji.com](http://dji.com)
- [europeana.eu](http://europeana.eu)
- [faro.com](http://faro.com)
- [geoslam.com](http://geoslam.com)
- [iccrom.org](http://iccrom.org)
- [icomositalia.com](http://icomositalia.com)
- [icr.beniculturali.it](http://icr.beniculturali.it)
- [iris.polito.it](http://iris.polito.it)
- [newpalmyra.org](http://newpalmyra.org)
- [polomusealeumbria.beniculturali.it](http://polomusealeumbria.beniculturali.it)
- [unesco.it](http://unesco.it)
- [wikipedia.org](http://wikipedia.org)
- [3dmetrica.it](http://3dmetrica.it)
- [3dreshaper.com](http://3dreshaper.com)

## FONTE DELLE IMMAGINI

Figura 1: [newpalmyra.org](http://newpalmyra.org)

Figura 2: [polomusealeumbria.beniculturali.it](http://polomusealeumbria.beniculturali.it)

Figura 3: elaborata dall'autore

Figura 3: elaborata dall'autore

Figura 5: elaborata dall'autore

Figura 6: elaborata dall'autore

Figura 7: elaborata dall'autore

Figura 8: elaborata dall'autore

Figura 9: elaborata dall'autore

Figura 10: elaborata dall'autore

Figura 11: elaborata dall'autore

Figura 12: elaborata dall'autore

Figura 13: [faro.com](http://faro.com)

Figura 14: elaborata dall'autore

Figura 15: elaborata dall'autore

Figura 16: elaborata dall'autore

Figura 17: elaborata dall'autore

Figura 18: elaborata dall'autore

Figura 19: elaborata dall'autore

Figura 20: elaborata dall'autore

Figura 21: elaborata dall'autore

Figura 22: [dji.com](http://dji.com)

Figura 23: elaborata dall'autore

Figura 24: elaborata dall'autore

Figura 25: elaborata dall'autore

Figura 26: elaborata dall'autore

Figura 27: elaborata dall'autore

Figura 28: elaborata dall'autore

Figura 29: elaborata dall'autore

Figura 30: elaborata dall'autore

Figura 31: elaborata dall'autore

Figura 32: elaborata dall'autore

Figura 33: elaborata dall'autore

Figura 34: elaborata dall'autore

Figura 35: elaborata dall'autore

Figura 36: elaborata dall'autore

Figura 37: elaborata dall'autore

Figura 38: elaborata dall'autore

Figura 39: elaborata dall'autore

Figura 40: geoslam.com

Figura 41: elaborata dall'autore

Figura 42: elaborata dall'autore

Figura 43: elaborata dall'autore

Figura 44: elaborata dall'autore

Figura 45: elaborata dall'autore

## RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento va di dovere al professor Fulvio Rinaudo ed alla dottoressa Paola Mercurelli Salari per avermi guidato in questo lungo percorso.

Ai ragazzi del Laboratorio di Geomatica per i beni culturali, Jack, Alessandra, Emilio, Alessio, Lorenzo e Giulia, per l'aiuto che mi hanno fornito durante lo svolgimento di questo lavoro; grazie per il tempo ed il sostegno che mi avete dedicato.

Agli amici, ad i compagni di tutte le avventure Marco e Mattia, grazie per aver contribuito a questa esperienza.

Un grande grazie va alla mia famiglia per avermi sostenuto in questi anni e per avermi incoraggiato costantemente durante tutto il percorso.

A Barbara, compagna dei miei giorni, grazie di tutto.

Alla mia piccola Iris, che con uno sguardo fa tornare il sorriso, grazie di esserci.

Grazie a tutti!

# REPORT PROGETTO 1

**Processing Report**  
**24 January 2019**



# Survey Data

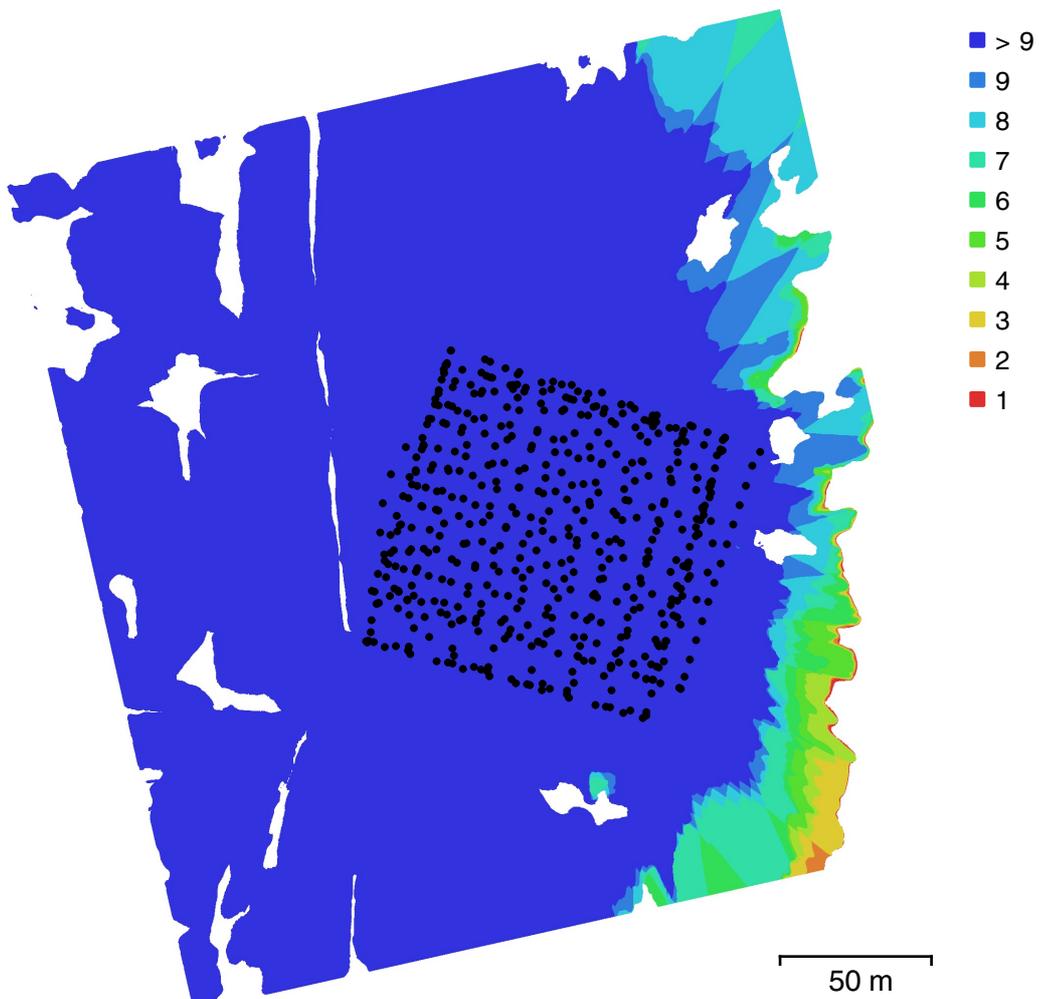


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	529	Camera stations:	527
Flying altitude:	67.6 m	Tie points:	694,415
Ground resolution:	1.85 cm/pix	Projections:	3,168,092
Coverage area:	0.0651 km <sup>2</sup>	Reprojection error:	1.19 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC220 (4.73mm)	4000 x 3000	4.73 mm	1.57 x 1.57 $\mu$ m	No

Table 1. Cameras.

# Camera Calibration

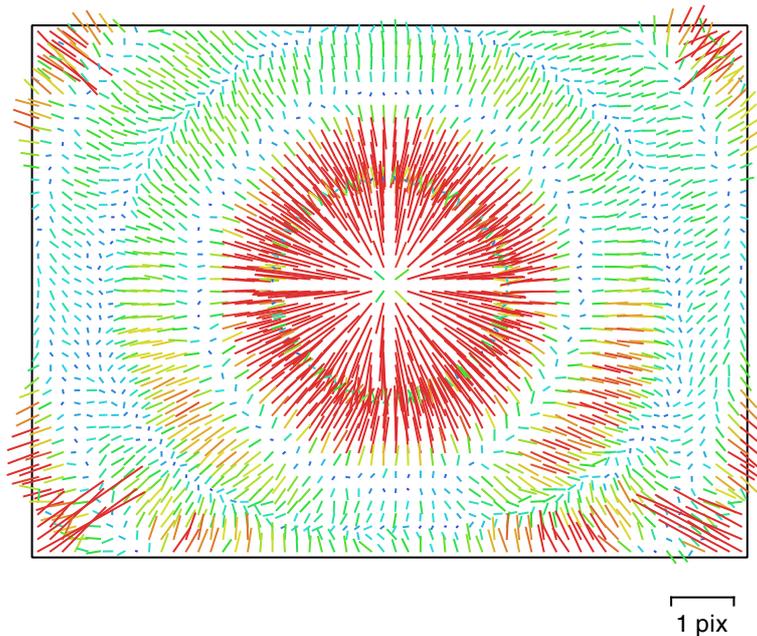


Fig. 2. Image residuals for FC220 (4.73mm).

## FC220 (4.73mm)

529 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	<b>4000 x 3000</b>	<b>4.73 mm</b>	<b>1.57 x 1.57 <math>\mu\text{m}</math></b>

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2	P3	P4
<b>F</b>	<b>3058.94</b>	0.02	1.00	0.05	-0.23	-0.16	-0.01	-0.63	0.57	-0.52	0.47	0.04	-0.00	0.03	-0.00
<b>Cx</b>	<b>-9.62778</b>	0.019		1.00	-0.38	0.03	0.05	0.01	-0.00	-0.00	0.01	0.65	-0.21	0.40	-0.09
<b>Cy</b>	<b>-14.6927</b>	0.015			1.00	-0.18	0.04	-0.00	0.00	-0.01	0.01	-0.24	0.64	-0.19	0.03
<b>B1</b>	<b>-7.10609</b>	0.0045				1.00	0.02	0.01	-0.01	0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.00	0.00
<b>B2</b>	<b>0.00427556</b>	0.0045					1.00	0.01	-0.01	0.00	-0.00	-0.02	0.01	-0.03	0.01
<b>K1</b>	<b>0.119242</b>	8.4e-05						1.00	-0.98	0.93	-0.89	0.01	-0.01	0.01	-0.01
<b>K2</b>	<b>-0.651033</b>	0.00051							1.00	-0.99	0.96	0.00	0.00	-0.01	0.02
<b>K3</b>	<b>1.46835</b>	0.0012								1.00	-0.99	-0.01	0.00	0.02	-0.02
<b>K4</b>	<b>-1.13536</b>	0.001									1.00	0.02	-0.00	-0.02	0.03
<b>P1</b>	<b>0.00119414</b>	4.9e-06										1.00	-0.27	-0.25	0.50
<b>P2</b>	<b>-0.000487076</b>	3.9e-06											1.00	0.11	-0.22
<b>P3</b>	<b>-2.46489</b>	0.0083												1.00	-0.93
<b>P4</b>	<b>1.6036</b>	0.015													1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

# Ground Control Points

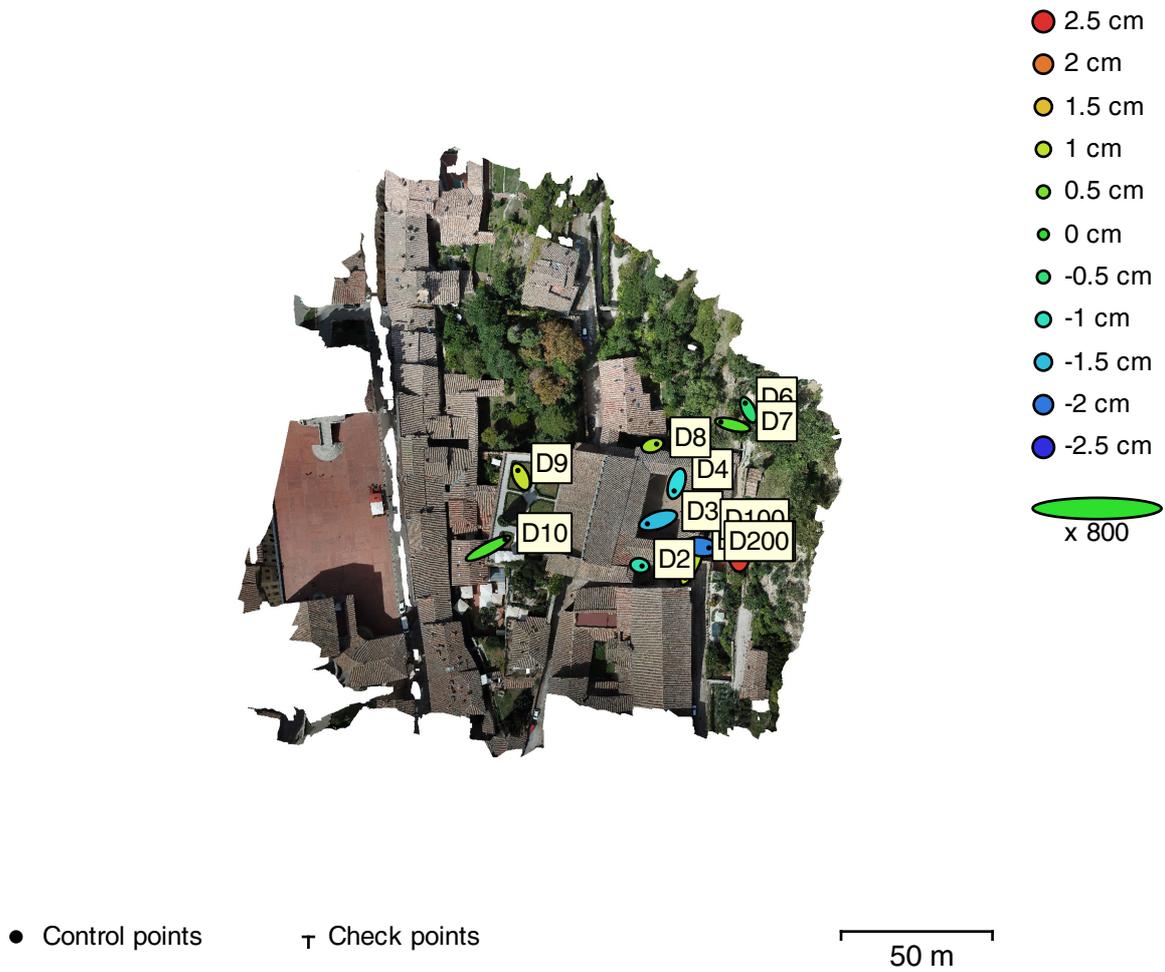


Fig. 3. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
12	0.647159	0.567707	1.19785	0.860875	1.47511

Table 3. Control points RMSE.

<b>Label</b>	<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>Total (cm)</b>	<b>Image (pix)</b>
D1	-0.571352	-1.27038	0.93302	1.67655	0.770 (48)
D2	0.190924	-0.0435389	-0.891843	0.913089	0.737 (26)
D3	-0.879561	-0.293727	-1.50433	1.76717	0.617 (22)
D4	-0.202841	-0.612776	-1.24183	1.39957	0.690 (46)
D5	-0.0012243	0.616401	2.4168	2.49417	0.802 (30)
D6	-0.263463	0.556225	-0.481295	0.781309	0.635 (23)
D7	-0.963924	0.240199	0.251722	1.0248	0.707 (37)
D8	0.332598	0.098309	0.824059	0.89407	0.692 (48)
D9	-0.242798	0.521254	1.06881	1.21368	0.697 (60)
D10	1.4013	0.737067	0.204259	1.59644	0.689 (57)
D100	0.494205	-0.458643	0.231341	0.712819	0.810 (19)
D200	0.687102	-0.0891045	-1.92212	2.04318	0.938 (26)
<b>Total</b>	<b>0.647159</b>	<b>0.567707</b>	<b>1.19785</b>	<b>1.47511</b>	<b>0.728</b>

Table 4. Control points.

# Digital Elevation Model

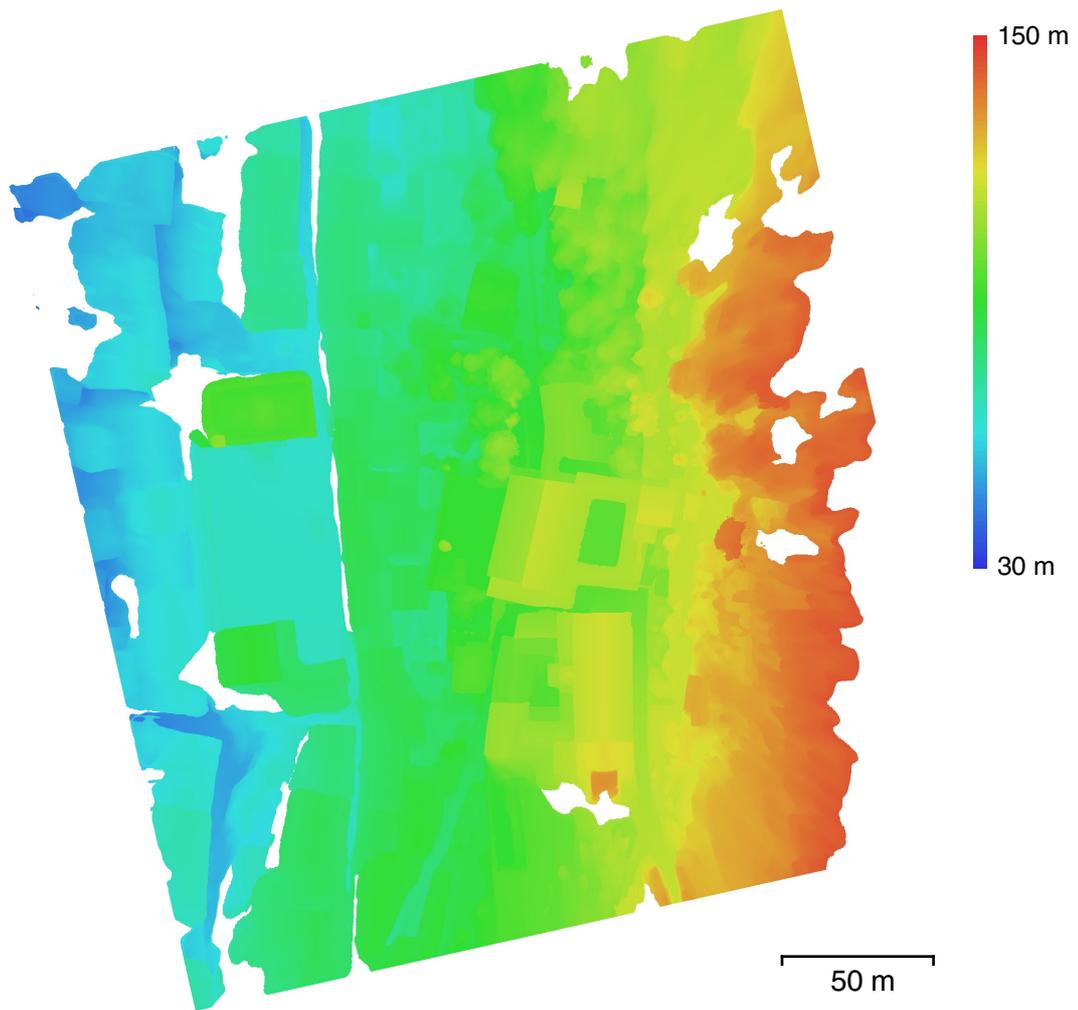


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 7.41 cm/pix  
Point density: 182 points/m<sup>2</sup>

# Processing Parameters

## General

Cameras	529
Aligned cameras	527
Markers	12
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

## Point Cloud

Points	694,415 of 812,638
RMS reprojection error	0.343114 (1.19033 pix)
Max reprojection error	2.91173 (77.2156 pix)
Mean key point size	3.42611 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	6.17408

## Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	No
Key point limit	40,000
Tie point limit	10,000
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	15 hours 35 minutes
Alignment time	20 minutes 51 seconds

## Optimization parameters

Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1-p4
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	2 minutes 6 seconds

## Model

Faces	3,297,242
Vertices	1,656,084
Vertex colors	3 bands, uint8
Texture	8,172 x 8,172 x 4, 4 bands, uint8

## Reconstruction parameters

Surface type	Arbitrary
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	Medium
Depth filtering	Moderate
Face count	3,297,243
Processing time	15 minutes 6 seconds

## Texturing parameters

Mapping mode	Generic
Blending mode	Average
Texture size	8,172 x 8,172
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	No
UV mapping time	1 minutes 45 seconds
Blending time	9 minutes 58 seconds

## Orthomosaic

Size	15,447 x 17,974
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Colors	3 bands, uint8

## Reconstruction parameters

Blending mode	Mosaic
Surface	Mesh
Enable hole filling	Yes

Processing time	3 minutes 44 seconds
<b>Software</b>	
Version	1.4.2 build 6205
Platform	Windows 64

# REPORT FACCIATA GIARDINO

Processing Report  
06 November 2018



# Survey Data

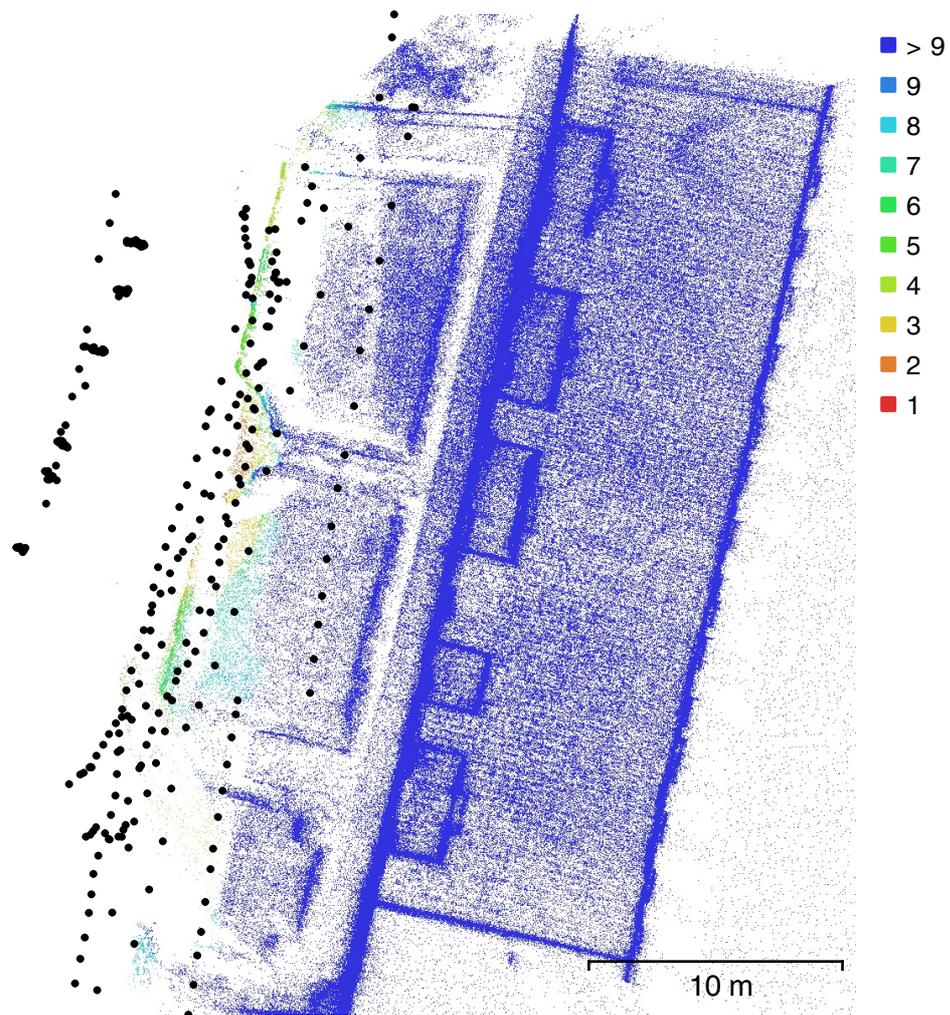


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	366	Camera stations:	366
Flying altitude:	16.3 m	Tie points:	1,429,302
Ground resolution:	5.34 mm/pix	Projections:	6,352,648
Coverage area:	325 m <sup>2</sup>	Reprojection error:	1.16 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC220 (4.73mm)	4000 x 3000	4.73 mm	1.57 x 1.57 $\mu$ m	No

Table 1. Cameras.

# Camera Calibration

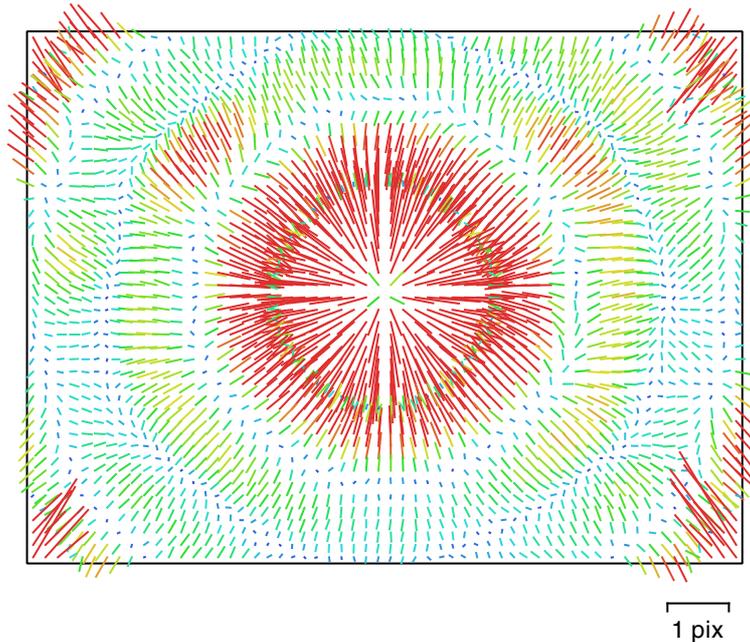


Fig. 2. Image residuals for FC220 (4.73mm).

## FC220 (4.73mm)

366 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	<b>4000 x 3000</b>	<b>4.73 mm</b>	<b>1.57 x 1.57 <math>\mu\text{m}</math></b>

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2	P3	P4
F	3043.28	0.056	1.00	-0.09	0.25	-0.59	0.10	-0.02	0.04	0.00	-0.04	-0.08	0.08	-0.11	0.08
Cx	-12.4657	0.058		1.00	-0.49	-0.03	0.15	-0.01	-0.01	0.01	-0.01	0.76	-0.27	0.78	-0.60
Cy	-8.89939	0.04			1.00	-0.18	0.06	0.04	-0.03	0.02	-0.02	-0.39	0.67	-0.48	0.36
B1	2.32251	0.055				1.00	-0.04	-0.01	0.01	-0.00	-0.01	-0.02	-0.02	-0.03	0.02
B2	-6.91761	0.05					1.00	0.01	-0.01	0.01	-0.01	0.04	0.01	0.04	-0.04
K1	0.132395	6.5e-05						1.00	-0.97	0.93	-0.89	0.00	0.04	-0.02	0.02
K2	-0.733105	0.0004							1.00	-0.99	0.96	-0.02	-0.03	-0.00	-0.00
K3	1.66746	0.00099								1.00	-0.99	0.02	0.02	-0.00	0.01
K4	-1.29918	0.00083									1.00	-0.02	-0.02	0.01	-0.01
P1	0.00127505	5.4e-06										1.00	-0.26	0.45	-0.21
P2	-0.000508383	4.8e-06											1.00	-0.19	0.08
P3	-2.2754	0.011												1.00	-0.95
P4	1.88199	0.015													1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

# Ground Control Points



Fig. 3. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)
13	6.62144	5.05923	5.00149	8.33302	9.71875

Table 3. Control points RMSE.

<b>Label</b>	<b>X error (mm)</b>	<b>Y error (mm)</b>	<b>Z error (mm)</b>	<b>Total (mm)</b>	<b>Image (pix)</b>
44	5.26087	-4.42343	-11.1034	13.0586	1.283 (46)
45	-3.52756	-5.69781	1.57497	6.88399	1.296 (52)
46	-4.61732	-4.51356	7.26425	9.71912	0.907 (68)
47	5.30901	9.59187	-3.74508	11.5851	2.011 (56)
48					
49	-1.63878	5.88784	-0.0632708	6.11197	2.021 (88)
51	1.60401	1.38306	8.71349	8.96719	1.944 (96)
53	11.3685	1.58068	-1.88797	11.6321	1.659 (78)
54	-5.80037	2.66144	-5.79499	8.6203	2.748 (67)
55					
56	-8.26405	-2.48544	-0.436749	8.64075	1.063 (41)
57	-5.81287	-9.19698	3.7335	11.5027	2.070 (34)
59	-8.93627	-1.45233	1.81609	9.23387	1.342 (85)
60	4.28461	1.3708	1.02082	4.61292	1.696 (103)
61	10.5781	5.23701	-1.04292	11.8494	1.675 (87)
<b>Total</b>	<b>6.62144</b>	<b>5.05923</b>	<b>5.00149</b>	<b>9.71875</b>	<b>1.755</b>

Table 4. Control points.

# Digital Elevation Model

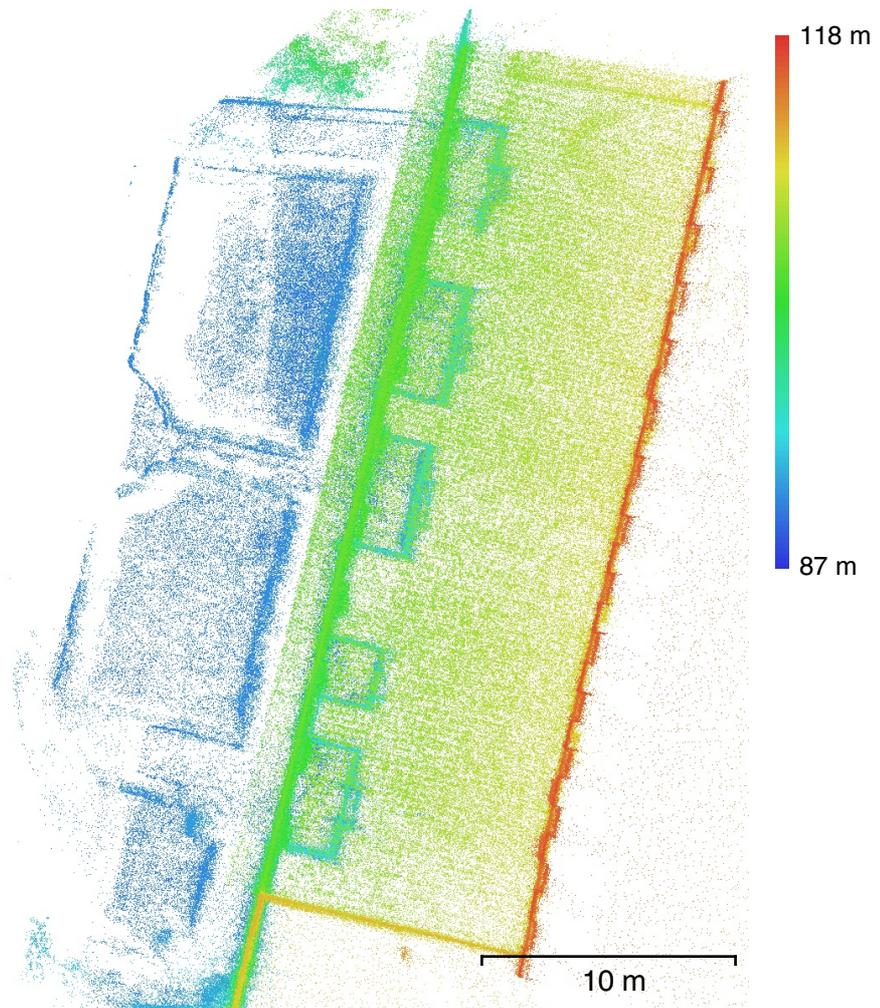


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: unknown

Point density: unknown

# Processing Parameters

## General

Cameras	366
Aligned cameras	366
Markers	15
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

## Point Cloud

Points	1,429,302 of 2,008,730
RMS reprojection error	0.344105 (1.15811 pix)
Max reprojection error	6.28058 (52.044 pix)
Mean key point size	3.5452 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	6.6568

## Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Yes
Key point limit	0
Tie point limit	0
Matching time	1 hours 9 minutes

## Optimization parameters

Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1-p4
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	5 minutes 30 seconds

## Software

Version	1.4.2 build 6205
Platform	Windows 64

# REPORT LOGGIA

Processing Report  
06 November 2018



# Survey Data

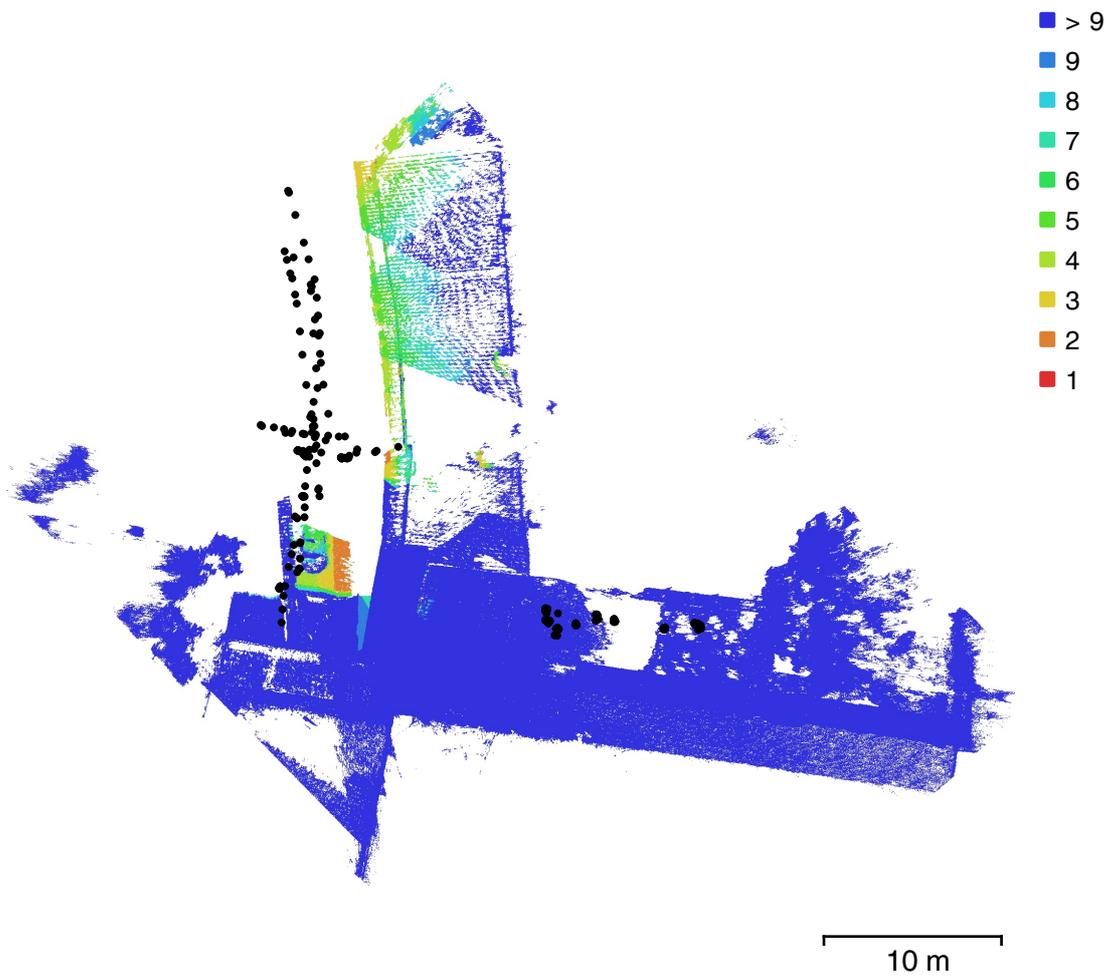


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	316	Camera stations:	316
Flying altitude:	7.78 m	Tie points:	1,848,737
Ground resolution:	2.32 mm/pix	Projections:	6,925,956
Coverage area:	494 m <sup>2</sup>	Reprojection error:	1.2 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC220 (4.73mm)	4000 x 3000	4.73 mm	1.57 x 1.57 $\mu$ m	No

Table 1. Cameras.

# Camera Calibration

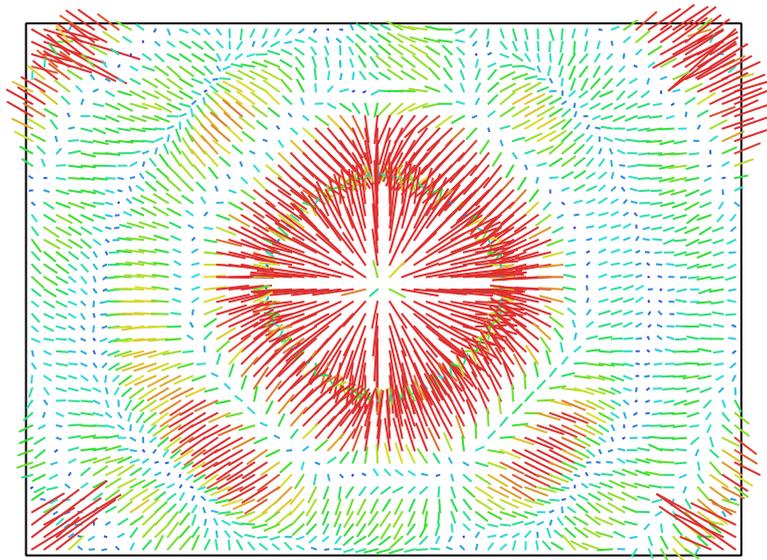


Fig. 2. Image residuals for FC220 (4.73mm).

## FC220 (4.73mm)

316 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	<b>4000 x 3000</b>	<b>4.73 mm</b>	<b>1.57 x 1.57 <math>\mu\text{m}</math></b>

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
<b>F</b>	<b>3043.16</b>	0.082	1.00	-0.05	0.05	-0.83	-0.01	-0.02	0.01	0.04	-0.08	-0.03	0.07
<b>Cx</b>	<b>-5.14891</b>	0.06		1.00	0.05	-0.01	0.08	0.01	-0.01	0.01	-0.00	0.90	0.06
<b>Cy</b>	<b>0.120872</b>	0.064			1.00	-0.01	-0.01	0.00	0.01	-0.01	0.01	0.07	0.93
<b>B1</b>	<b>-3.03413</b>	0.08				1.00	0.03	-0.05	0.06	-0.07	0.08	-0.01	-0.03
<b>B2</b>	<b>0.520993</b>	0.048					1.00	-0.01	0.01	-0.01	0.01	0.04	-0.01
<b>K1</b>	<b>0.124789</b>	6.5e-05						1.00	-0.97	0.92	-0.87	0.02	0.00
<b>K2</b>	<b>-0.671751</b>	0.00039							1.00	-0.99	0.95	-0.02	0.01
<b>K3</b>	<b>1.50916</b>	0.00093								1.00	-0.99	0.02	-0.01
<b>K4</b>	<b>-1.16403</b>	0.00077									1.00	-0.01	0.01
<b>P1</b>	<b>-0.000386283</b>	4.7e-06										1.00	0.08
<b>P2</b>	<b>0.000567026</b>	5.1e-06											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

# Ground Control Points

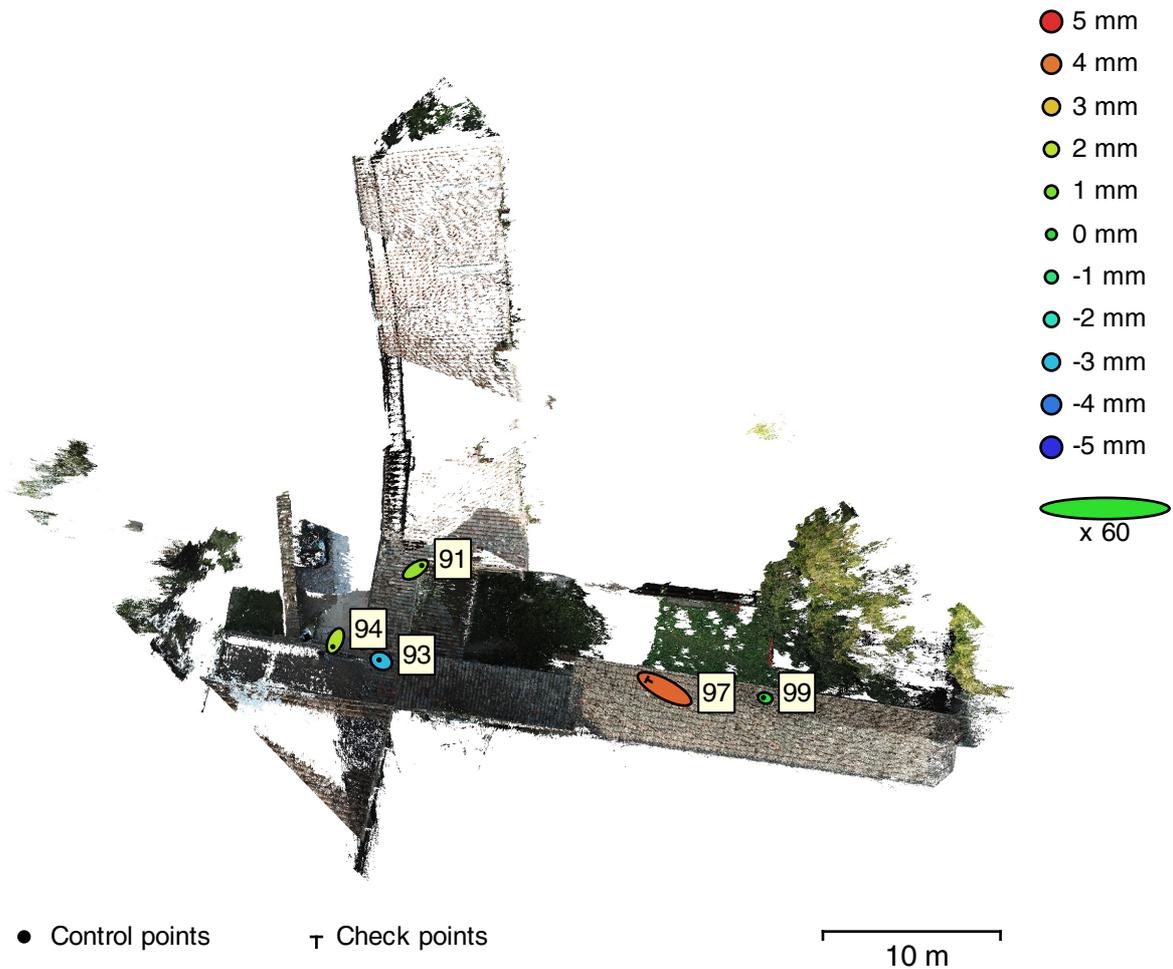


Fig. 3. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
4	0.679869	0.680395	0.191966	0.961852	0.980821

Table 3. Control points RMSE.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
1	3.31809	1.80524	0.425645	3.77738	3.80129

Table 4. Check points RMSE.

<b>Label</b>	<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>Total (cm)</b>	<b>Image (pix)</b>
91	1.16639	0.792078	0.14186	1.41703	0.044 (23)
93	-0.411088	0.206277	-0.306045	0.552456	0.057 (7)
94	-0.469373	-1.08347	0.182693	1.19482	0.039 (11)
99	-0.314826	0.0889311	-0.0154651	0.32751	0.645 (12)
<b>Total</b>	<b>0.679869</b>	<b>0.680395</b>	<b>0.191966</b>	<b>0.980821</b>	<b>0.309</b>

Table 5. Control points.

<b>Label</b>	<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>Total (cm)</b>	<b>Image (pix)</b>
97	-3.31809	1.80524	0.425645	3.80129	0.509 (3)
<b>Total</b>	<b>3.31809</b>	<b>1.80524</b>	<b>0.425645</b>	<b>3.80129</b>	<b>0.509</b>

Table 6. Check points.

# Digital Elevation Model

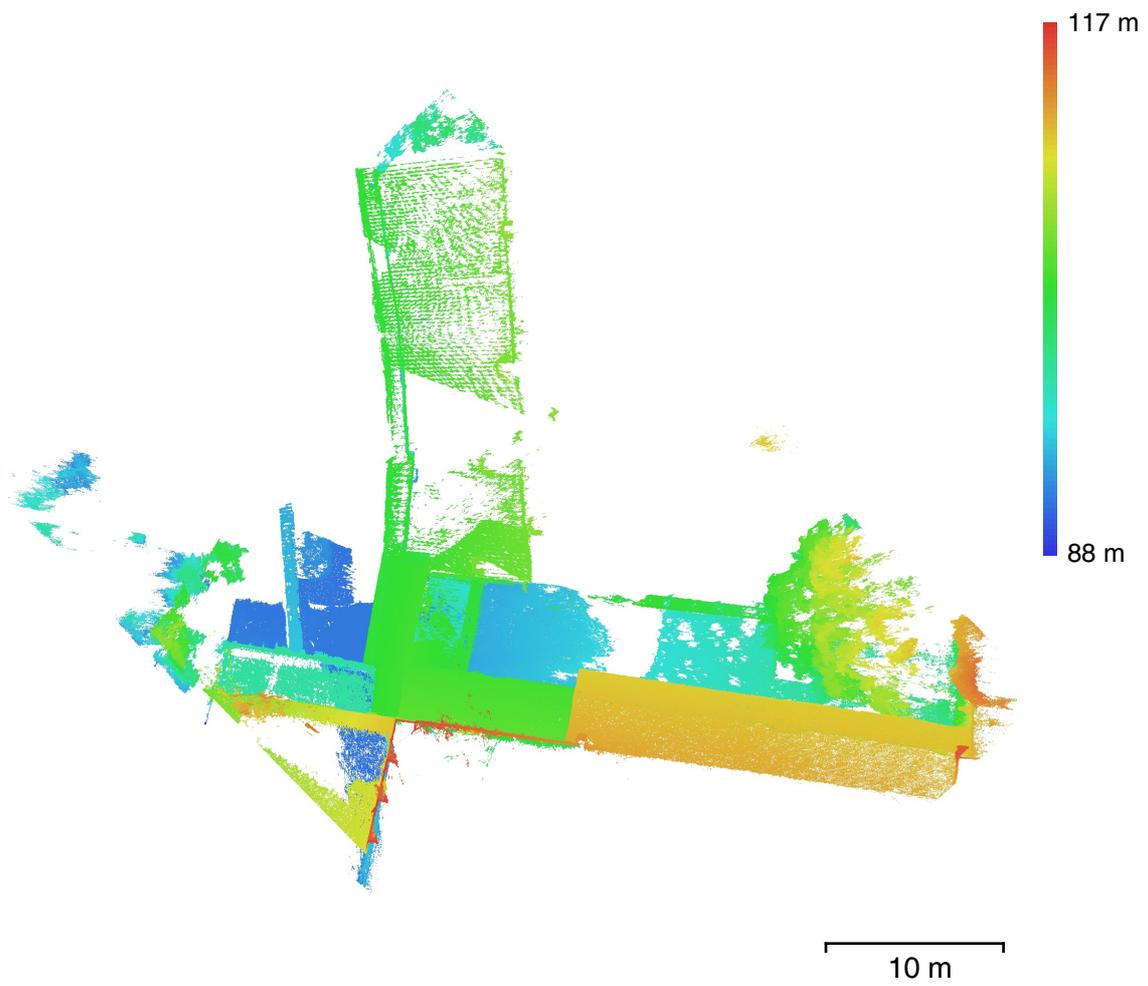


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: unknown

Point density: unknown

# Processing Parameters

## General

Cameras	316
Aligned cameras	316
Markers	5
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

## Point Cloud

Points	1,848,737 of 2,238,398
RMS reprojection error	0.333689 (1.19605 pix)
Max reprojection error	1.7183 (56.7221 pix)
Mean key point size	3.89 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	4.23177

## Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Key point limit	0
Tie point limit	0
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	41 minutes 38 seconds
Alignment time	56 minutes 4 seconds

## Optimization parameters

Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	26 seconds

## Dense Point Cloud

Points	83,045,090
Point colors	3 bands, uint8

## Reconstruction parameters

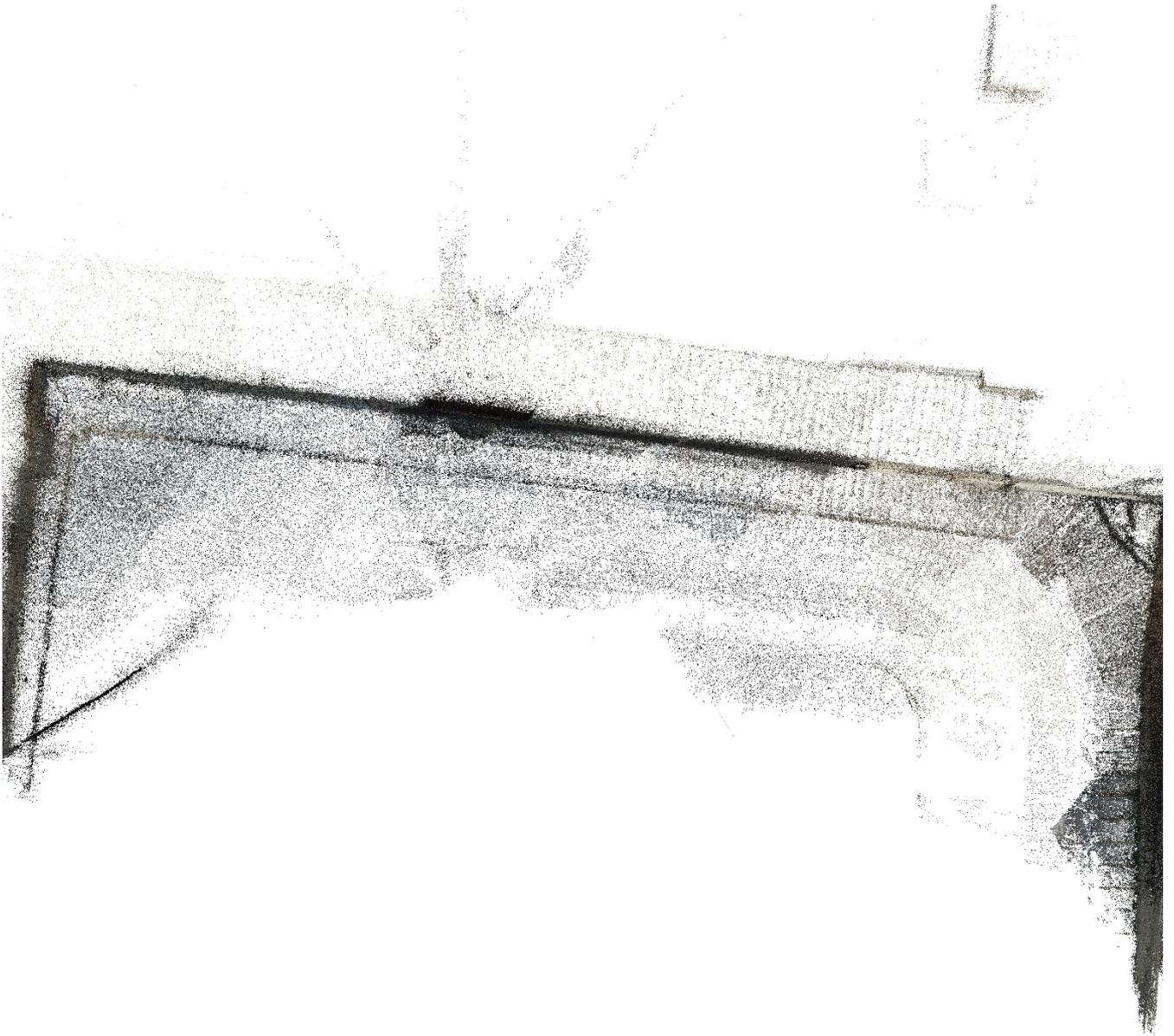
Quality	High
Depth filtering	Moderate
Depth maps generation time	1 hours 7 minutes
Dense cloud generation time	3 hours 20 minutes

## Software

Version	1.4.2 build 6205
Platform	Windows 64

# REPORT INGRESSO

Processing Report  
06 November 2018



# Survey Data

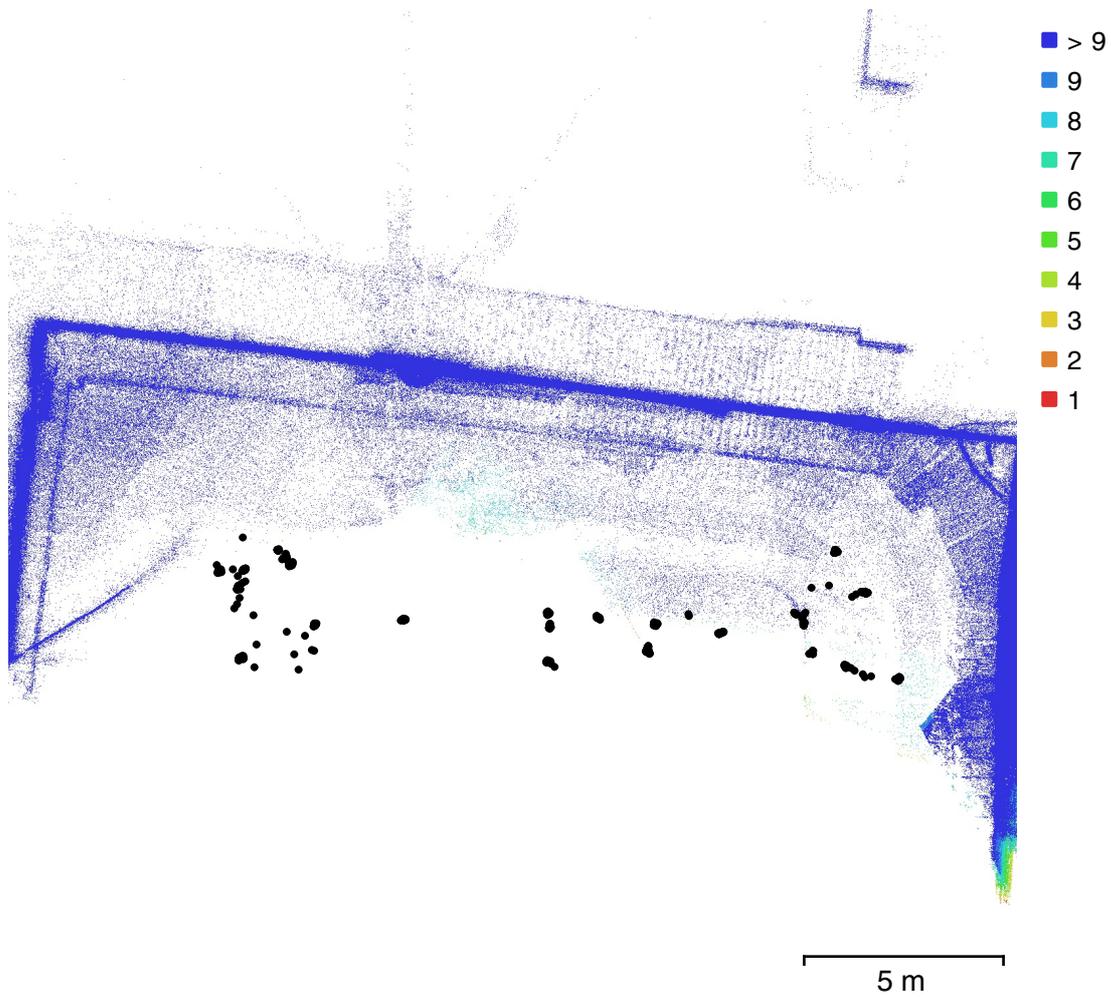


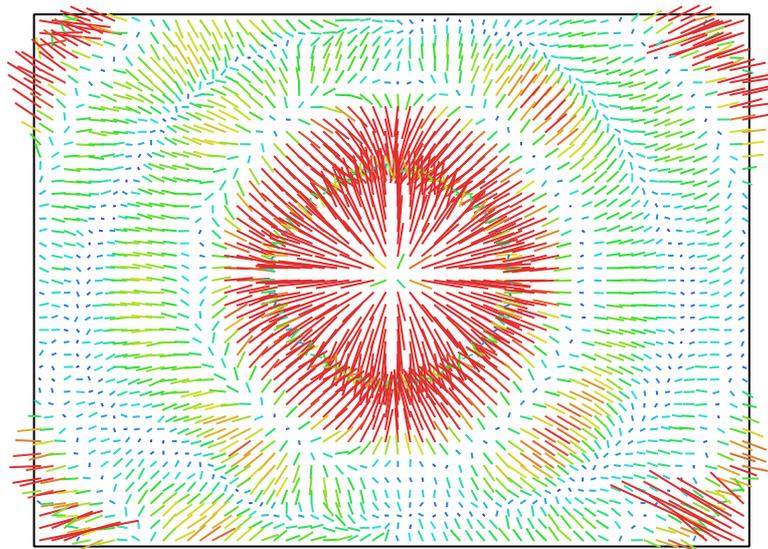
Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	449	Camera stations:	449
Flying altitude:	7.52 m	Tie points:	2,339,366
Ground resolution:	2.48 mm/pix	Projections:	9,796,655
Coverage area:	56.4 m <sup>2</sup>	Reprojection error:	1.39 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC220 (4.73mm)	4000 x 3000	4.73 mm	1.57 x 1.57 $\mu$ m	No

Table 1. Cameras.

# Camera Calibration



1 pix

Fig. 2. Image residuals for FC220 (4.73mm).

## FC220 (4.73mm)

449 images

Type  
Frame

Resolution  
**4000 x 3000**

Focal Length  
**4.73 mm**

Pixel Size  
**1.57 x 1.57  $\mu\text{m}$**

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2	P3	P4
F	3035.51	0.1	1.00	0.03	0.10	-0.95	-0.21	-0.01	-0.03	0.08	-0.12	0.05	-0.10	0.09	-0.07
Cx	-28.0194	0.039		1.00	-0.67	-0.00	0.10	0.03	-0.07	0.10	-0.12	0.63	-0.43	0.71	-0.58
Cy	-11.3245	0.045			1.00	-0.18	-0.10	-0.04	0.06	-0.08	0.10	-0.42	0.68	-0.75	0.59
B1	9.17181	0.099				1.00	0.24	-0.05	0.08	-0.11	0.14	-0.04	0.05	-0.04	0.04
B2	-2.87262	0.037					1.00	-0.00	0.01	-0.01	0.01	-0.06	0.01	-0.08	0.04
K1	0.123227	5.9e-05						1.00	-0.97	0.92	-0.87	0.00	-0.04	0.05	-0.03
K2	-0.667027	0.00035							1.00	-0.98	0.95	-0.03	0.06	-0.08	0.06
K3	1.50184	0.00085								1.00	-0.99	0.07	-0.08	0.10	-0.07
K4	-1.15665	0.0007									1.00	-0.10	0.10	-0.10	0.07
P1	0.000969381	4.5e-06										1.00	-0.36	0.36	-0.20
P2	-0.00111798	5.2e-06											1.00	-0.40	0.24
P3	-2.79754	0.0099												1.00	-0.95
P4	2.61331	0.013													1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

# Ground Control Points

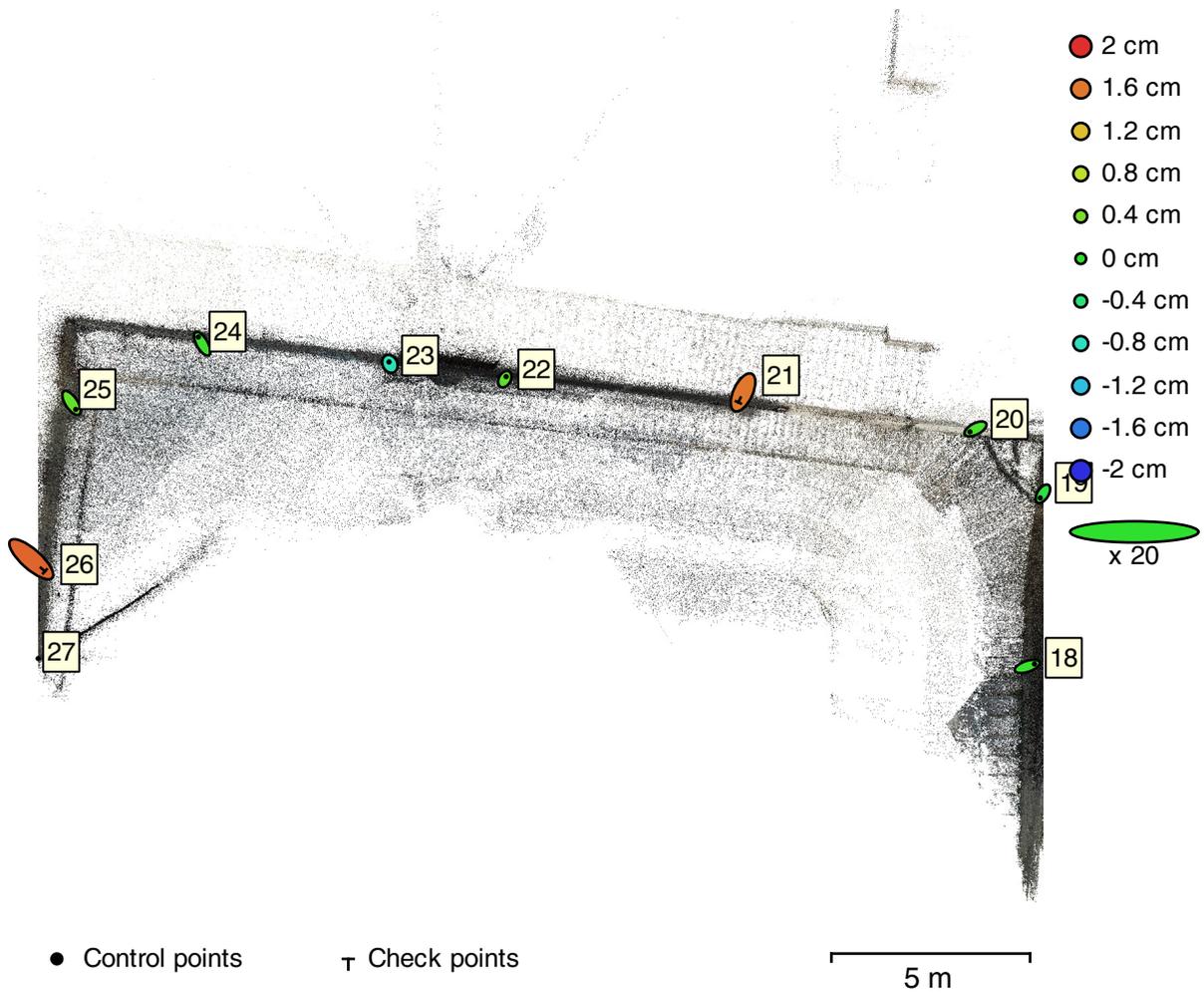


Fig. 3. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
7	1.06815	1.08766	0.328348	1.52445	1.55941

Table 3. Control points RMSE.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
2	2.55656	2.81772	1.64856	3.80468	4.14648

Table 4. Check points RMSE.

<b>Label</b>	<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>Total (cm)</b>	<b>Image (pix)</b>
18	1.8245	0.614154	0.0674845	1.92628	1.380 (28)
19	-0.656863	-1.04842	-0.0924292	1.24064	1.012 (37)
20	-1.40512	-0.736121	0.152528	1.59358	1.551 (34)
22	0.342723	0.638582	0.239106	0.763163	1.619 (52)
23	-0.22327	0.47502	-0.752277	0.917286	0.907 (19)
24	-0.958838	1.70492	0.0926178	1.95824	1.132 (35)
25	1.07947	-1.65005	0.29437	1.99363	1.377 (52)
27					
<b>Total</b>	<b>1.06815</b>	<b>1.08766</b>	<b>0.328348</b>	<b>1.55941</b>	<b>1.350</b>

Table 5. Control points.

<b>Label</b>	<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>Total (cm)</b>	<b>Image (pix)</b>
21	-1.17831	-2.53321	1.59088	3.21504	1.209 (14)
26	3.41813	-3.07603	1.70429	4.90409	1.036 (42)
<b>Total</b>	<b>2.55656</b>	<b>2.81772</b>	<b>1.64856</b>	<b>4.14648</b>	<b>1.082</b>

Table 6. Check points.

# Digital Elevation Model

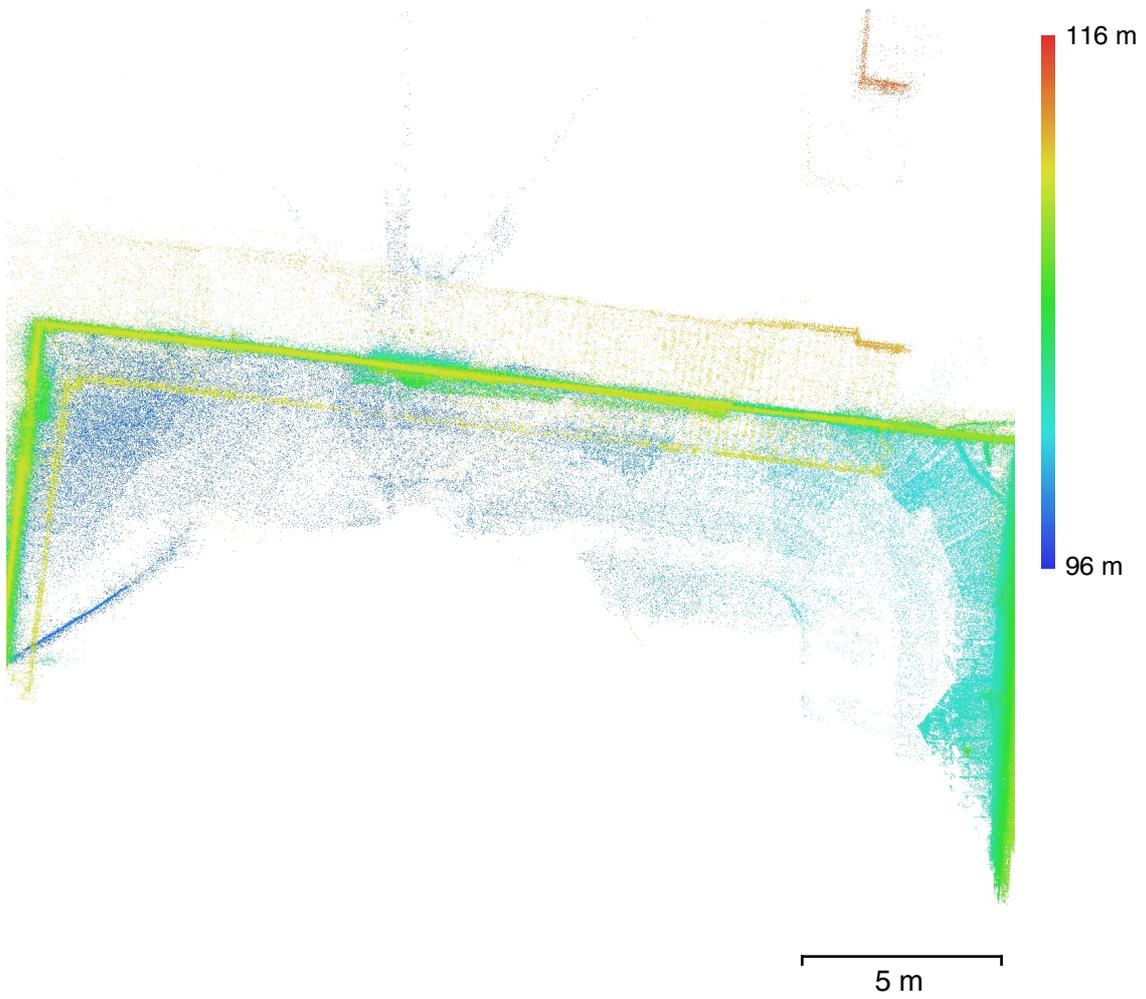


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: unknown

Point density: unknown

# Processing Parameters

## General

Cameras	449
Aligned cameras	449
Markers	10
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

## Point Cloud

Points	2,339,366 of 2,904,018
RMS reprojection error	0.36203 (1.39101 pix)
Max reprojection error	3.22789 (47.8948 pix)
Mean key point size	4.04976 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	5.0807

## Alignment parameters

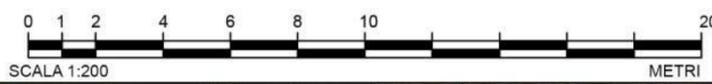
Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Yes
Key point limit	0
Tie point limit	0
Matching time	37 minutes 5 seconds

## Optimization parameters

Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1-p4
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	1 minutes 26 seconds

## Software

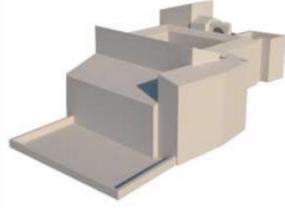
Version	1.4.2 build 6205
Platform	Windows 64



LEGENDA

- profilo rilevato
- marker aerei

Misure eseguite nel mese di settembre 2018 dal Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali del Dip.to di Architettura e Design  
Disegni realizzati da Vittorio Scolamiero



DJI MAVIC SPARK



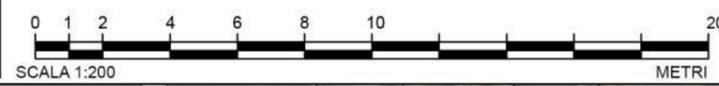
**PhotoScan**

3D Modeling and Mapping

Agisoft

SOFTWARE

- Altezzine di volo :  
67,6 m
- Fotogrammi acquisiti :  
n. 511
- Fotogrammi orientati :  
n. 511
- Marker utilizzati :  
n. 12
- Scarto (m) :  
max: 0,024  
min: 0,007  
med: 0,014
- Scarto (pix) :  
max: 0,938  
min: 0,617  
med: 0,728
- Risoluzione ortofoto :  
1,85mm/pix



**LEGENDA**

- profilo rilevato
- - - profilo ipotizzato
- quota altimetrica

Misure eseguite nel mese di settembre 2018 dal Laboratorio di Geomatica per Beni Culturali del Dip.to di Architettura e Design  
Disegni realizzati da Vittorio Scolamiero

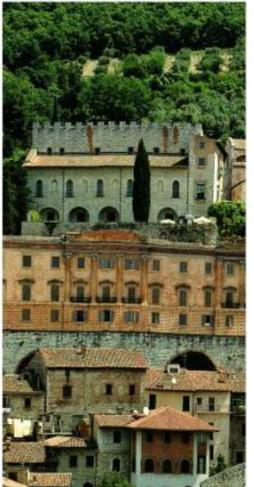
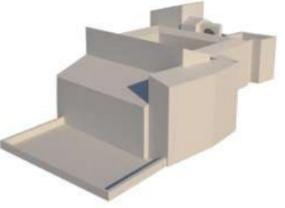
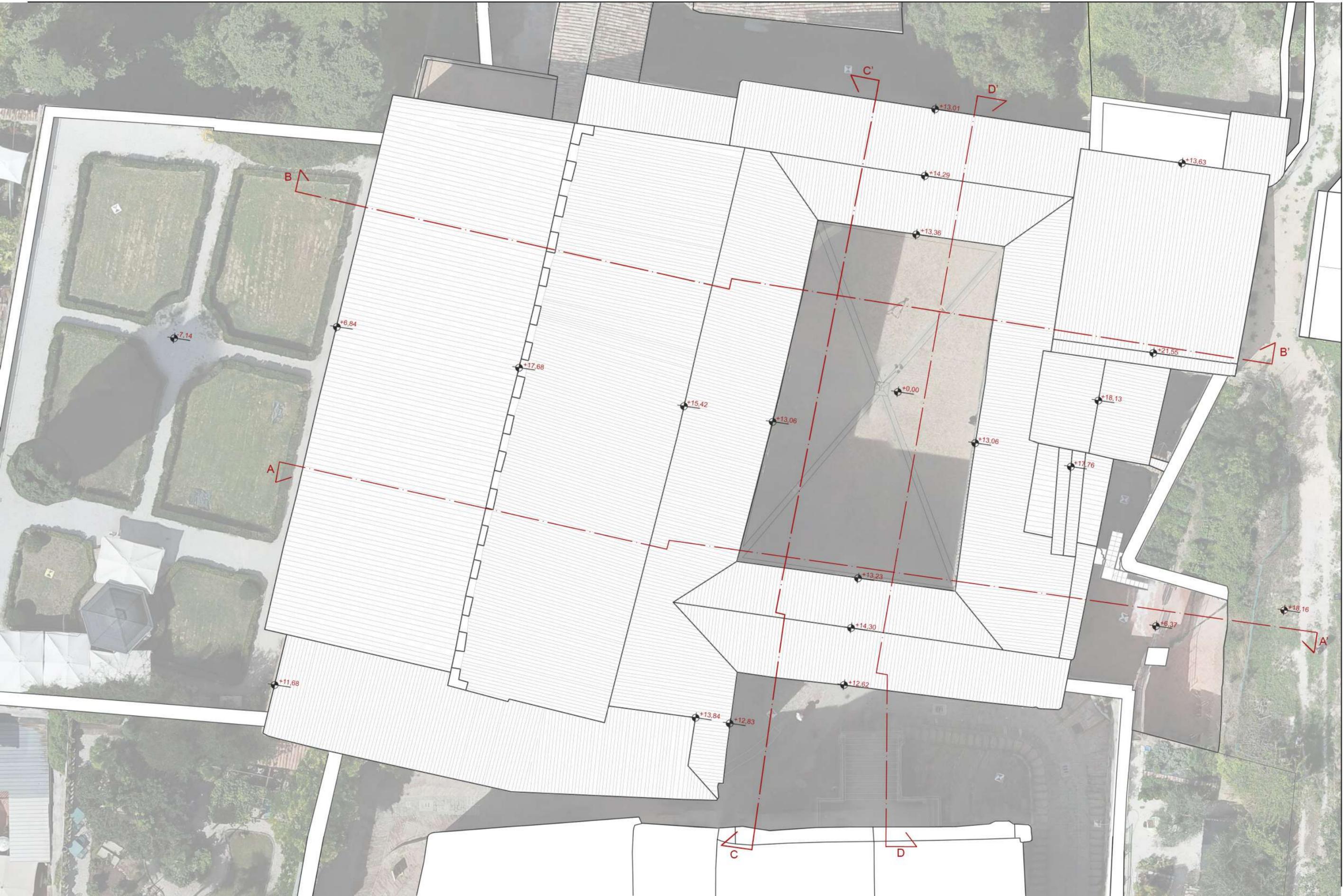


Foto aerea Palazzo

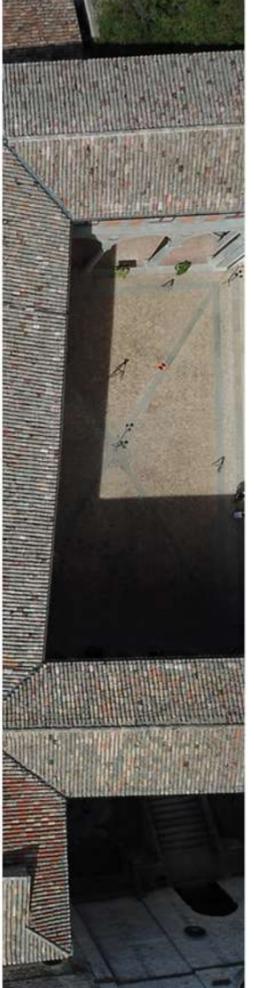


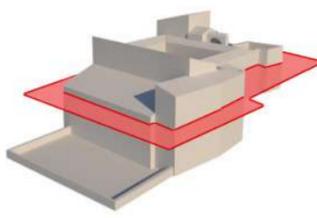
Foto aerea Palazzo



LEGENDA

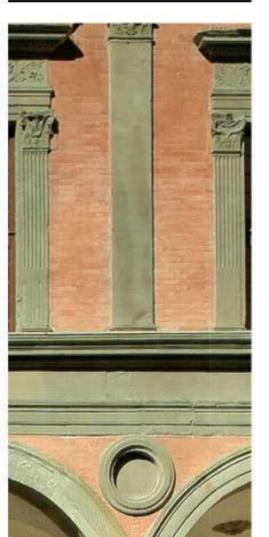
- profilo rilevato
- profilo ipotizzato
- proiezioni soffitto
- muratura
- ⊗ proiezioni volte
- ⊕ quota altimetrica

Misure eseguite nel mese di settembre 2018 dal Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali del Dip.to di Architettura e Design  
 Disegni realizzati da Vittorio Scolamiero



LEGENDA AMBIENTI

- ① Corridoio espositivo
- ② Scalone d'onore
- ③ Vestibolo
- ④ Uffici - Sorveglianza
- ⑤ Deposito
- ⑥ Sala espositiva
- ⑦ Sala espositiva
- ⑧ Sala espositiva
- ⑨ Sala espositiva
- ⑩ Sottotetto
- ⑪ Servizi
- ⑫ Palazzo Comunale
- ⑬ Cisterna



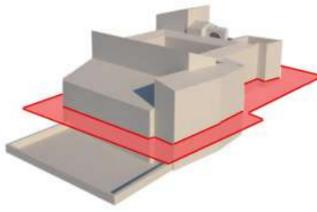
Dettaglio cortile



**LEGENDA**

- profilo rilevato
- profilo ipotizzato
- proiezioni soffitto
- muratura
- ⊗ proiezioni volte
- ⊙ quota altimetrica

Misure eseguite nel mese di settembre 2018 dal Laboratorio di Geomatica per Beni Culturali del Dip.to di Architettura e Design  
 Disegni realizzati da Vittorio Scolamiero

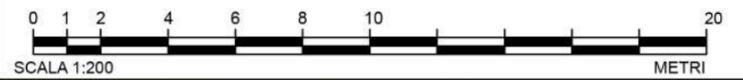


**LEGENDA AMBIENTI**

- ① Cortile d'onore
- ② Scalone d'onore
- ③ Vestibolo - Cappellina
- ④ Anticamera
- ⑤ Studiolo
- ⑥ Corridoio federiciano
- ⑦ Salone federiciano
- ⑧ Sala D
- ⑨ Sala E
- ⑩ Camera di Federico
- ⑪ Camera da letto
- ⑫ "Passetto"
- ⑬ Cisterna



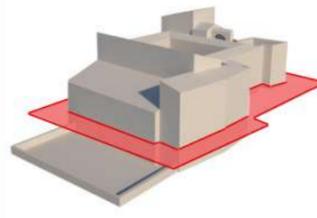
Dettaglio cortile



LEGENDA

- profilo rilevato
- - - profilo ipotizzato
- proiezioni soffitto
- muratura
- ⊗ proiezioni volte
- ⊕ quota altimetrica

Misure eseguite nel mese di settembre 2018 dal Laboratorio di Geomatica per Beni Culturali del Dip.to di Architettura e Design  
 Disegni realizzati da Vittorio Scolamiero



LEGENDA AMBIENTI

- ① Scavo archeologico
- ② Corridoio
- ③ Vestibolo
- ④ Vestibolo

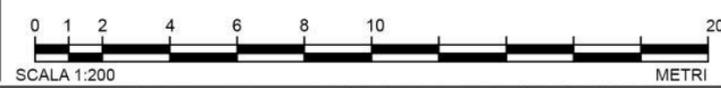


Corridoio



Scavo archeologico

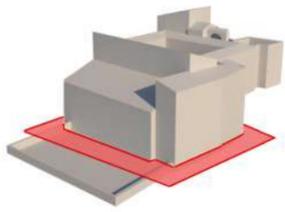




LEGENDA

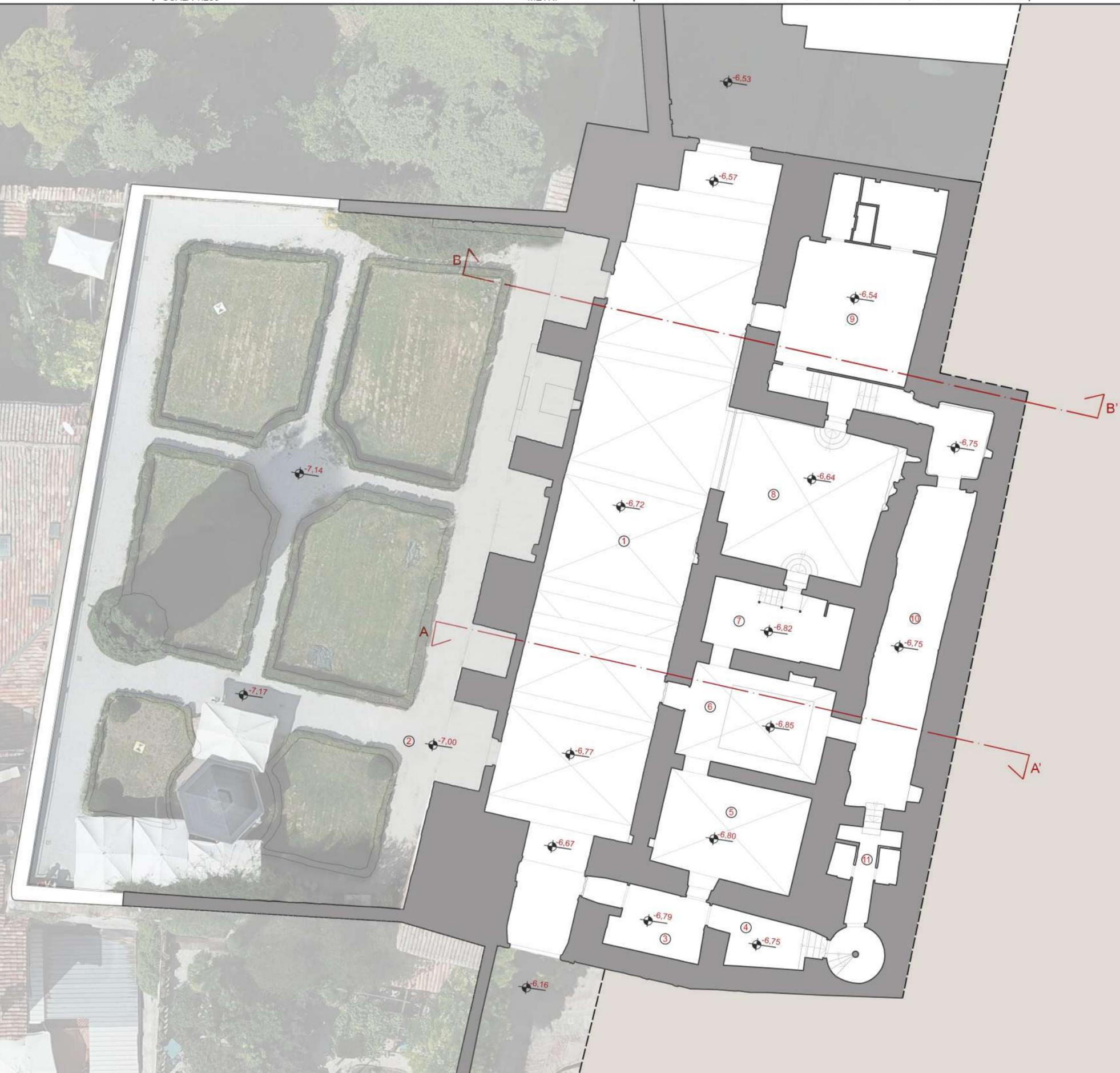
- profilo rilevato
- - - profilo ipotizzato
- proiezioni soffitto
- muratura
- ⊗ proiezioni volte
- ⊕ quota altimetrica

Misure eseguite nel mese di settembre 2018 dal Laboratorio di Geomatica per Beni Culturali del Dip.to di Architettura e Design  
Disegni realizzati da Vittorio Scolamiero

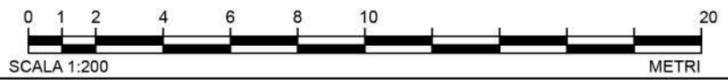


LEGENDA AMBIENTI

- ① "Voltone"
- ② Giardino pensile
- ③ Vestibolo
- ④ Vestibolo
- ⑤ Sala
- ⑥ Sala con mosaico
- ⑦ Sala
- ⑧ Sala conferenze
- ⑨ Deposito
- ⑩ Corridoio
- ⑪ Servizi



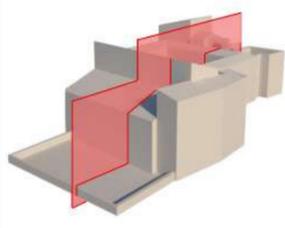
Voltone



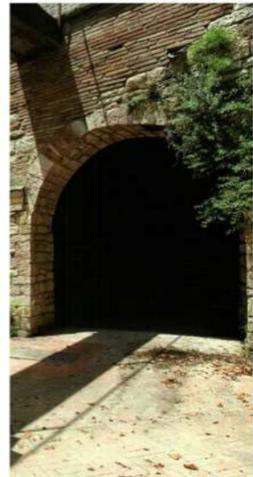
LEGENDA

- profilo rilevato
- profilo ipotizzato
- muratura
- √ quota altimetrica

Misure eseguite nel mese di settembre 2018 dal Laboratorio di Geomatica per Beni Culturali del Dip.to di Architettura e Design  
Disegni realizzati da Vittorio Scolamiero



Palazzo comunale



Palazzo comunale

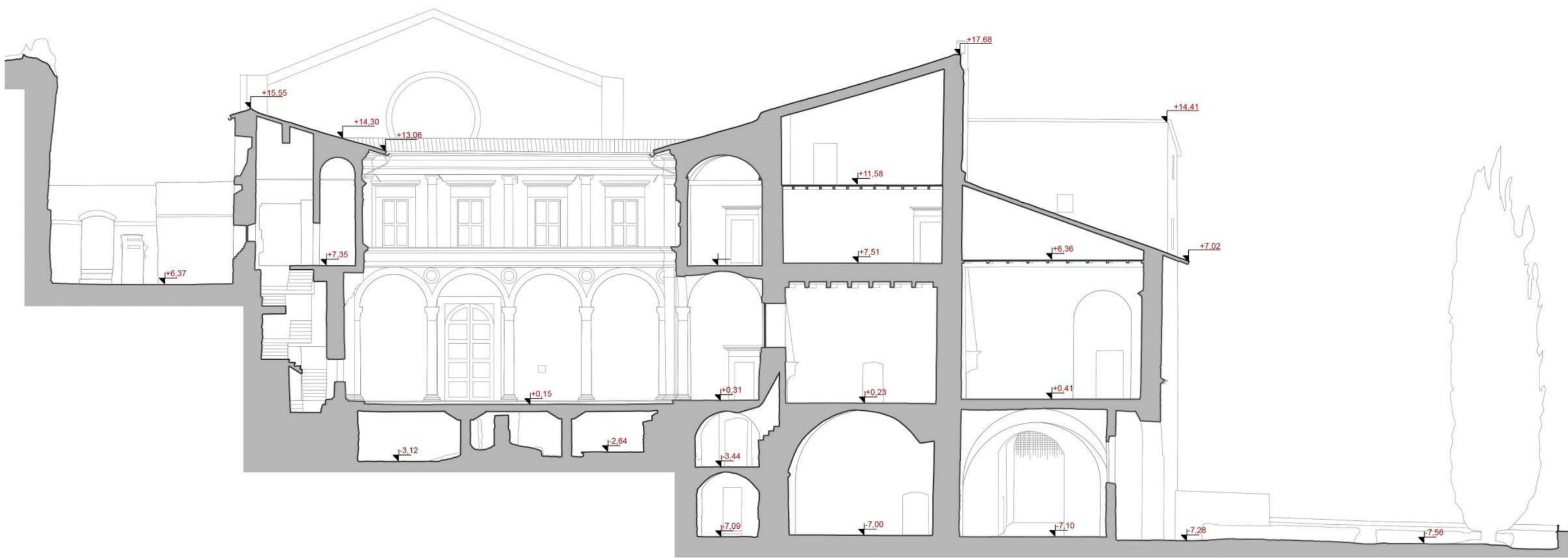
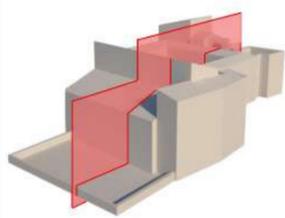


Loggiato cortile d'onore

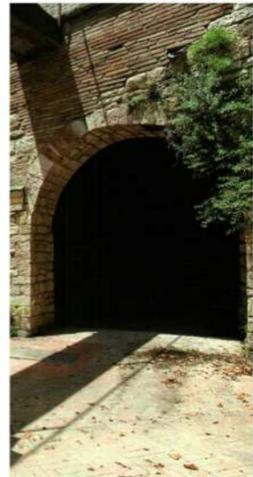


LEGENDA — profilo rilevato — profilo ipotizzato ■ muratura ↙ quota altimetrica

Misure eseguite nel mese di settembre 2018 dal Laboratorio di Geomatica per Beni Culturali del Dip.to di Architettura e Design Disegni realizzati da Vittorio Scolamiero



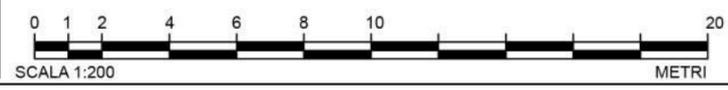
Palazzo comunale



Palazzo comunale



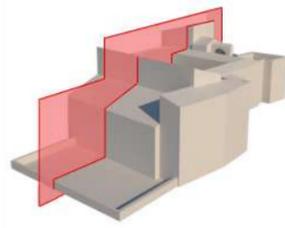
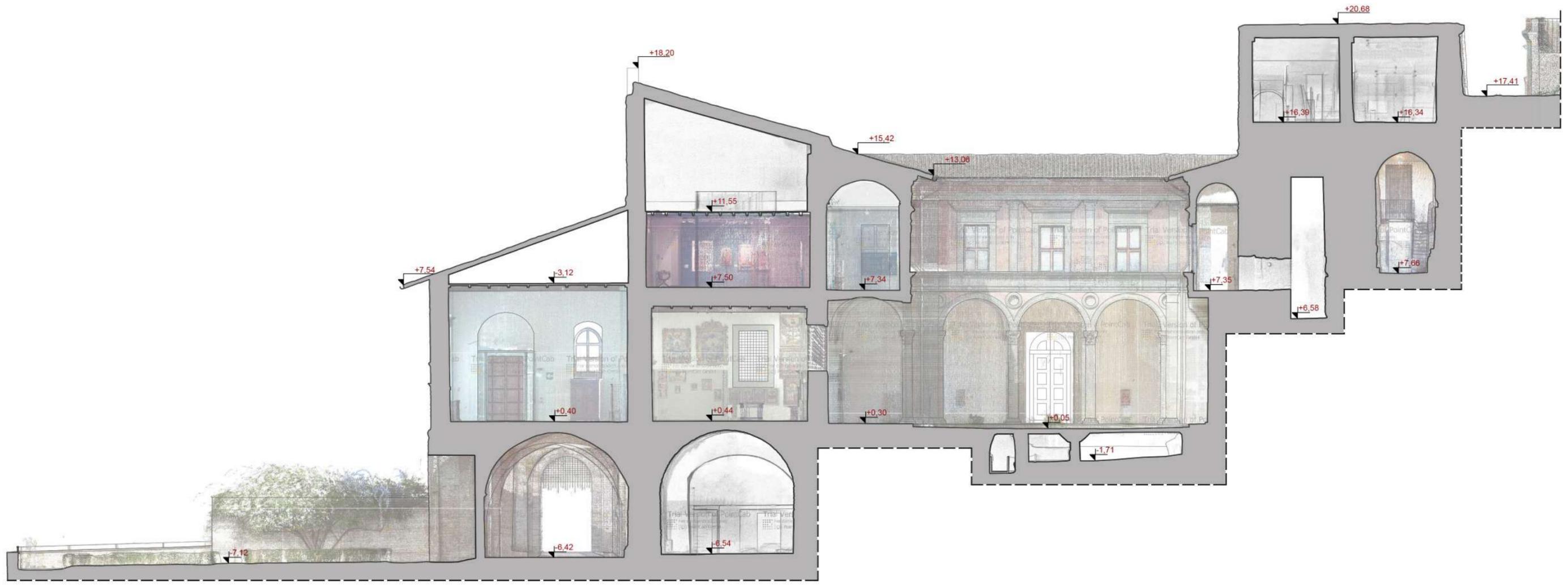
Loggiato cortile d'onore



LEGENDA

- profilo rilevato
- - - profilo ipotizzato
- █ muratura
- ↙ quota altimetrica

Misure eseguite nel mese di settembre 2018 dal Laboratorio di Geomatica per Beni Culturali del Dip.to di Architettura e Design  
Disegni realizzati da Vittorio Scolamiero



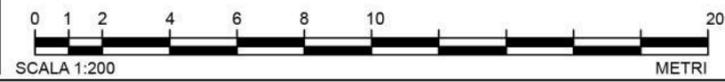
Salone federiciano



Corridoio piano primo

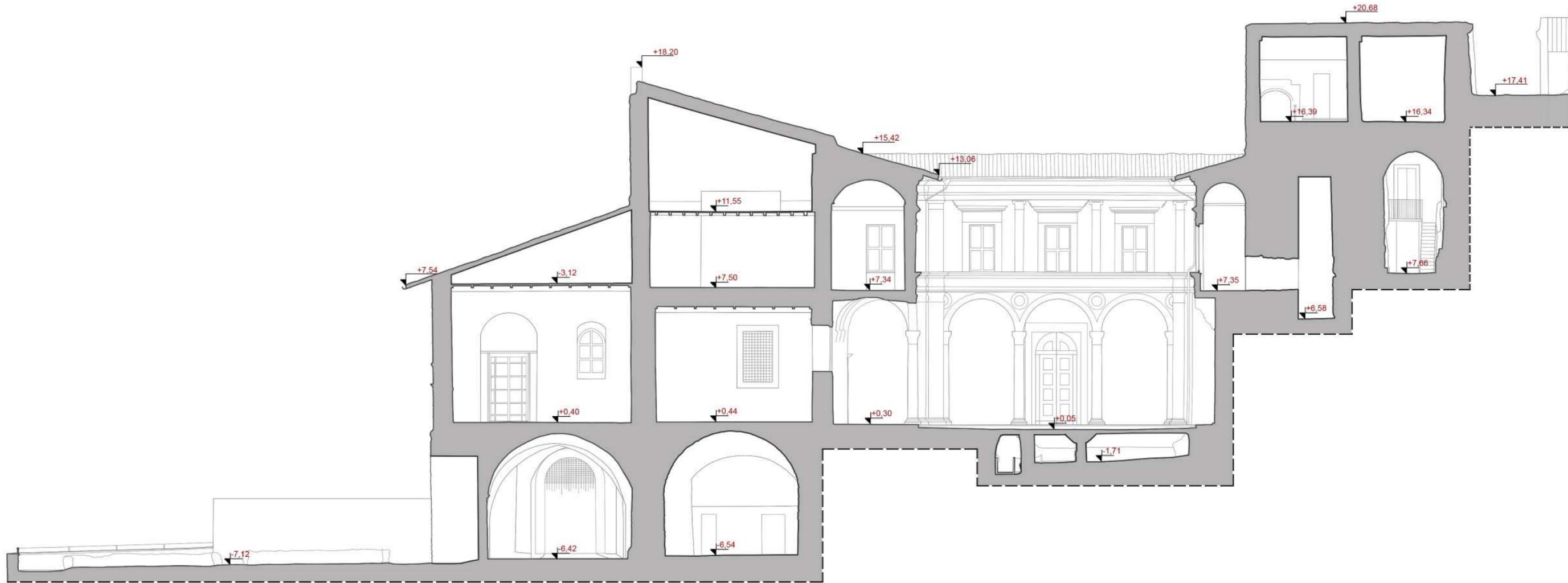
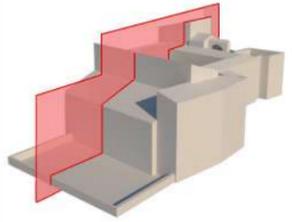


Palazzo comunale



**LEGENDA** — profilo rilevato — profilo ipotizzato  
 ■ muratura ↙ quota altimetrica

Misure eseguite nel mese di settembre 2018 dal Laboratorio di Geomatica per Beni Culturali del Dip.to di Architettura e Design  
 Disegni realizzati da Vittorio Scolamiero



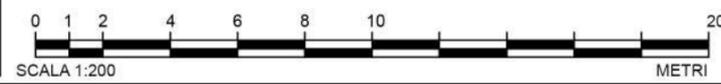
Salone federiciano



Corridoio piano primo



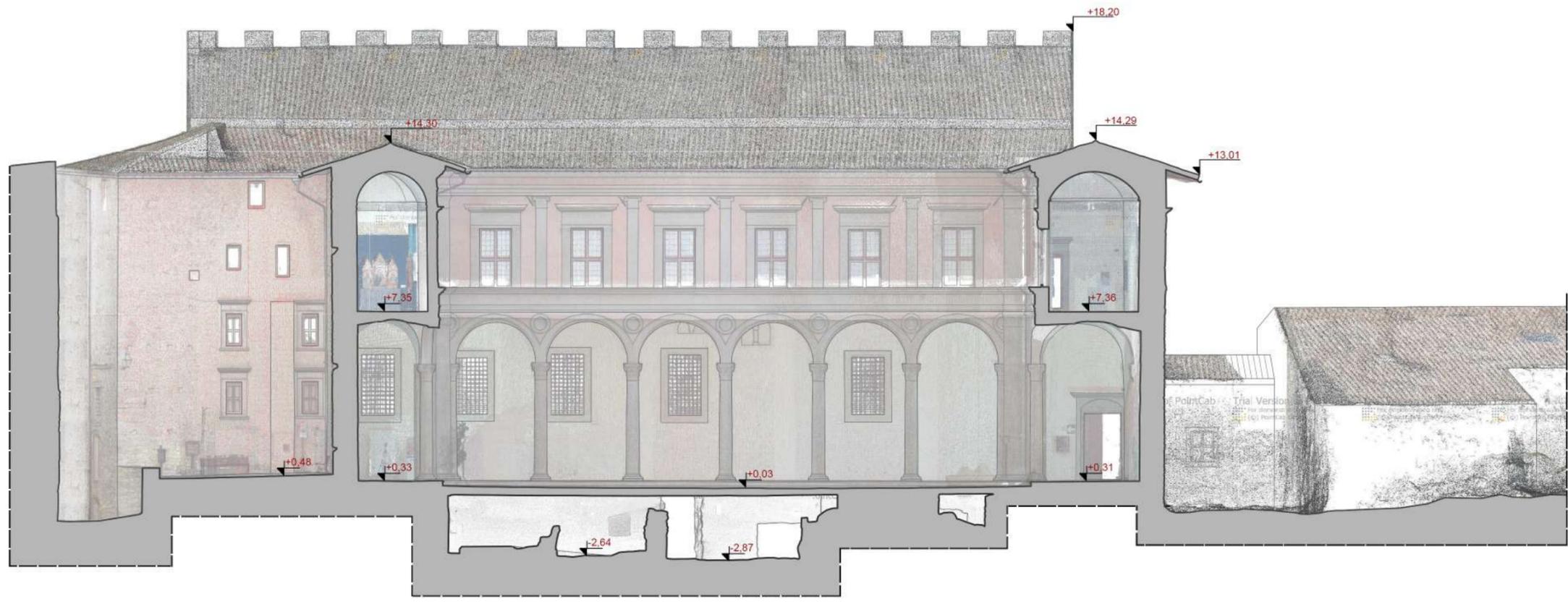
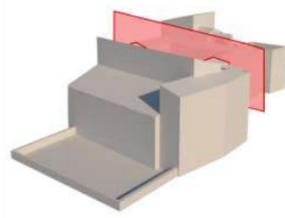
Palazzo comunale



LEGENDA

- profilo rilevato
- profilo ipotizzato
- muratura
- √ quota altimetrica

Misure eseguite nel mese di settembre 2018 dal Laboratorio di Geomatica per Beni Culturali del Dip.to di Architettura e Design  
Disegni realizzati da Vittorio Scolamiero



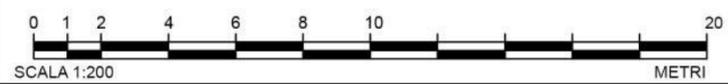
Veduta esterna



Dettaglio veduta est.

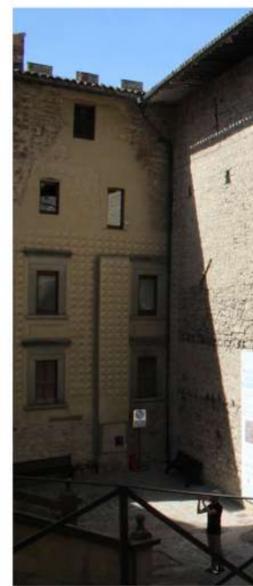
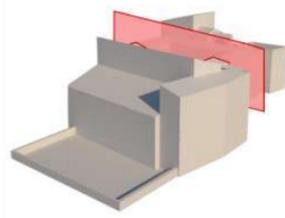
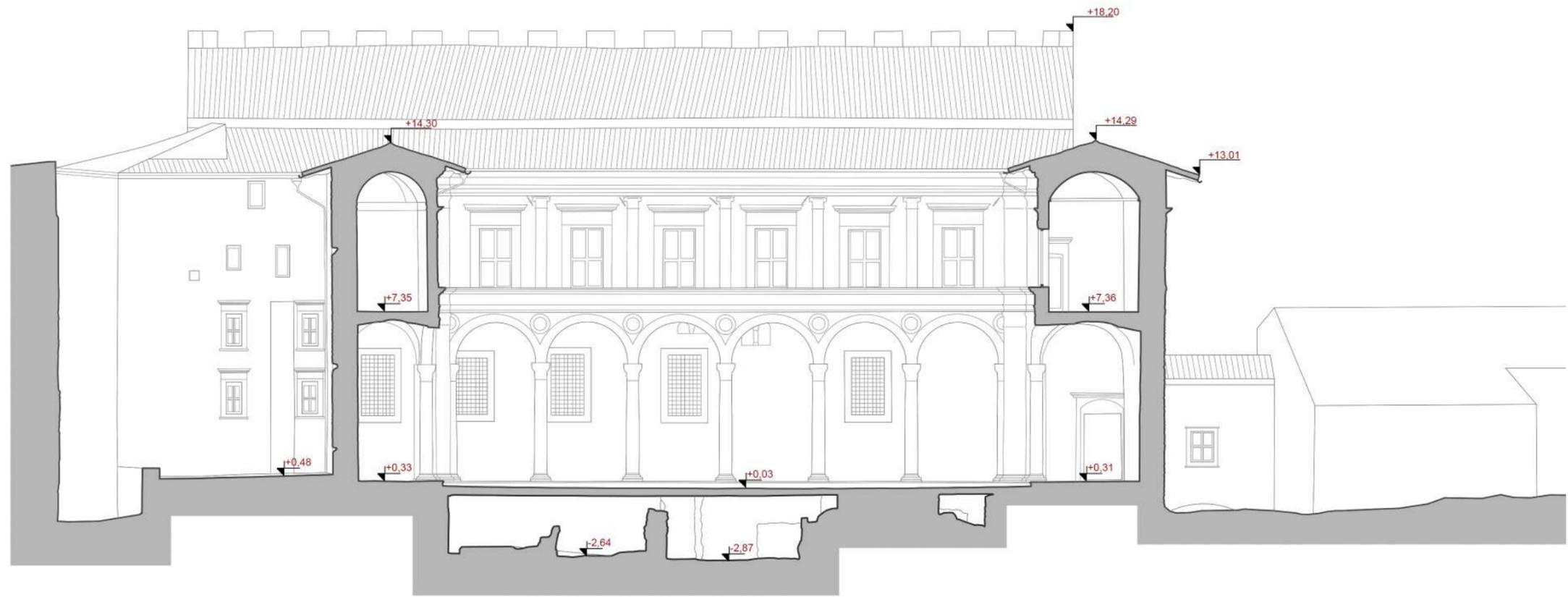


Cortile d'onore



LEGENDA — profilo rilevato — profilo ipotizzato  
■ muratura ↙ quota altimetrica

Misure eseguite nel mese di settembre 2018 dal Laboratorio di Geomatica per Beni Culturali del Dip.to di Architettura e Design  
Disegni realizzati da Vittorio Scolamiero



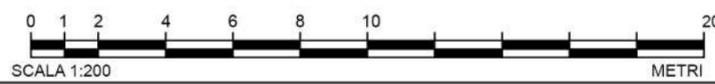
Veduta esterna



Dettaglio veduta est.



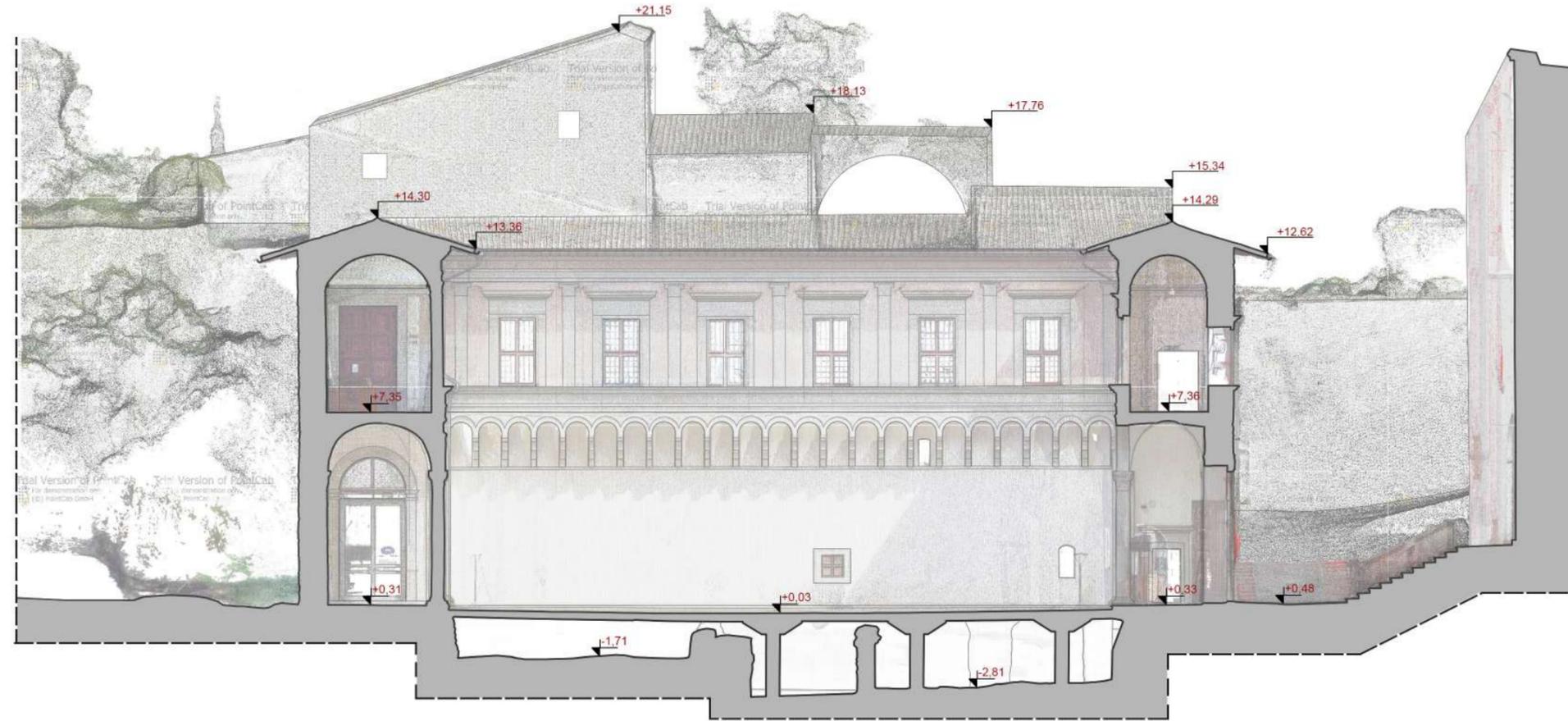
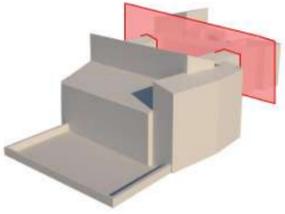
Cortile d'onore



LEGENDA

- profilo rilevato
- - - profilo ipotizzato
- muratura
- ↙ quota altimetrica

Misure eseguite nel mese di settembre 2018 dal Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali del Dip.to di Architettura e Design  
Disegni realizzati da Vittorio Scolamiero



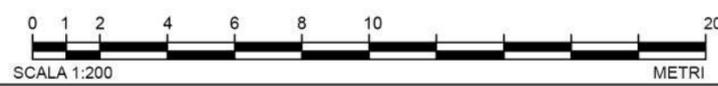
Cortile d'onore



Dettaglio archetti



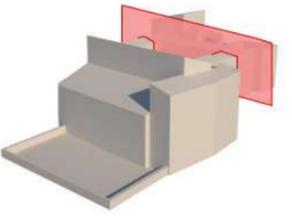
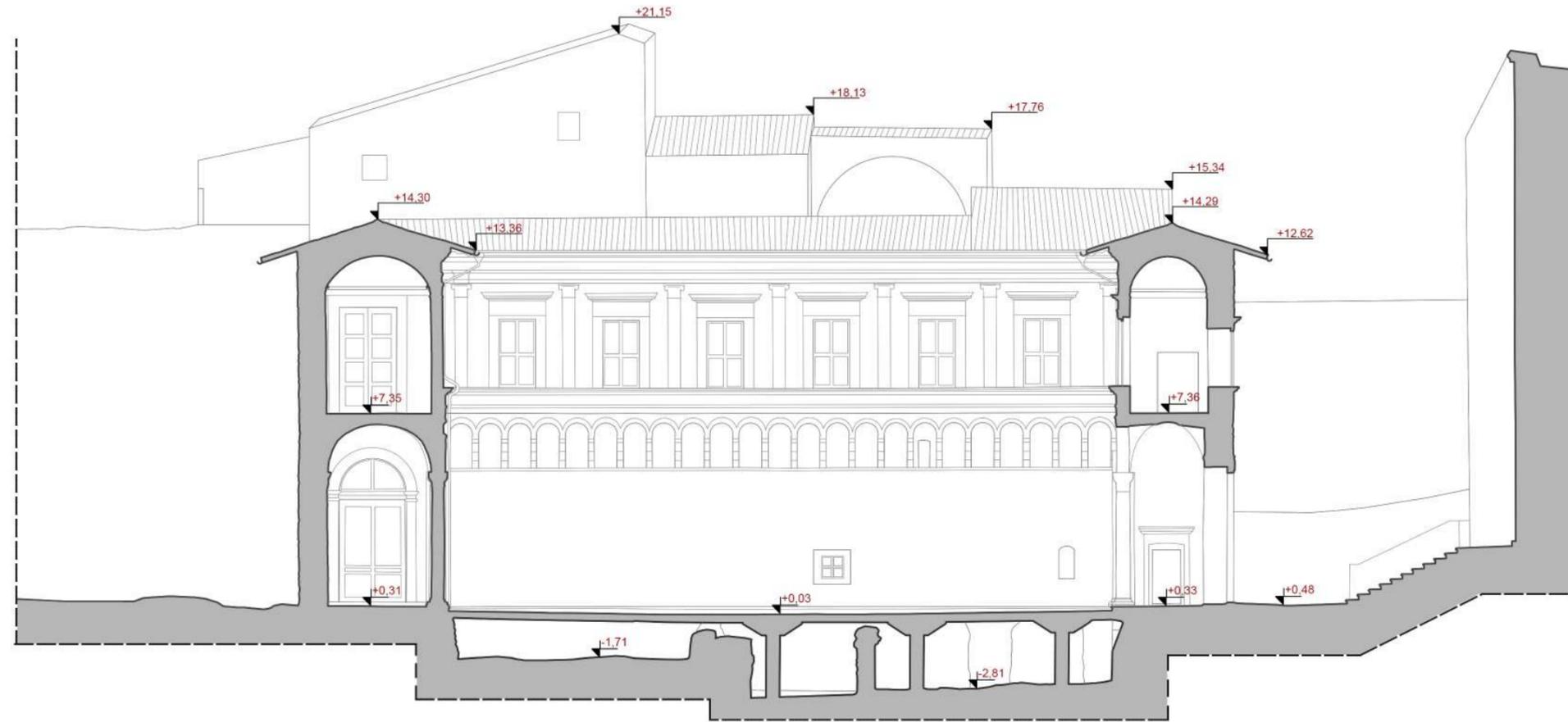
Scavo archeologico



LEGENDA

- profilo rilevato
- profilo ipotizzato
- muratura
- √ quota altimetrica

Misure eseguite nel mese di settembre 2018 dal Laboratorio di Geomatica per Beni Culturali del Dip.to di Architettura e Design  
Disegni realizzati da Vittorio Scolamiero



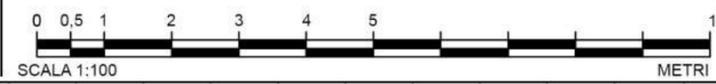
Cortile d'onore



Dettaglio archetti



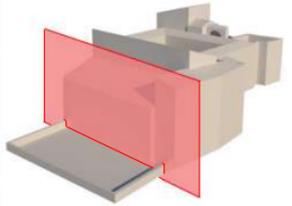
Scavo archeologico



## LEGENDA

- profilo rilevato
- - - profilo ipotizzato

Misure eseguite nel mese di settembre 2018 dal Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali del Dip.to di Architettura e Design  
Disegni realizzati da Vittorio Scolamiero



DJI MAVIC SPARK



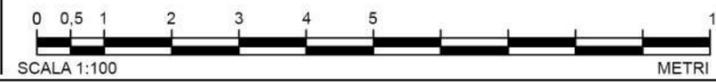
**PhotoScan**

3D Modeling and Mapping

Agisoft

## SOFTWARE

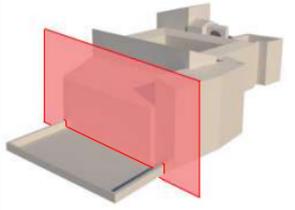
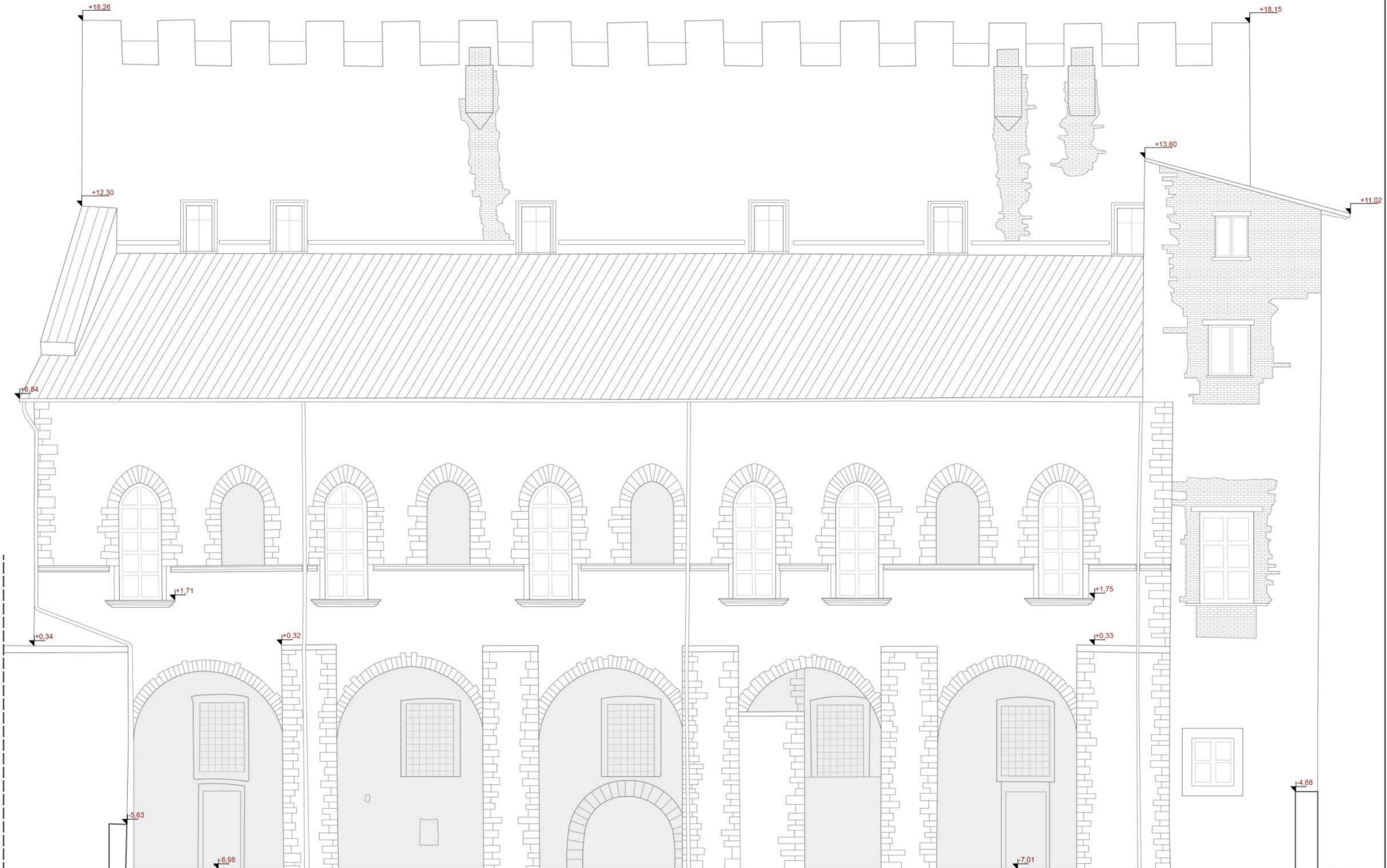
- Altitudine di volo :  
16,3 m
- Fotogrammi acquisiti :  
n. 366
- Fotogrammi orientati :  
n. 366
- Marker utilizzati :  
n. 17
- Scarto (m) :  
max: 0,013  
min: 0,006  
med: 0,009
- Scarto (pix) :  
max: 2,74  
min: 1,06  
med: 1,75
- Risoluzione ortofoto :  
4mm/pix



LEGENDA

- profilo rilevato
- - - profilo ipotizzato
- ↙ quota altimetrica

Misure eseguite nel mese di settembre 2018 dal Laboratorio di Geomatica per Beni Culturali del Dip.to di Architettura e Design  
Disegni realizzati da Vittorio Scolamiero



Veduta aerea prospetto



Dettaglio prospetto

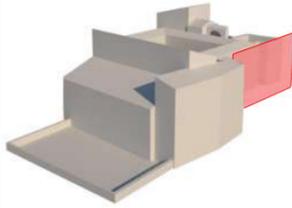


Veduta dal giardino



**LEGENDA** — profilo rilevato  
- - - profilo ipotizzato

Misure eseguite nel mese di settembre 2018 dal Laboratorio di Geomatica per Beni Culturali del Dip.to di Architettura e Design  
Disegni realizzati da Vittorio Scolamiero



DJI MAVIC SPARK



**PhotoScan**

3D Modeling and Mapping

Agisoft

SOFTWARE

- Altezza di volo :  
7,52 m

- Fotogrammi acquisiti :  
n. 449

- Fotogrammi orientati :  
n. 449

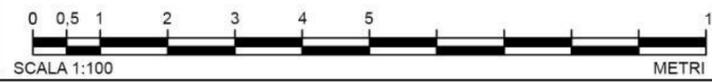
- Marker utilizzati :  
n. 12

- Scarto (m) :  
max: 0,019  
min: 0,007  
med: 0,015

- Scarto (pix) :  
max: 1,61  
min: 0,09  
med: 1,35

- Risoluzione ortofoto :  
2mm/pix

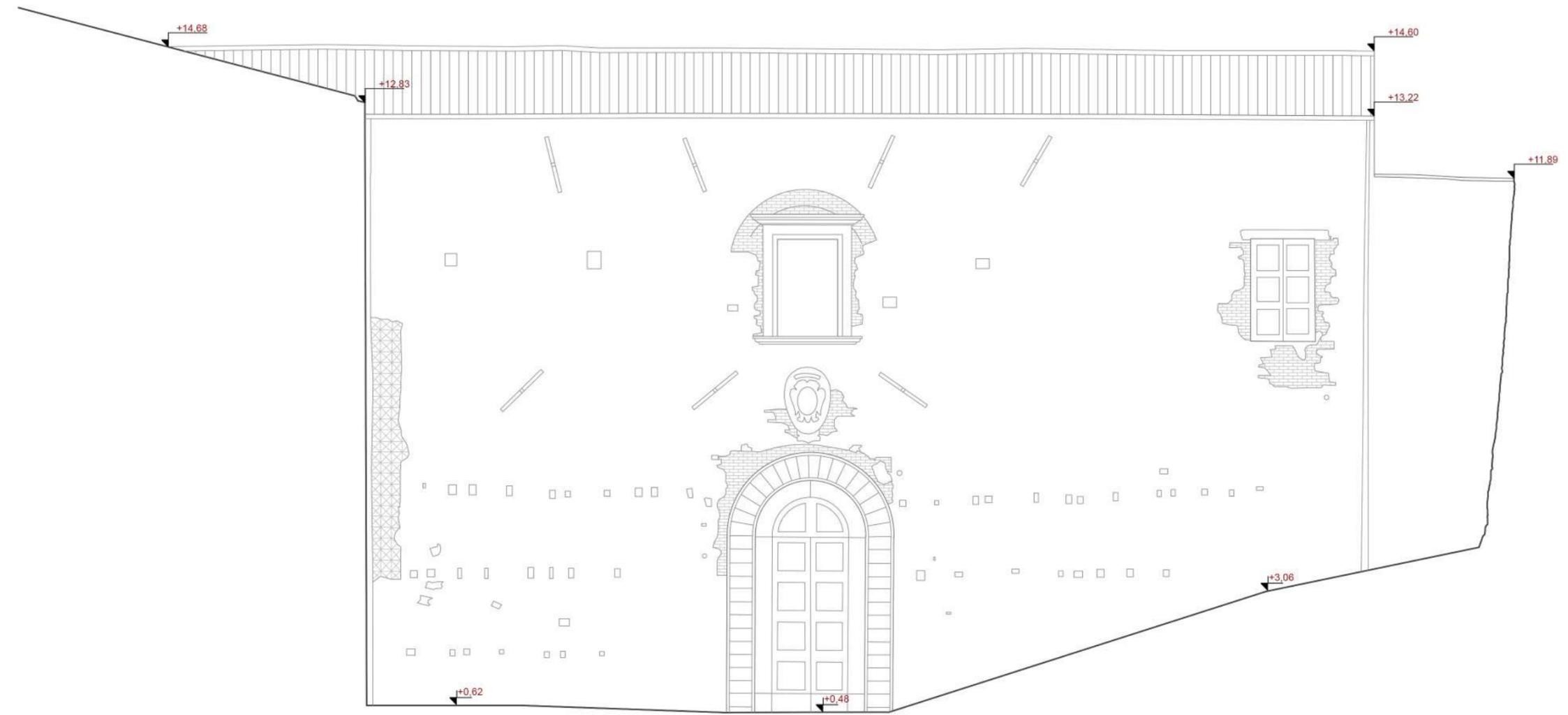
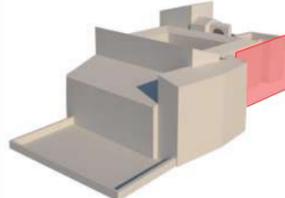




LEGENDA

- profilo rilevato
- - - profilo ipotizzato
- ↙ quota altimetrica

Misure eseguite nel mese di settembre 2018 dal Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali del Dip.to di Architettura e Design  
Disegni realizzati da Vittorio Scolamiero



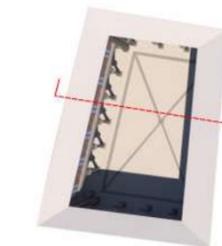
Dettaglio portone



Dettaglio apertura



Dettaglio ingresso



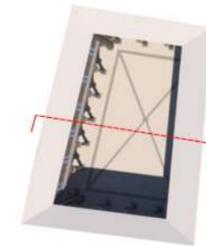
Dettaglio base colonna



Dettaglio angolo cortile



Dettaglio archetti



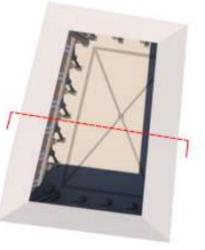
Capitello colonna



Dettaglio cortile



Dettaglio archetti



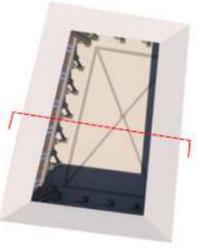
Dettaglio aperture



Dettaglio colonna



Dettaglio archetti



Loggiato cortile



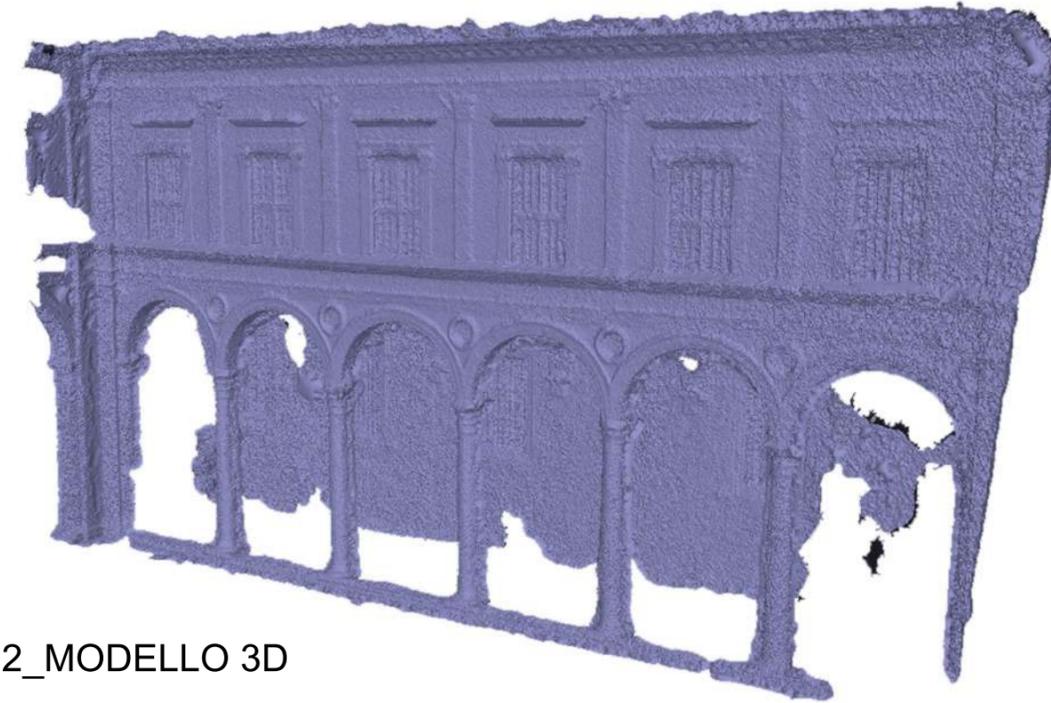
Dettaglio cortile



Dettaglio archetti



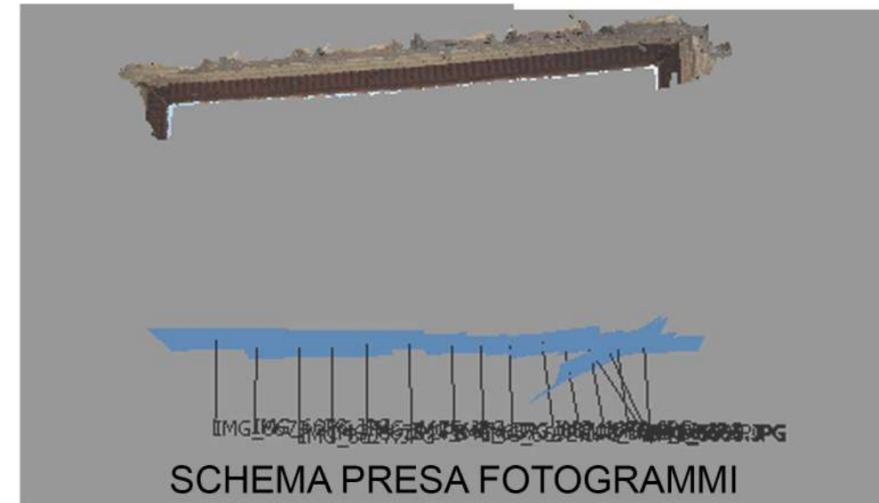
1\_NUVOLA DENSA



2\_MODELLO 3D

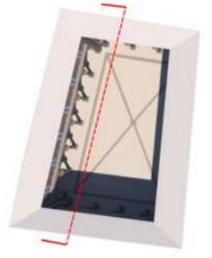


3\_MODELLO CON COLORI REALI



**RISULTATI ELABORAZIONE**

PUNTI DI LEGAME :	13,244 punti
NUVOLA DENSA :	24,447,435 punti altissima qualità
MODELLO 3D :	4,752,755 superfici



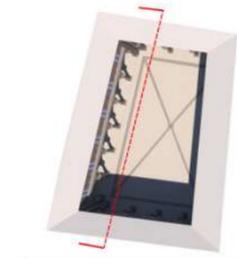
CANON 1300D



**PhotoScan**  
3D Modeling and Mapping  
Agisoft

SOFTWARE

- Fotogrammi acquisiti: n. 16
- Fotogrammi orientati : n.16
- Marker utilizzati: n.3
- Scarto (m) : 0.009 med.
- Scarto (pix) : 1.45 med.



CANON 1300D



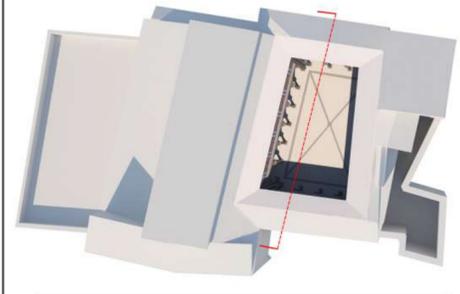
**PhotoScan**

3D Modeling and Mapping

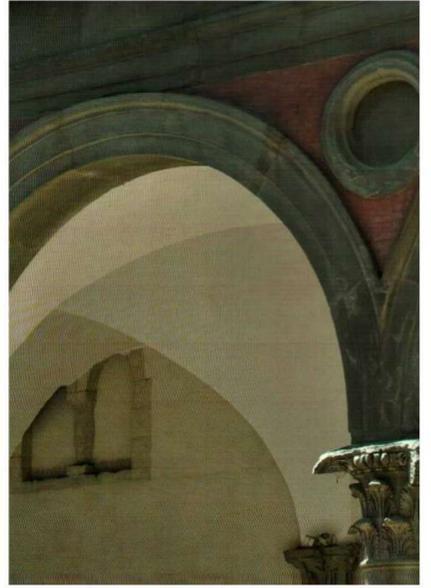
Agisoft

SOFTWARE

- Fotogrammi acquisiti : n.16
- Fotogrammi orientati : n.16
- Marker utilizzati : n. 3
- Scarto (m) : 0.009 med.
- Scarto (pix) : 1.45 med.
- Risoluzione ortofoto : 3 mm/pix



Dettaglio aperture murate



Dettaglio apertura murata



Dettaglio cornice aperture piano primo