

# POLITECNICO DI TORINO

## Corso di Laurea Magistrale in Architettura per il Progetto Sostenibile

Tesi di Laurea Magistrale

### Metodi di Rilievo metrico 3D multiscala per il patrimonio costruito. Applicazioni aeree e terrestri in differenti scenari.



#### **Relatori**

prof.<sup>ssa</sup> Antonia Spanò

*firma del relatore*

.....

prof. Filiberto Chiabrando

*firma del relatore*

.....

#### **Candidato**

Stefano Perri

*firma del candidato*

.....

A.A. 2017/2018



# INDICE

## Introduzione

### 1 Metodi innovativi per il patrimonio culturale: Fotogrammetria Terrestre e UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), Tecniche Lidar

- 1.1 Il supporto dei metodi topografici
- 1.2 Fotogrammetria
- 1.3 Fotogrammetria UAV
- 1.4 Tecniche Lidar
- 1.5 Applicazioni ed Utilizzi delle tecniche fotogrammetriche e LIDAR

### 2 Generazione di nuvole di punti

- 2.1 *Processing* Fotogrammetrico
- 2.2 Lidar *Processing*

### 3 Applicazione dei metodi e delle tecniche in differenti scenari multiscala

#### 3.1 Caso studio: Chiesa della rocca di San Silvestro

- 3.1.1 Uso della fotogrammetria UAV
- 3.1.2 Strumentazione Utilizzata
- 3.1.3 Intervento sul campo e metodo applicativo
- 3.1.4 Elaborazioni
- 3.1.5 Risultati e Rappresentazioni
- 3.1.6 Riscontri e valutazioni critiche dei risultati

#### 3.2 Caso studio: Cappellone della Basilica di San Nicola in Tolentino

- 3.2.1 Fotogrammetria Terrestre
- 3.2.2 Strumentazione Utilizzata
- 3.2.3 Intervento sul campo e metodo applicativo
- 3.2.4 Elaborazioni
- 3.2.5 Risultati e Rappresentazioni
- 3.2.6 Riscontri e valutazioni critiche dei risultati

### 3.3 Caso studio: Il Paraboloide di Casale Monferrato

3.3.1 Integrazione tecniche Lidar e fotogrammetriche UAV

3.3.2 Strumentazione Utilizzata

3.3.3 Intervento sul campo e metodo applicativo

3.3.4 Elaborazioni

3.3.5 Risultati e Rappresentazioni

3.3.6 Riscontri e valutazioni critiche dei risultati

### Conclusioni

## Introduzione

L'obiettivo principale della tesi è quello di illustrare e approfondire differenti metodi di intervento nel campo della Geomatica per la documentazione dei beni culturali. Sono stati identificati tre scenari a scala diversa, nei quali sono state eseguite attività di conoscenza e analisi delle consistenze e dello stato di fatto, con l'impiego di diversi metodi e tecniche, atti ad ottenere una grande quantità di dati caratterizzati da una ricchezza metrica e tematica.

In risposta ad una sempre crescente richiesta di conoscenza dei manufatti antropici e del patrimonio paesaggistico, si ricorre ormai, sempre più, all'impiego di strumenti e tecniche innovative. Grazie all'avanzare dei processi tecnologici e della relativa automazione che permette di ridurre i tempi delle operazioni di rilievo sul campo e delle successive elaborazioni in laboratorio.

Lo scopo finale delle operazioni del rilievo metrico è quello di fornire specifiche e accurate rappresentazioni di tipo morfo-geometrico e di natura tematica, relativa ai contenuti dello stato di conservazione di materiali e sistemi costruttivi del bene oggetto di indagine, al fine di poter essere fruite in un secondo momento da altri attori che interverranno nella conservazione del manufatto.

I tre casi studio rappresentano differenti ambiti del patrimonio costruito: il primo è un esempio di manufatto archeologico inserito in un contesto di grande valore paesaggistico (Rocca di San Silvestro nel comune di Campiglia Marittima); il secondo è un'architettura religiosa con apparati pittorici murari (Cappellone della Basilica di San Nicola in Tolentino); ed infine, un manufatto appartenente all'ambito dell'archeologia industriale (Paraboloide di Casale Monferrato).

Per la fase di documentazione sono stati impiegati diversi metodi e strumenti, ormai affermati nel campo della Geomatica: il metodo *image based* in cui si utilizza la tecnica fotogrammetrica digitale, sia terrestre, che aerea con l'utilizzo di dispositivi UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) e il

metodo *range based* che ha previsto l'utilizzato un sistema LIDAR (*Light Detection and Ranging*) terrestre.

E' possibile identificare due importanti fasi del processo di rilievo, il primo consistente nel rilievo sul campo, dove si cerca di ridurre il più possibile l'impiego di risorse umane e i tempi nella raccolta di dati grezzi, optando per un approccio sostenibile, a differenza di procedure più datate dove l'intervento di rilievo sul campo richiedeva tempi e risorse maggiori. Il secondo, consiste invece, nell'organizzazione e nell'elaborazione in laboratorio, da parte dell'operatore, dei dati raccolti in tempi più ampi. Lo scopo finale è quello di ottenere aggiornamenti ed integrazioni agli elaborati grafici tradizionali, comuni al linguaggio architettonico, (planimetrie e sezioni territoriali, piante prospetti e sezioni di manufatti architettonici) a partire da elaborati 3D, come nuvole di punti, che vengono analizzate ed elaborate per poter generare sezioni, sviluppi di isoipse ed interpretazioni metriche del manufatto oppure mesh 3D texturizzate utili a fornire invece informazioni geometriche e radiometriche dell'oggetto.

Lo svolgersi di queste attività di analisi e monitoraggio è spinta dalla consapevolezza sempre crescente dell'importanza del nostro patrimonio culturale e paesaggistico; la fragilità del patrimonio è infatti costantemente minacciata da incuria umana ed eventi naturali, che espongono la vita del bene sia al lento e graduale decadimento nel tempo, che a rischiosi quanto disastrosi eventi.

Le linee guida descritte dalle carte e dai documenti nazionali ed internazionali sulla conservazione e valorizzazione dei patrimoni culturali, sono fondamentali punti di riferimento per la conoscenza e la tutela dei Manufatti antropici e del Paesaggio.

I primi tentativi di formare un sistema di documentazione del Patrimonio Culturale sono stati dichiarati nella *Carta di Atene* nel 1931, al congresso Internazionale degli Architetti e dei Tecnici dei Monumenti Storici. Da questo congresso, è nata la volontà di produrre documentazione fotografica e descrittiva del Patrimonio Culturale, organizzato in specifici archivi.

Il tema della documentazione proposto alla Carta di Atene, viene riconosciuto nel 1965 dall'ICOMOS (*International Council of Monuments and Sites*), con la *Carta di Venezia* scritta durante il secondo congresso Internazionale degli Architetti e dei Tecnici dei Monumenti Storici nel 1964, dove si introducono le prime linee guida da seguire in tema di conservazione e documentazione dei manufatti.

*“La conservazione e il restauro dei monumenti devono far ricorso a tutte le scienze e tecniche che possono contribuire allo studio e alla salvaguardia del patrimonio architettonico”<sup>1</sup>.*

*“In tutti i lavori di conservazione, restauro o scavo devono essere previste precise documentazioni sotto forma di rapporti analitici e critici corredati da disegni e fotografie.*

*Ogni fase del lavoro di consolidamento, restauro [...], devono essere documentate.*

*Queste registrazioni devono essere depositate in archivi di istituzioni pubbliche e messe a disposizione dei ricercatori.*

*Si raccomanda inoltre la pubblicazione dell'intero rapporto”<sup>2</sup>.*

---

1 Carta di Venezia, articolo 2.

2 Carta di Venezia, articolo 16.

Con il passare degli anni è cresciuta sempre più la necessità di produrre conoscenza e documentazione dei Beni Culturali e di un continuo monitoraggio dei possibili interventi di conservazione, quali restauri e manutenzione del bene.

Con questo spirito, l'ICOMOS ha redatto differenti carte, come la Carta di Firenze e la Carta di Washington, ed un susseguirsi di documenti che approfondiscono le diverse tematiche della Carta di Venezia, tra le quali:

- 1990: *Charter for the Protection and Management of the Archaeological Heritage*

- 2003: *Principles for the preservation and conservation/restoration of wall paintings*

- 2003: *Principles for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*

A metà degli anni '90 ICOMOS e altri comitati quali UNESCO, CIPA e ICCROM, si sono riuniti e hanno rivisto, tramite la stesura della *Dichiarazione di Sofia*, alcuni punti della Carta di Venezia, andando ad approfondire i concetti chiave riguardanti gli interventi di rilievo, descrivendone i possibili scenari, ampliando le tipologie descritte nella Carta del 1964.

Nella Dichiarazione di Sofia, vengono espressi i temi fondamentali per gli *Interventi di rilievo*, andando ad identificare le ragioni per le quali si effettua un rilievo, la figura che ne è responsabile; le modalità di rilievo; ed infine i contenuti del rilievo e la loro futura gestione (Spanò 2016).

Nel 2004, a livello nazionale, viene redatto Codice dei Beni Culturali dal MIBACT<sup>3</sup>, in cui si definiscono l'importanza della tutela e le definizioni specifiche di:

*Beni culturali: “Sono beni culturali le cose immobili e mobili appartenenti allo Stato, alle regioni, agli altri enti pubblici territoriali, nonché ad ogni altro ente pubblico e a persone giuridiche private senza fine di lucro, ivi compresi gli enti ecclesiastici civilmente riconosciuti, che presentano interesse artistico, storico, archeologico o etnoantropologico”<sup>4</sup>;*

*Paesaggio: “Per paesaggio si intende il territorio espressivo di identità, il cui carattere deriva dall'azione di fattori naturali, umani e dalle loro interrelazioni”<sup>5</sup>;*

e dove si definisce nell'articolo 119: *“Diffusione della conoscenza del patrimonio culturale” al comma 1: “Il Ministero può concludere accordi con i Ministeri della pubblica istruzione e dell'università e della ricerca, le regioni e gli altri enti pubblici territoriali interessati, per diffondere la conoscenza del patrimonio culturale e favorirne la fruizione”<sup>6</sup>.*

---

3 Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo

4 Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, D.L. 22 gennaio 2004 n.42, articolo 10, comma 1.

5 Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, articolo 131, comma 1.

6 Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, articolo 119, comma 1.

# 1 Metodi innovativi per il patrimonio culturale: Fotogrammetria Terrestre e UAV, Tecniche LIDAR

## 1.1 Il supporto dei metodi topografici

L'esecuzione di misure su oggetti architettonici, archeologici o comunque riguardanti l'ambito dei beni culturali, è legata dall'imprescindibile errore. Il rilievo metrico consente appunto di controllare l'insieme degli errori, grazie alla misura di punti di controllo sparsi omogeneamente sull'oggetto, e da qui, l'uso implicito della *topografia*.

In passato gli esperti del settore, per eseguire misurazioni su architetture, monumenti od oggetti di interesse impiegavano rilievi tradizionali prettamente *distanziometrici*, nelle ultime decadi vengono impiegati metodi di rilievo metrico architettonico, con integrazione della topografia, fotogrammetria, dagli anni duemila lo sviluppo delle tecniche LIDAR e pochi anni dopo i sistemi SfM (*Structure from Motion*). Questi passaggi sono stati fondamentali al raggiungimento di gradi di precisione e dettaglio fino a pochi anni fa non raggiunti.

Con il metodo topografico è possibile definire sull'oggetto del rilievo reti o poligonali di punti definiti vertici, aventi coordinate note. Da qui ci si appoggia con stazioni celerimetriche utili al rilievo di dettaglio.

La distribuzione dei vertici di appoggio deve avvenire in maniera omogenea, abbracciando l'area complessiva di rilievo, distribuendosi a terra in forme poligonali chiuse, aperte composte da qualche vertice, o a raggi se utilizzati i sistemi satellitari; la distribuzione dei vertici nello spazio è determinata maggiormente dalle caratteristiche morfologiche del sito, dagli ostacoli fisici, e dalla superficie complessiva.

Una volta definiti i punti di appoggio topografico, si effettua un raffittimento di punti su ogni parte dell'oggetto.

Che si tratti di un architettura, di un manufatto d'arte, o di un complesso archeologico, è utile definire i vertici della rete topografica in un'area circostante l'oggetto. La definizione di queste coordinate viene ormai spesso effettuato con l'ausilio dei sistemi GNSS (*Global Navigation Satellite System*).

Da questi vertici vengono in seguito definiti i punti di controllo sull'oggetto con l'ausilio della celerimensura che impiega la tecnologia della stazione totale. Questi punti controllo sono utili alle future *processing* in fotogrammetria e LIDAR (Spanò, 2016).

## I sistemi GNSS

Con GNSS si definisce “*il sistema di posizionamento e navigazione basato sulla ricezione di segnali radio trasmessi da diverse costellazioni di satelliti artificiali*”<sup>7</sup>, ovvero un sistema di localizzazione di qualsiasi punto sulla superficie terrestre, a partire dalla posizione di una serie di satelliti.

Il principio che sta alla base del GNSS è la misurazione del tempo che un determinato segnale elettromagnetico impiega a percorrere lo spazio tra un satellite e un ricevitore terrestre, quindi è possibile definire le coordinate X, Y, Z di un punto sulla terra nel sistema geocentrico, trasformandole al sistema N, E, Q nella proiezione di Gauss.

Ad un'altitudine di 20.000 km orbita una costellazione di 24 satelliti<sup>8</sup>. In ogni satellite e in ogni ricevitore terrestre vi è un orologio ad altissima precisione, sincrono con tutti gli altri orologi<sup>9</sup>. Vengono trasmessi a un ricevitore terrestre, impulsi in forma di onde elettromagnetiche con l'informazione dell'istante di emissione del segnale. Perché si definisca la posizione di un punto sulla terra è necessario che lo strumento ricevitore veda almeno quattro satelliti nella volta celeste. Infatti la definizione di una rete topografica per mezzo di strumenti satellitari non sempre è possibile, per via della difficoltà a volte, di mantenere costante la comunicazione con tutti e quattro i satelliti per esempio posizionando il ricevitore all'interno di un fitto sistema urbano.

Diverse nazioni possiedono la propria costellazione di satelliti, tra le più diffuse vi sono il sistema statunitense GPS (*Global Position System*), il più vecchio e più utilizzato al mondo, il sistema russo *GLONASS* e, i più recenti *Galileo*, europeo lanciato nel 2016 ed infine il sistema cinese Beidou, sistema nato come progetto regionale ed ora in fase di adeguamento a sistema globale definito *Compass*<sup>10</sup>.

---

7 A. Cina, Dal GPS al GNSS (Global Navigation Satellite System) *per la Geomatica*, 2014, pp. 10.

8 Nonostante si conosca l'esatta orbita, che viene calcolata prima del lancio, avvengono delle deviazioni orbitali. Per ovviare a questo vi sono cinque stazioni terrestri permanenti che rilevano costantemente la posizione dei satelliti.

9 Per la sincronizzazione degli orologi viene utilizzato il sistema di coordinamento universale del tempo UTC (*Coordinated Universal Time*).

10 [https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_satellitare\\_globale\\_di\\_navigazione](https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema_satellitare_globale_di_navigazione)

Servendosi dei sistemi GNSS è necessario avere come strumento di rilievo dei vertici: il ricevitore terrestre che si compone di un corpo fisso con antenna montato solitamente su treppiede e di un dispositivo di comando portatile; in altri casi vi è un'antenna di ricezione collegata ad un dispositivo di archivio e pre-elaborazione dati.

Al momento della definizione della rete topografica sul luogo del rilievo, è possibile acquisire i dati in maniera differenziale, misurando la posizione di due vertici contemporaneamente con due ricevitori in modo da massimizzare la precisione calcolando le differenze di posizione.

Vi sono due metodi di acquisizione: in metodo statico, in cui il tempo di acquisizione può arrivare anche ad un ora e più, con il posizionamento del primo ricevitore su di un punto principale, e l'altro su di uno degli altri punti.

Il secondo è il metodo in RTK (*Real Time Kinematic*), ovvero il posizionamento di un ricevitore su un vertice noto in modalità statica e, sintonizzato con un secondo ricevitore detto *rover*, non più su treppiede ma montato su di una palina e trasportato su gli altri punti da rilevare da un operatore. Il vantaggio rispetto al metodo statico, è che il *rover* impiega qualche istante nell'acquisizione dei dati sui punti e quindi la misura dei punti avviene in maniera speditiva, con l'unica differenza che il sistema RTK necessita della visibilità di non meno di cinque satelliti sulla volta celeste rispetto al metodo statico che ne ha bisogno quattro minimi (in entrambi i casi la ricezione del segnale da un numero superiore consente di ottimizzare i risultati).



Sopra: ricevitore a corpo fisso e comando esterno portatile. Fonte: Foto dell'autore  
Sotto: ricevitore ad antenna collegata a dispositivo di archiviazione. Fonte: A.T. Spanò 2016



Sopra: ricevitore GNSS in metodo statico. Fonte: Foto dell'autore  
Sotto: ricevitore GNSS in metodo RTK. Fonte: Foto dell'autore

## Celerimensura e stazione totale

Una volta definita una rete o una poligonale di vertici di appoggio topografico, è necessario passare alla misurazione dei punti di dettaglio sull'oggetto di rilievo. Questo passaggio si definisce metodo *celerimetrico* (Spanò, 2015).

Le misurazioni avvengono appoggiandosi sui vertici della rete topografica, con l'ausilio della *stazione totale*. Questo strumento permette di misurare angoli e distanze, nel dettaglio due angoli, azimutale e zenitale e, una distanza inclinata che va dal punto di stazionamento dello strumento al punto da misurare.

La stazione permette di misurare molti punti distribuiti sull'oggetto e, permette di archiviare le misurazioni all'interno dello strumento, per poi essere elaborate dagli operatori in un secondo momento. Per poter utilizzare la stazione totale, è necessario il posizionamento su di un treppiede; lo strumento si compone di una *basetta* che serve da livella tra il treppiede e la stazione, di modo da mettere correttamente *in stazione lo strumento*<sup>11</sup>, una *base* di collegamento alla basetta che sorregge la stazione e facente parte dello strumento in sé. Facente parte del corpo strumentale vero e proprio vi è l'*alidada* che ruota sull'asse primario dello strumento con una livella torica ed è composta da un cerchio di lettura degli angoli azimutali e zenitali, ed infine, il cannocchiale, utile all'identificazione con precisione di punti lontani, rotante su un asse perpendicolare all'asse principale dello strumento.

Altri strumenti utili alla misura celerimetrica sono il *prisma*, strumento ottico montato su treppiede, palina telescopica o su picchetto tarato, che permette di misurare punti a terra punti difficilmente visibili dalla stazione.

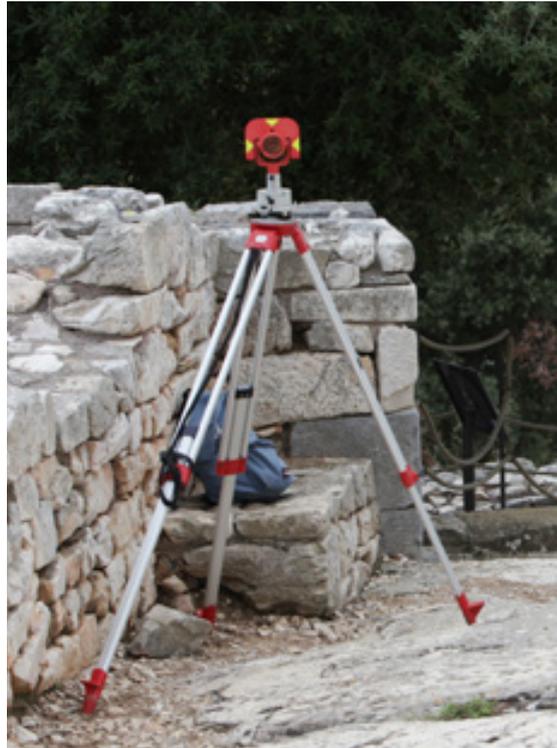
---

<sup>11</sup> La messa in stazione equivale alla messa in bolla degli strumenti, che siano stazione totale, laser scanner o corpo GNSS. Vi sono due vincoli: verticalità dell'asse primario e passaggio del medesimo per il punto a terra.

Le stazioni totali moderne si basano su due modalità di misurazione della distanza, in *infra-red*, ovvero un impulso elettromagnetico direzionato verso il prisma, che riflette alla stazione il medesimo raggio e, in *reflector-less* ovvero un impulso direzionato verso un qualsiasi punto dell'oggetto e riflesso alla stazione dalla componente materica.

Il principio che sta alla base delle misurazioni con stazione totale è il calcolo del tempo che l'impulso elettromagnetico impiega dal momento in cui viene emesso dallo strumento a quando ne fa ritorno dopo essere riflesso, insieme al calcolo di differenza di fase degli impulsi.

La collimazione avviene misurando direttamente punti facilmente riconoscibili, come spigoli o punti particolari dell'oggetto, oppure apponendo sulle superfici da misurare marker cartacei, plastici o lignei, raffiguranti forme a scacchiera o a mirino, permettendo così una facile identificazione dei punti, dal momento che dovranno essere collimati durante il processo fotogrammetrico o LIDAR.



A sinistra: collimazione di punti di dettaglio con stazione totale . Fonte: Foto dell'autore

A destra: prisma ottico. Fonte: Foto dell'autore

Sotto: mini prisma a picchetto. Fonte: [http://www.allcomp.com.br/index.php?route=product/product&product\\_id=1057](http://www.allcomp.com.br/index.php?route=product/product&product_id=1057))

## 1.2 Fotogrammetria: fondamenti geometrici, della fase analitica e digitale.

Nell'ambito della Geomatica la fotogrammetria è diventata ormai una tecnica fondamentale e consolidata nei processi del rilievo indiretto, in continua evoluzione e sviluppo.

Viene utilizzata in situazioni di normale studio degli oggetti, ma soprattutto per l'analisi del territorio e per la stretta correlazione con la topografia, sia con l'impiego di strumentazione altamente specializzata che con strumenti accessibili a tutti. Questo grazie al progresso tecnologico che ha portato nel tempo a sviluppare metodi che rendessero più rapido l'intero processo, sostituendo i vecchi strumenti ottici con processori informatici più efficienti e ed economici.

Per definizione *“la fotogrammetria è l'arte e la scienza per determinare la posizione e la forma degli oggetti a partire da fotografie. I risultati delle misure fotogrammetriche possono essere:*

- *Numeri, cioè coordinate di punti oggetto in un sistema di coordinate tridimensionale;*
- *Disegni, cioè carte topografiche rappresentanti particolari planimetrici e curve di livello, oppure altre rappresentazioni grafiche di oggetti;*
- *Immagini, di solito fotografie rettificate (ortofotopiani) e mappe da esse derivate (ortofotocarte), ma anche immagini digitali”<sup>12</sup>.*

Il metodo della fotogrammetria essendo utilizzato per una maggiore conoscenza degli oggetti, è fortemente legato alle pratiche topografiche della Geomatica e della cartografia.

Permette inoltre di ricostruire la geometria dell'oggetto di studio senza contatto diretto con esso, come invece accadeva per il rilievo classico. Per questo il metodo fotogrammetrico sta all'interno della tipologia di acquisizione del *telerilevamento* (Kraus, 1994).

---

<sup>12</sup> K. Kraus, *Fotogrammetria*, Vol. 1, Teoria e Applicazioni, 1994, cit. pp. 3.

L'impiego della fotogrammetria come strumento di rilievo è dovuto in parte alla continua evoluzione della scienza stessa, ai progressi tecnologici di strumenti di acquisizione ed elaborazione, dalla possibilità di poter essere applicata su ogni oggetto, qualsiasi sia la sua dimensione (Spanò, 2016), che sia un manufatto archeologico, un edificio o un ambito territoriale di vastissime dimensioni.

In fotogrammetria vengono utilizzate appunto fotografie e, se prodotte da sensori appositamente progettati a tale scopo vengono detti *fotogrammi*, inoltre possono essere utilizzate immagini di natura analogica o digitale, ricavate da scansione o da sensori che registrano onde elettromagnetiche non appartenenti allo spettro del visibile e, comprendenti l'intera banda di colori, o ancora, bande multi spettrali non visibili ad occhio nudo, come immagini IR (*Infrared*), NIR (*Near InfraRed*) e RE (*Red Edge*).

I primi tentativi di ottenere coordinate di punti partendo da fotografie risale alla seconda metà dell'ottocento con i primi scritti "*Iconometria*" e "*Metrofotografia*", di A. Laussedat, colonnello francese, che nel 1859 presentò all'accademia delle Scienze di Parigi, mettendo in risalto appunto la possibilità di estrarre informazioni topografiche, partendo dalle geometrie proiettive di una coppia di fotografie.

Negli stessi anni, un architetto tedesco, A. Meydenbauer, eseguì per la prima volta un rilievo fotogrammetrico applicandolo su edifici ed architetture, semplificando il processo di identificazione dei punti omologhi tra fotografie.

La vera svolta nel progresso dello sviluppo fotogrammetrico avvenne agli inizi del '900 con l'invenzione da parte di C. Pulfrich della *stereofotogrammetria*, che indusse E. Von Orel alla costruzione del primo *stereo-autografo* nel 1909, strumento fondamentale nel riconoscimento continuo e autonomo di punti omologhi, compito altrimenti eseguibile solo manualmente. Grazie allo *stereo-autografo* fu possibile per la prima volta estrarre curve di livello e linee planimetriche, in maniera continua (Gomasca, 2004).

Con l'avvento del primo conflitto mondiale crebbe la necessità di ottenere dati e informazioni dall'alto, introducendo per la prima volta, il concetto di aerofotogrammetria.

Nel 1923 viene sviluppato da W. Bauersfeld il nuovo strumento stereo-

planigrafo, appoggiandosi sui concetti dello stero-autografo utilizzando però immagini aeree.

Questo fu l'inizio di un periodo di continue migliorie e innovazioni nei concetti e nelle strumentazioni di supporto alla tecnica della fotogrammetria, alla produzione di fotocamere e all'affermazione della fotogrammetria come strumento sufficientemente accurato al rilievo.

Dopo la fine della seconda guerra mondiale e con l'invenzione dei primi calcolatori, si passò dall'utilizzo di componenti ottico meccanici in analogico, a calcolatori elettronici in sistema analitico con i quali venne sviluppata la *triangolazione aerea*, tecnica che permise di ottenere risultati in tempi ristretti e in economia di processo, grazie alla produzione di strisciate aeree, in cui la collinearità veniva raggiunta in maniera analitica sui blocchi di immagini con punti di controllo a terra (Kraus, 1994). Ciò portò R.K Bean alla produzione in serie di *ortofoto* da immagini aeree.

Dagli anni '80 si passò ulteriormente dall'utilizzo di immagini fotografiche a immagini digitali, costituite da una serie di informazioni radiometriche sotto forma di numeri dette anche *raster*, ovvero porzioni di spazio rappresentate in forma di matrice numerica con le singole celle che prendono il nome di *pixel* e rappresentano la parte più elementare dell'immagine (Chirici, 2005), con posizione fissa, non variabile nel tempo e che a differenza dei fotogrammi su pellicola non risente delle deformazioni ambientali (Spanò, 2016).

La conseguente fase di *processing* avviene in maniera automatizzata o semi-automatizzata, tramite strumenti specifici per l'elaborazione di immagini *computer vision* e *computer graphics* (Kraus, 1994).

Su queste basi, al giorno d'oggi è possibile ottenere, partendo da immagini, modelli tridimensionali da sistemi *Structure from Motion*, seguendo i principi della *geometria epipolare*, in cui vengono definite le posizioni dei singoli punti costituenti la geometria dell'oggetto. Da qui si ottengono numerose informazioni, sia spaziali che grafiche, come la componente morfologica e cromatica dell'oggetto rilevato.

## Principi geometrici

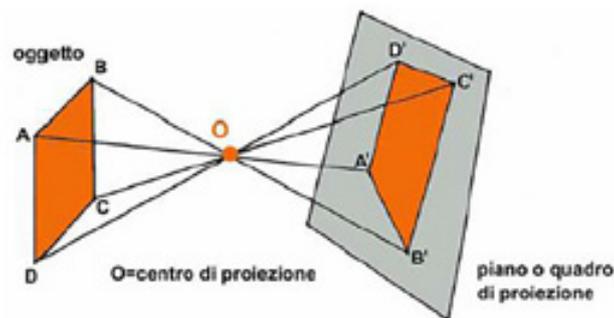
La fotogrammetria si basa sui concetti base della prospettiva centrale dei fotogrammi, secondo cui ogni punto dell'oggetto è proiettato su un piano di proiezione da un punto non appartenente all'oggetto, ovvero il corpo rigido della camera o centro di presa, attraverso una corrispondenza biunivoca.

Ogni punto è quindi proiettato tramite raggi proiettivi. Questi, definiscono una *stella proiettiva* di raggi, che costruisce un modello ottico preciso della geometria dell'oggetto (Bertocci, Bini, 2012).

Utilizzando una sola immagine è possibile proiettare ogni punto oggetto solo nel caso in cui l'oggetto fosse piano, questo per via dell'influenza delle profondità nell'asse Z di oggetti tridimensionali, in cui è possibile avere infiniti punti oggetto sulla quota nella stessa immagine.

Per poter ottenere una proiezione di oggetti tridimensionali su piano bidimensionale, è necessario utilizzare almeno due immagini stereoscopiche<sup>13</sup>.

Grazie all'intersezione di raggi omologhi di medesimi punti oggetto da due differenti immagini è quindi possibile la generazione del modello che si definisce "*luogo dei punti d'intersezione dei raggi omologhi proiettanti*"<sup>14</sup>.



Principio geometrico proiettivo della fotogrammetria. Fonte: A.T. Spanò 2016

<sup>13</sup> Immagini che riprendono lo stesso oggetto da posizioni di presa differente e che, come per la vista umana, definiscono oltre a larghezza e lunghezza, anche la profondità di immagine, cogliendone le caratteristiche tridimensionali.

<sup>14</sup> A.T. Spanò, Dispense Workshop, "Fotogrammetria digitale e scansioni 3D per il rilievo di beni culturali", a.a. 2015/2016, pp. 7.

## Principi analitici

La costruzione del modello ottico e la definizione delle informazioni spaziali sono possibili se si conoscono specifici parametri di orientamento interno ed orientamento esterno, che insieme, permettono di definire le equazioni di *collinearità*, ovvero le relazioni tra il punto di centro di presa, il punto oggetto e il punto immagine.

L'orientamento interno tiene conto delle caratteristiche interne della camera: la distanza focale, la distorsione radiale dell'obiettivo e la posizione del punto principale. (Bertocci, Bini, 2012). Ogni casa produttrice rilascia determinate specifiche di orientamento interno e di *calibrazione*, andando a ridurre il più possibile lo scostamento, seppur lieve, del centro di presa sul piano di proiezione (Kraus, 1994).

Espresso in variabili d'equazione abbiamo due coordinate della proiezione del centro di presa sul piano immagine:  $\xi_0$  e  $\eta_0$ ; e una distanza  $c$  tra il centro di presa e la sua proiezione sul piano immagine.

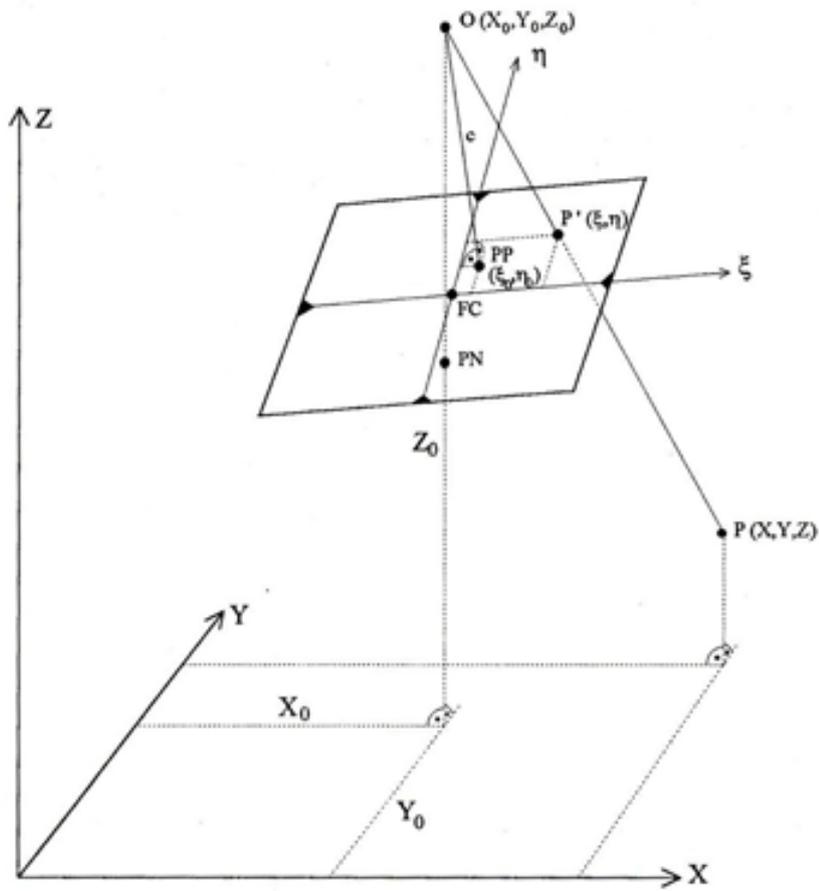
Questi parametri *“definiscono la posizione del centro di proiezione relativamente al piano dell'immagine”*<sup>15</sup>

L'orientamento esterno invece rappresenta i parametri spaziali della camera in un sistema di coordinate prestabilito. In sostanza la posizione nello spazio del corpo macchina.

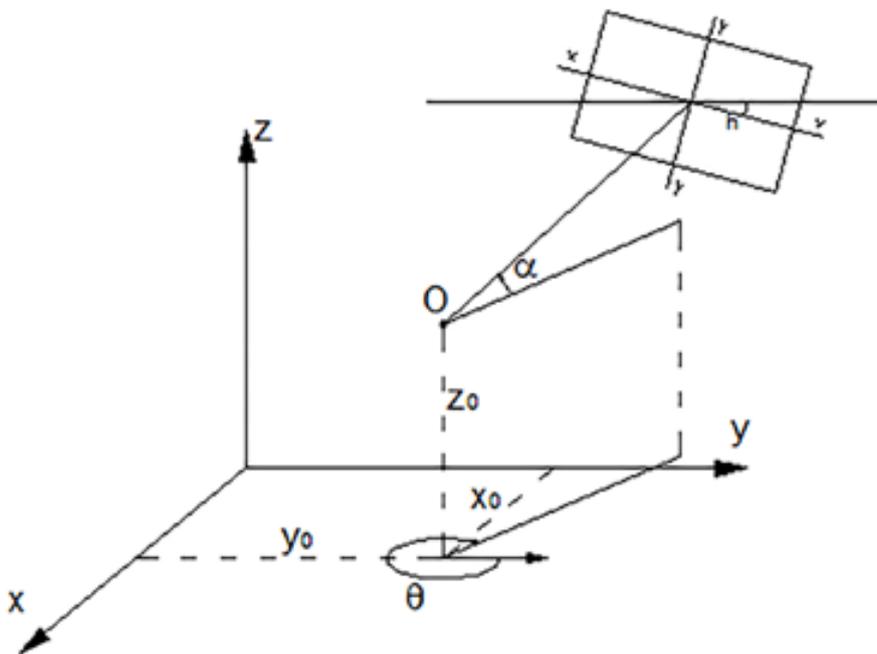
In termini di equazione si definiscono tre traslazioni nello spazio con coordinate  $X_0, Y_0, Z_0$  e tre rotazioni del fotogramma espresse in angoli di rotazione,  $\vartheta$  azimut topografico,  $\alpha$  angolo di elevazione e  $h$  angolo di sbandamento.

---

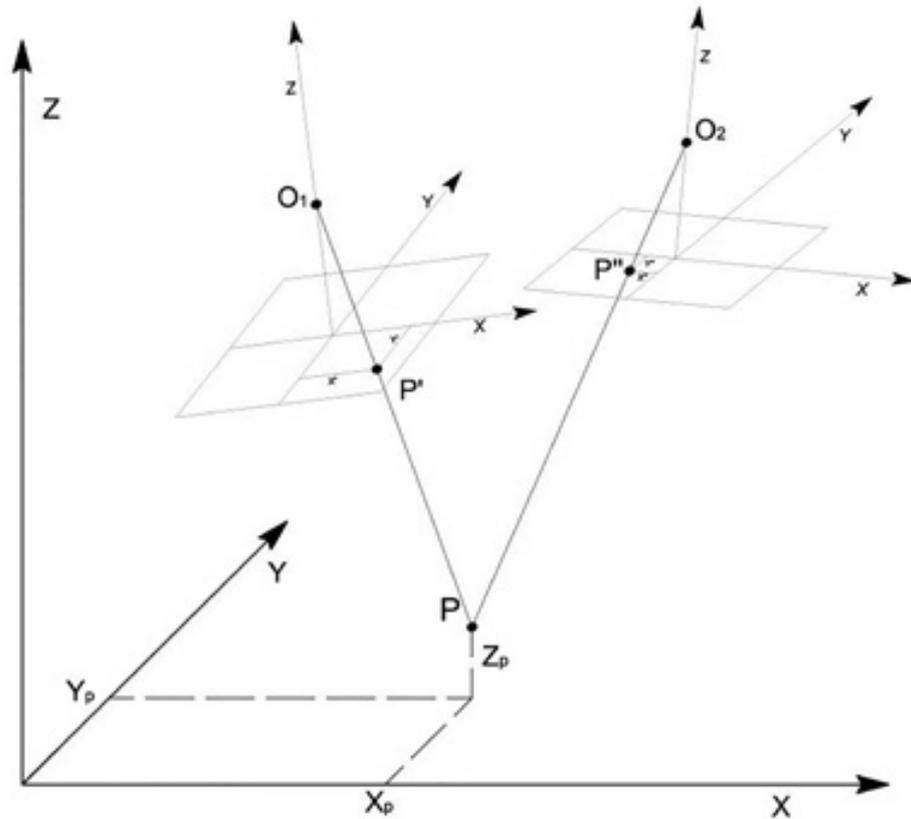
15 K. Kraus, 1994, cit. pp. 22.



Relazione tra punti immagine e punti oggetto. Fonte: K. Kraus 1994



Parametri di orientamento esterno della camera con centro di presa in O. Fonte: K. Kraus 1994



Coppia stereoscopica, intersezione di raggi omologhi e ricostruzione semplificata della geometria del punto P. Fonte: K. Kraus 1994

$$\frac{X_p - X_1^0}{Z_p - Z_1^0} = \frac{a_{11}x' + a_{12}y' + a_{13}z'}{a_{31}x' + a_{32}y' + a_{33}z'} \quad \frac{Y_p - Y_1^0}{Z_p - Z_1^0} = \frac{a_{21}x' + a_{22}y' + a_{23}z'}{a_{31}x' + a_{32}y' + a_{33}z'}$$

$$\frac{X_p - X_2^0}{Z_p - Z_2^0} = \frac{b_{11}x'' + b_{12}y'' + b_{13}z''}{b_{31}x'' + b_{32}y'' + b_{33}z''} \quad \frac{Y_p - Y_2^0}{Z_p - Z_2^0} = \frac{b_{21}x'' + b_{22}y'' + b_{23}z''}{b_{31}x'' + b_{32}y'' + b_{33}z''}$$

Formule di collinearità tra punto a terra P e le rispettive proiezioni P<sup>I</sup> e P<sup>II</sup> sui fotogrammi di sinistra e destra. Fonte: K. Kraus 1994

## Workflow

Durante un rilievo fotogrammetrico, si eseguono tre passaggi fondamentali alla buona esecuzione dell'intero processo: fase di presa, orientamento e restituzione.

La fase di presa consiste appunto nell'acquisire le immagini dell'oggetto da rilevare, che sia da terra o dall'alto.

Successivamente, con la fase di orientamento si determinano tutti i parametri utili alla definizione delle relazioni analitiche tra punti immagine e punti oggetto.

L'ultima fase, ovvero quella della restituzione, è costituita da diversi passaggi, quali le misurazioni sul modello stereoscopico appena eseguito dopo l'orientamento delle immagini, la definizione delle coordinate 3D dei punti oggetto, il controllo e l'eventuale integrazione di ulteriori dati di rilievo definita *editing* ed infine la corposa parte di restituzione grafica degli elaborati (Spanò, 2016).

Una fase non facente parte delle tre appena citate, ma comunque indispensabile è l'*appoggio topografico*, in cui vengono misurate le coordinate planoaltimetriche di differenti punti sull'oggetto, che in un successivo momento saranno collimati sulle diverse immagini.

Con il passaggio da fotogrammetria analitica a fotogrammetria digitale alla fine degli anni '70 è cresciuta sempre di più l'esigenza di estrarre punti omologhi da coppie di immagini in maniera automatica o semi-automatica. Questo processo avviene tramite algoritmi di correlazione di immagini e se ne distinguono tre differenti: ABM (*Area Based Matching*), FBM (*Feature Based Matching*) e RM (*Relational Matching*).

L'*Area Based Matching* si basa sul confronto di differenti livelli di grigio in piccole aree corrispondenti tra le immagini. Il *Feature Based Matching* si basa sulla ricerca di punti, linee o aree, tra immagini omologhe. Infine il *Relational Matching* che si basa sull'utilizzo di differenti entità (topologiche, radiometriche e spaziali) per definirne le corrispettive in altre immagini (Chiabrando et al, 2013).

Dall'estrazione di punti omologhi dalle differenti immagini, si passa infine, con l'ausilio di opportuni algoritmi, alla generazione della nuvola di punti tridimensionale a definire le caratteristiche spaziali dell'oggetto di rilievo.

### 1.3 Fotogrammetria UAV

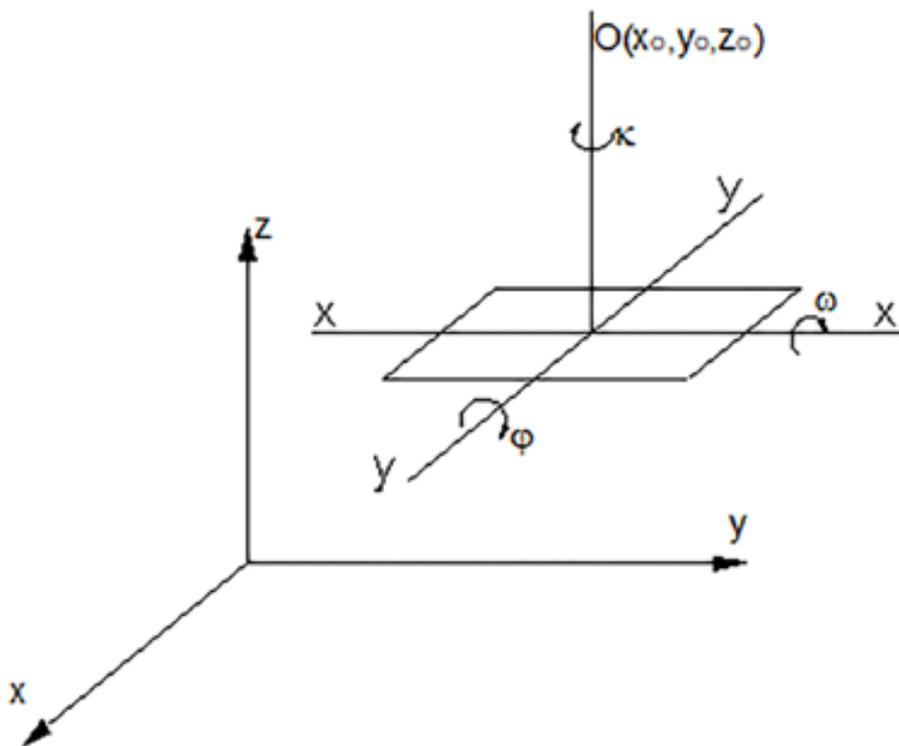
Tradizionalmente la cartografia è stata prodotta tramite la fotogrammetria aerea, per mezzo di complesse camere fotogrammetriche montate su carlinghe di aerei che sorvolano il territorio, a quote di svariate migliaia di metri (o centinaia in caso di aree urbane). Nelle ultime decenni il telerilevamento da satellite ha integrato la fotogrammetria aerea per l'aggiornamento cartografico, aumentando il range di quota di acquisizione.

Le riprese da basse quote, invece, per mappare oggetti e aree a grandissima scala, riprese fino a non molto tempo fa tramite mongolfiere e aquiloni, sono oggi rilevate tramite fotogrammetria da dispositivi aerei UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), ovvero droni, pilotati sia in remoto che in manuale, facilmente reperibili sul mercato ad un prezzo sempre più accessibile.

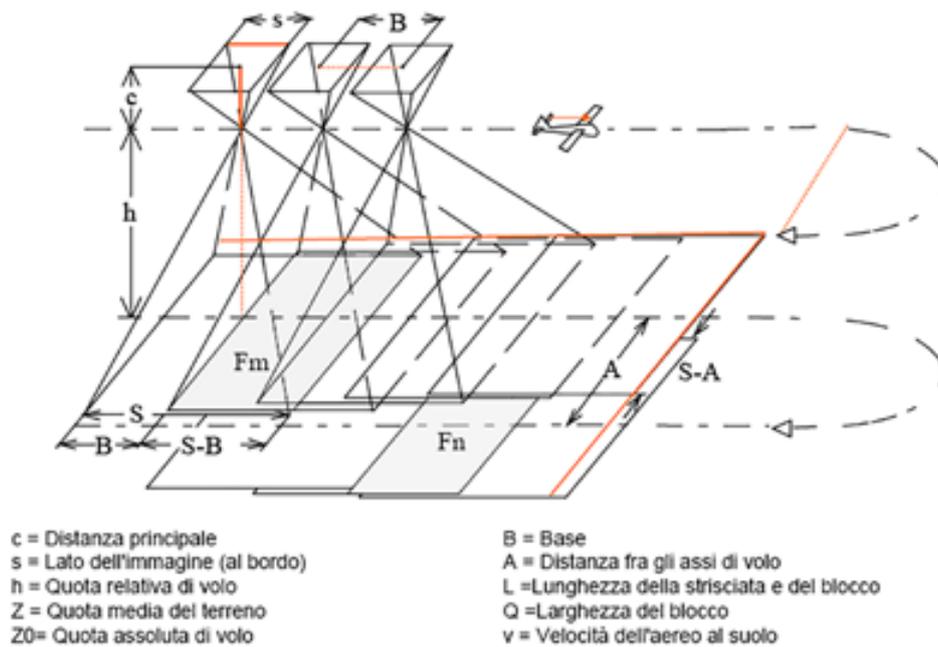
Questo tipo di strumentazione viene sempre più utilizzata per una vasta moltitudine di impieghi, dal rilievo territoriale nell'ambito agroforestale all'analisi in campo architettonico-urbano, specialmente in luoghi di precarietà o completamente inaccessibili altrimenti, al controllo post disastro, per monitorare lo stato di fatto di manufatti architettonici in caso di scarsa sicurezza per gli individui.

L'impiego dei droni inoltre, per fini conoscitivi nel campo della Geomatica è sempre più in crescita, grazie alla diffusione dei sistemi di automazione del processo fotogrammetrico (SfM) e, dalla possibilità da parte degli esperti di fotogrammetria di pilotare loro stessi i dispositivi, ovviamente dopo aver acquisito le opportune cognizioni di volo, senza possedere obbligatoriamente le medesime capacità di un pilota di velivolo tradizionale.

L'utilizzo dei droni nel processo di rilievo ha portato ad una importante semplificazione nelle procedure per quel che riguarda logistica, tempi del lavoro sul campo.



Parametri di orientamento interno di una camera montata su di un velivolo.  
Fonte: K. Kraus 1994



Geometria del piano di volo. Fonte: K. Kraus 1994

## Principi analitici

Come per la fotogrammetria terrestre, in fotogrammetria aerea sono determinanti, al fine dell'equazione di collinearità, i parametri di orientamento interno ed esterno delle camere di presa.

In questo caso si hanno le medesime caratteristiche di orientamento interno della camera e, differiscono solamente i parametri di orientamento esterno, ovvero delle sei variabili si ritrovano le coordinate  $X_0, Y_0, Z_0$  del centro di presa e, i tre angoli di rotazione  $\omega$  rollio,  $\varphi$  beccheggio, e  $k$  deriva.

La fotogrammetria aerea, come quella terrestre, si basa sul ricoprimento o overlapping, ovvero sulla presa di porzioni di oggetto/superficie da due punti di presa successivi e che quindi, la parte di oggetto fotografata appaia su almeno due fotogrammi differenti. Per ottenere un adeguato ricoprimento è necessario impostare un piano di volo delle traiettorie a linee parallele dette strisciate.

Per ottenere uno schema più rigido ed aumentare quindi le precisioni, si effettuano più voli con traiettorie a strisciate perpendicolari tra loro. Dal momento che nelle applicazioni di fotogrammetria UAV si mira a rilevare anche gli alzati, che a questa scala hanno dimensioni comparabili con quelle planimetriche delle coperture (Chiabrando et al, 2017), è opportuno effettuare ulteriori voli circolari, con la fotocamera inclinata di  $45^\circ$  verso l'oggetto invece che puntata in maniera nadirale<sup>16</sup>. Al fine di garantire un'accurata precisione, una copertura stereoscopica maggiore possibile (intorno al 70-80%) e, un'ottima qualità fotografica delle prese, è importante definire a priori un'adeguata quota e velocità di volo, una corretta base di presa e quindi il numero di fotogrammi da catturare.

---

<sup>16</sup> Citato in maniera più approfondita al capitolo 3.1.3

Fondamentale per le successive elaborazioni dei modelli fotogrammetrici è la definizione a priori dell'appoggio topografico a terra su un sistema di coordinate assolute<sup>17</sup>, che in un secondo momento permetterà la rototraslazione dei modelli stereoscopici ottenuti, ovvero la messa in scala e l'assegnazione ad ogni punto immagine delle rispettive coordinate Nord, Est, Quota.

Per eseguire la rototraslazione, ci si avvale della *triangolazione aerea*, processo che riduce molto le acquisizioni topografiche a terra e semplifica la fase di orientamento, appoggiandosi ad un sistema di coordinate assolute di punti planoaltimetrici presenti nel primo e nell'ultimo modello stereoscopico di ogni strisciata e, punti altimetrici nelle aree di ricoprimento interno delle strisciate.

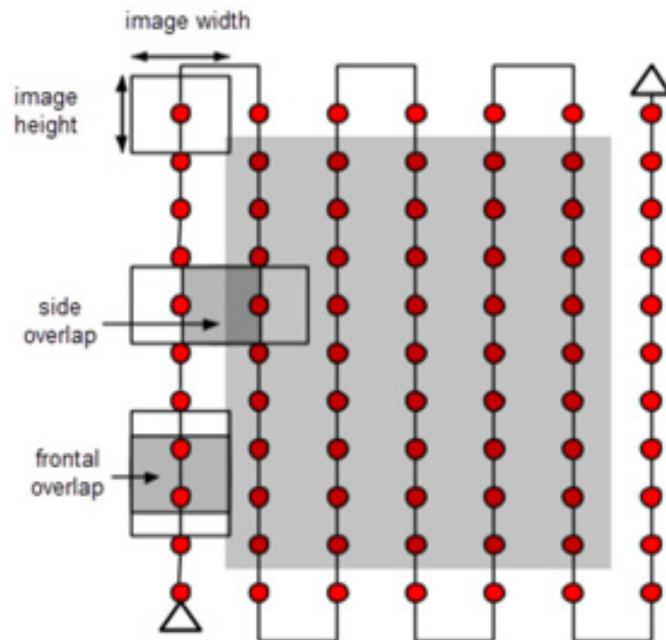
La triangolazione aerea si può eseguire basandosi per *modelli indipendenti*, dove ogni modello stereoscopico viene rototraslato in un sistema di coordinate relative in un primo momento e, in seguito, vengono scalati e orientati in un sistema di coordinate assolute tutti i modelli, di modo che un punto in comune tra due modelli stereoscopici abbia le stesse coordinate assolute e, un punto di appoggio generico in un modello stereoscopico abbia le coordinate assolute N,E,Q.

La triangolazione aerea a *stelle proiettive* invece si basa non sul blocco stereoscopico, ma sul fascio di raggi (*stella proiettiva*) proiettante i punti immagine sui fotogrammi.

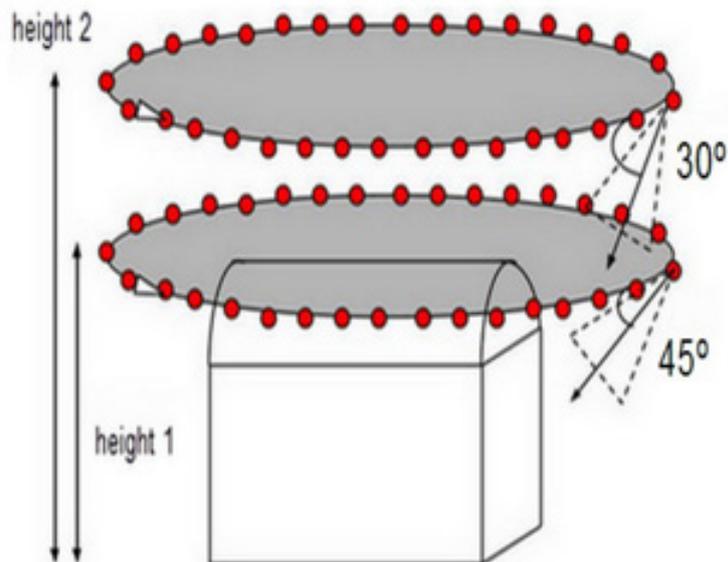
Ogni punto di coordinate d'appoggio topografico a terra sarà presente in diversi fotogrammi, e di questi sarà possibile ottenere le relative equazioni di collinearità, ottenendo infine un'enorme sistema di equazioni (Spanò, 2016)

---

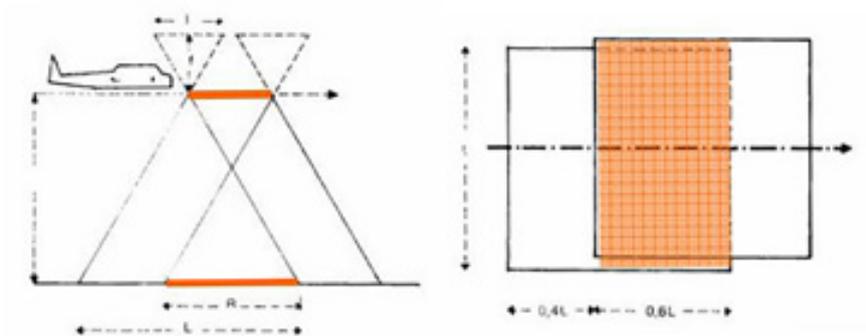
<sup>17</sup> Le coordinate relative si riferiscono alle coordinate in sistema di riferimento deciso dall'operatore; le coordinate assolute invece si riferiscono ad un sistema di riferimento geografico noto acquisite con GPS.



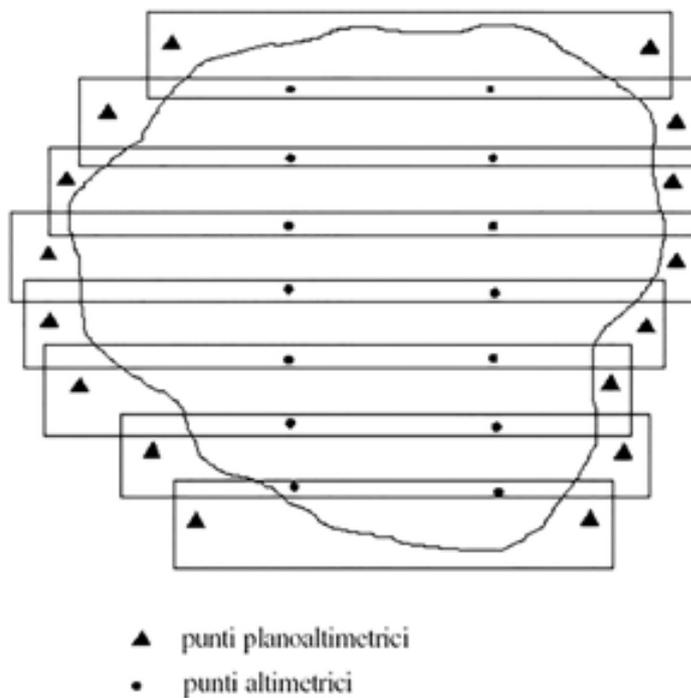
Traiettorie di volo parallele per superfici planari. Fonte: Manuale d'uso Pix4D mapper 2016



Traiettorie di volo circolari per oggetti in alzato. Fonte: Manuale d'uso Pix4D mapper 2016



Per *base di presa* si intende lo spazio che intercorre tra un centro di presa il successivo.  
 Fonte: K. Kraus 1994.



Schema dei punti per triangolazione aerea. Fonte: A.T. Spanò 2016

## 1.4 Tecnica LIDAR

La tecnica di laser scanning permette l'acquisizione di un gran numero di dati relativi all'oggetto di rilievo, in maniera rapida ed estremamente precisa, viene anche definita tecnica LIDAR (*Light Detection and Ranging*). Il suo impiego spazia da scenari di tipo territoriale ed urbano, manufatti di tipo architettonico e persino oggetti tanto piccoli da dover essere ingranditi di scala dopo le dovute elaborazioni.

La tecnica LIDAR deriva dalla tecnologia che sviluppò la possibilità di misurare distanze tramite emissione di impulsi elettromagnetici (distanziometri), che portarono ad un cambiamento storico nel rilievo e nel campo delle misurazioni. È solo dagli ultimi due decenni che si hanno i più significativi sviluppi di questa tecnologia e, di conseguenza la diffusione della tecnica in diversi ambiti disciplinari (Rinaudo, 2007). Questo importante passaggio storico ha portato alla ridefinizione dell'intero concetto di rilievo e alle procedure operative, in quanto un tempo venivano interpretate le consistenze da rilevare e dunque si procedeva alla misurazione, ora, grazie alle caratteristiche di questa tecnologia si parte con una fase di misura in tempi molto stretti e di enormi quantità di dati, che in un secondo momento saranno selezionati ed interpretati (Spanò 2016).

Con l'ausilio della tecnica LIDAR è possibile ottenere nuvole di punti 3D della superficie dell'oggetto di rilievo, dove ogni punto contiene specifiche coordinate cartesiane e, informazioni cromatiche di riflettanza in 2D (Vassena, Sgrenzaroli 2007).

Vi sono due tipologie di laser scanner, *distanziometrici* e *triangolatori*. I primi utilizzano gli stessi principi delle stazioni totali, con la misurazione di due angoli ed una distanza, ottenendo coordinate polari, che poi dovranno essere convertite in coordinate cartesiane. Le informazioni vengono ottenute proiettando un raggio di luce laser in monofrequenza<sup>18</sup> e unidirezionalità, verso un oggetto. Questo raggio viene in parte riflesso dal corpo colpito.

---

<sup>18</sup> A differenza di un raggio luminoso naturale che si compone di più frequenze appartenenti allo spettro del visibile.



Laser scanner terrestre FARO Focus 3D 120 S.  
Fonte: Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali, Politecnico di Torino 2015.

Questi strumenti si basano sui principio del calcolo del *tempo di volo*, ovvero il tempo che il raggio impiega ad essere emesso e riflesso, ottenendo così le distanze strumento-oggetto e, sul principio della *comparazione di fase*, ovvero confrontando la modularità d'onda del raggio emesso con quello riflesso (Rinaudo, 2007). Inoltre all'interno dello strumento vi è una fotocamera, che permette di associare un valore RGB ad ogni punto rilevato.

Gli scanner triangolatori invece, utilizzano gli stessi principi della fotogrammetria definendo la posizione di un punto nello spazio partendo dall'intersezione di due rette di direzione nota.

Queste rette sono definite dal raggio emesso e dal raggio riflesso dall'oggetto a generare due angoli con la base del sensore, che consiste nella distanza tra l'emettitore e la camera.

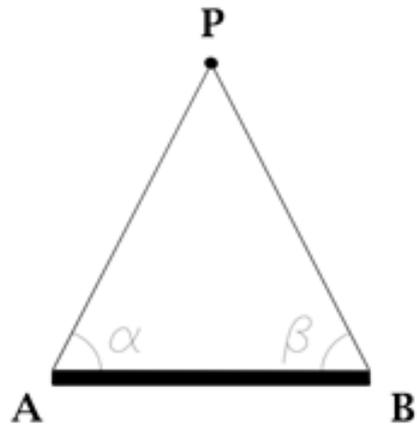
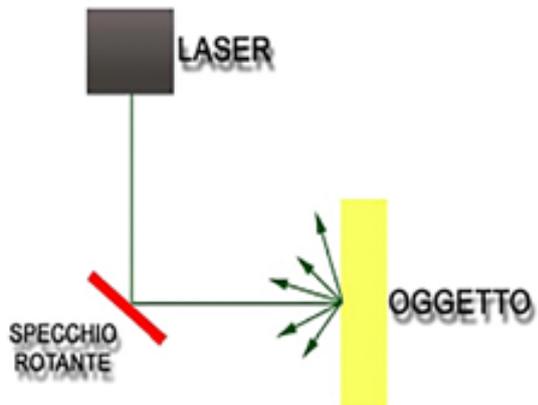
Vi è un'ulteriore distinzione importante tra i laser scanner triangolatori, ovvero in base al numero di camere montate sullo strumento.

Gli scanner a *camera singola* montano un emettitore laser che direziona il raggio su di uno specchio rotante ad angolo variabile, montato su di una base, che a sua volta lo proietta verso l'oggetto da rilevare, sull'altra estremità della base vi è montata una camera che riprende l'oggetto.

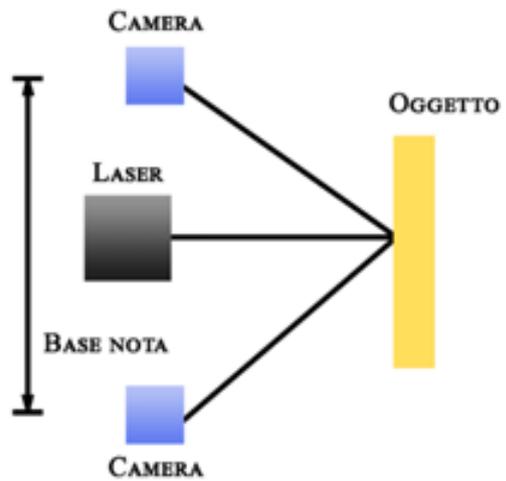
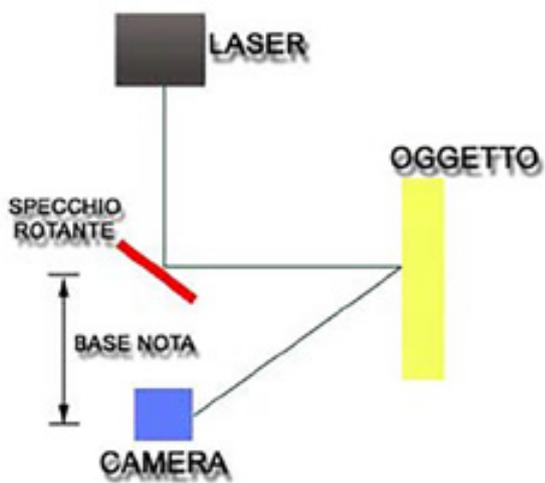
Gli scanner a *camera doppia*, utilizzati molto nel rilievo di dettaglio sub-millimetrico di oggetti piccoli, non montano lo specchio rotante degli scanner a camera singola, ma al suo posto vi è montata una seconda camera con interposto tra le due l'emettitore laser. Questa tipologia di scanner proietta il laser direttamente sull'oggetto il raggio che riflettendosi viene catturato dai sensori nelle due camere.

Nonostante l'automazione spinta degli strumenti LIDAR e della facilità nell'acquisire enormi quantità di dati, bisogna tener conto di diversi fattori onde evitare di commettere errori che possono portare a dover ripetere le operazioni sul campo, aumentandone tempi e costi.

Innanzitutto bisogna tenere conto delle caratteristiche del sito di rilievo, come condizioni meteorologiche e climatiche, caratteristiche di luminosità e del materiale delle superfici, la possibilità di maneggevolezza nelle operazioni; dello strumento, la sua portata, valutando un'opportuna velocità di scansione, risoluzione in base al grado di precisione da ottenere e i successivi passaggi dell'elaborazione, come ad esempio il



A sinistra: Principio del calcolo del tempo di volo. Fonte: A.T. Spanò 2016.  
 A destra: Principio geometrico degli scanner triangolatori. Fonte: Rinaudo 2007.



A sinistra: Principio scanner a camera singola. Fonte: A.T. Spanò 2016.  
 A destra: Principio scanner a camera doppia. Fonte: A.T. Spanò 2016.

riconoscimento automatico di target<sup>19</sup>.

Data la necessità di rilevare informazione cromatiche e di riflettenza degli oggetti, bisogna tenere inoltre conto della rugosità delle superfici riflettenti. Infatti i raggi possono essere riflessi in differenti maniere influenzando sul calcolo di ritorno dell'impulso.

Vi possono essere superfici *riflettenti*, *lambertiane* e *retro-riflettenti*.

Le prime si comportano come superfici che riflettono il raggio laser in maniera definita e lineare, come ad esempio superfici lisce e lucide; le superfici lambertiane invece riflettono gli impulsi in maniera omogenea, ad esempio oggetti bianchi e di consistenza porosa. Le superfici retro-riflettenti infine si comportano diversamente dalle due precedenti, riflettendo il raggio perfettamente nella stessa direzione di incidenza (Spanò, 2016).

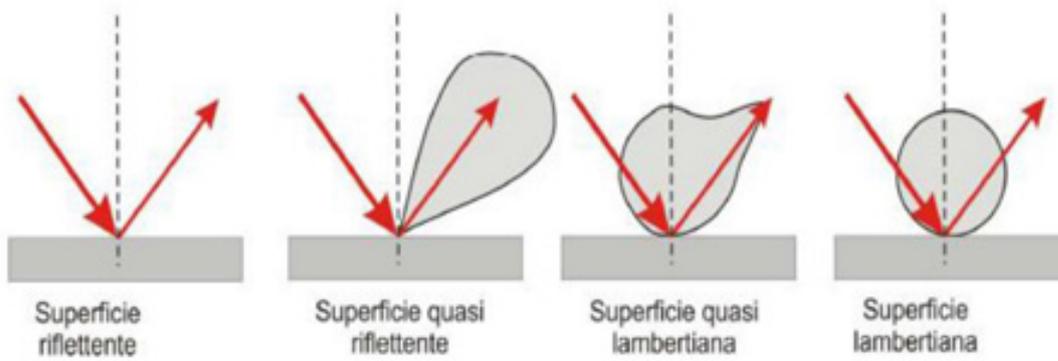
Il grado di precisione delle scansioni influisce innanzitutto dalla distanza di acquisizione e dall'angolo di incidenza dei raggi. Inoltre bisogna considerare le componenti dell'errore insite nel sistema come errori di incidenza del raggio, del calcolo del tempo di volo, di calibrazione e meccanici degli specchi.

Per quanto riguarda le acquisizioni, una sola scansione non permette di ottenere la totalità delle informazioni necessarie al rilievo. Per questo e per diminuire l'errore è necessario quindi programmare una serie continua di scansioni di modo da garantire un overlapping del 30% e, l'identificazione in più nuvole di medesimi punti di legame.

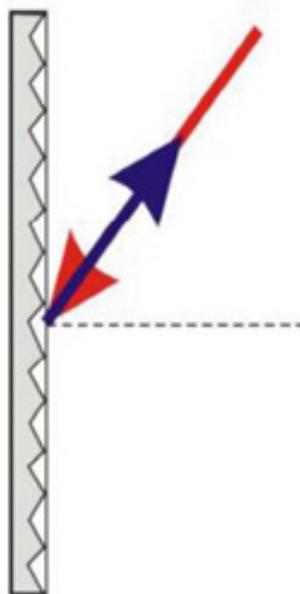
Anche per la tecnica LIDAR è fondamentale l'appoggio topografico e la definizione di punti di controllo sull'oggetto, segnalati su parti facilmente identificabili dell'oggetto o tramite l'impiego di marker piani a scacchiera o, marker solidi che servono ad unire in un'unica nuvola tutte le scansioni.

---

<sup>19</sup> Come fa riferimento nei capitoli successivi.



Superfici riflettenti e lambertiane. Fonte: A.T. Spanò 2016.



Superficie retro-riflettenete. Fonte: A.T. Spanò 2016.

## **1.5 Applicazioni ed utilizzi delle tecniche fotogrammetriche e LIDAR**

I metodi di fotogrammetria e LIDAR sopra citati, negli ultimi anni hanno avuto un enorme sviluppo e diffusione nell'impiego in moltissimi campi applicativi. La fotogrammetria, che ha un utilizzo ormai consolidato nella cartografia, oggi ha enorme ruolo nel campo architettonico e nello scenario dei beni culturali, in campo archeologico, geologico, ingegneristico e cinematografico.

Viene fatto largo uso della tecnica LIDAR in campi quali la balistica, la criminologia e l'analisi degli incidenti stradali, la medicina ed odontoiatria, l'architettura, l'ingegneria, la geologia e la speleologia.

Nel campo del rilievo per la documentazione dei beni culturali l'impiego dei metodi fotogrammetrici e LIDAR spazia dall'analisi di interi siti di importanza storica e identitaria di un caratteristico luogo, dove si necessita di metterne in luce le caratteristiche morfologiche e la complessità del sedime costruito con l'impiego dei mezzi aerei sopra citati. Luoghi di culto, definiti come singoli spazi o interi complessi religiosi dove in questo caso si cerca di approfondire le consistenze artistiche e materiche, come affreschi, bassorilievi, decori, impianti architettonici. Manufatti di interesse archeologico e museale, come reperti e statue a differenti stati di conservazione, andando a comprenderne le particolarità e le vulnerabilità. Spesso, in un processo di rilievo architettonico, la tecnica fotogrammetrica viene affiancata a quella laser scanner, per la necessità continua di integrare informazioni che altrimenti con una sola tecnica non riuscirebbe ad ottenere.

Ad esempio l'impiego di un laser scanner, in ambienti confinati e molto bui permette una rapida e completa acquisizione dei dati necessari, dove invece una fotocamera avrebbe bisogno di un supporto luminoso costante, necessario alla messa in risalto delle caratteristiche radiometriche e cromatiche.

Un altro caso, opposto però, è l'integrazione dei dati ottenuti da un rilievo UAV, come nuvole di punti di coperture di edifici o porzioni in alzato ostacolate da altre forme e consistenze, difficilmente o addirittura impossibili da ottenere con un laser scanner.

Viceversa, se non si ha la disponibilità di un dispositivo UAV, l'utilizzo di

fotocamere terrestri si limita ad un certo raggio d'azione, penalizzando l'analisi di alzati di notevole altezza e particolari prominente. Il supporto della tecnica LIDAR adempie a queste mancanze avendo raggio d'azione molto più ampio.

## 2 Generazione di nuvole di punti

Una componente fondamentale del rilievo è il processo di elaborazione dei dati raccolti sul campo, che avviene per mezzo di differenti software, direttamente sul campo stesso se si necessita di verificare il corretto svolgimento delle procedure, o in caso di scarse disponibilità di tempo. Altrimenti, come spesso avviene, tutte le elaborazioni più sostanziose e complete avvengono in laboratorio, impiegando tempistiche più ampie e raggiungendo risultati più esaustivi e completi.

### 2.1 Processing Fotogrammetrico

A partire da una serie di fotogrammi si ha la possibilità di generare: ortofoto, DSM (*Digital Surface Model*), nuvole di punti in formato 3D, mesh con relative texture e informazioni cromatiche dell'oggetto rilevato. Una volta organizzata in laboratorio la mole di immagini raccolte sul campo, il primo passaggio consiste nel controllare e sistemare graficamente le immagini di modo che una volta in fase di elaborazione non diano problemi di riconoscimento dei punti di legami (*tie points*). Ciò consiste nel scegliere le immagini da utilizzare eliminandone le superflue, quelle eccessivamente difettose<sup>20</sup> e quelle che non coprono effettivamente l'oggetto del rilievo, inoltre è necessario migliorare la componente luminosa di esposizione dei fotogrammi troppo scuri, processo che viene eseguito singolarmente per ogni fotogramma.

---

<sup>20</sup> I difetti principali delle immagini utili al processo fotogrammetrico sono quelle immagini con evidenti problemi di sovraesposizione, o al contrario molto scure; immagini mosse, o che ricoprono l'oggetto per una piccola percentuale di immagine, oppure, se si presenta una serie di immagini che ritraggono la stessa area senza significativi scostamenti della base di presa, allora molte di queste sarebbero superflue.



Immagine selezionata per il processo fotogrammetrico (Volte e affreschi della Cappella di San Eldrado in Novalesa) . Fonte: Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali, Politecnico di Torino 2017.



La stessa immagine migliorata nella componente luminosa.  
Fonte: Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali, Politecnico di Torino 2017.

Dopo di che si esegue il primo allineamento dei fotogrammi da parte del software, ovvero grazie ai principi della fotogrammetria digitale, il riconoscimento geometrico e la ricostruzione del centro di presa e dell'assetto della camera, grazie all'intersezione dei raggi omologhi (Bertocci, Bini, 2012) costituenti la geometria si genera una prima nuvola di punti tridimensionale rada.

Con questo passaggio il programma identifica all'interno di moltissime immagini un'enorme quantità di punti omologhi di legame geometrico definiti ATP (*Automatic Tie Points*).



A sinistra: fotogramma di interni. Fonte: Foto dell'Autore.

A destra: distribuzione dei *Tie Points* sullo stesso fotogramma. Fonte: Foto dell'Autore.

Una volta constatato un discreto numero di *Tie Points* (solitamente svariate migliaia), si procede all'inserimento delle coordinate topografiche all'interno del software. Queste coordinate saranno corrispondenti ai punti naturali identificati direttamente sull'oggetto o ai marker, distribuiti omogeneamente e misurati per via topografica per massimizzare il controllo geometrico del rilievo fotogrammetrico. L'inserimento di un sistema di coordinate topografiche serve innanzitutto per rototraslare il modello fotogrammetrico in un sistema di riferimento di coordinate sia relative, che assolute x,y,z; nonché a migliorare il calcolo dei centri di presa e dei parametri di orientamento interno della camera

Si parte con l'inserimento di almeno tre punti su diverse foto distribuite omogeneamente sull'oggetto e si dà una prima rototraslazione di massima e messa in scala del modello, dopo di che si affina il processo inserendo tutti i punti topografici, assegnando ad ogni fotogramma i punti corrispondenti. Questi, necessari a definire la scala e l'orientamento del modello, vengono collimati sulle immagini dell'oggetto, sono definiti GCP (*Ground Control Points*).

Vengono invece definiti CP (*Check Points*) quei punti scelti per controllare lo scarto quadratico medio tra l'effettiva posizione del punto sull'oggetto e la posizione nel modello fotogrammetrico. È possibile controllare questo esito grazie alla generazione di report del software.

Per un controllo omogeneo dei risultati, la deviazione standard massima accettata, affinché il processo possa assicurare una buona riuscita deve risultare minore o uguale del GSD (*Ground Sample Distance*) ovvero la dimensione del pixel a terra, nella restituzione grafica, meglio espressa come:

$$\text{sqm} \leq \text{GSD} = (h \times d) / f$$

Dove:

sqm: scarto quadratico medio/deviazione standard [m]

GSD: Ground Sample Distance cm/px

h: altezza di quota o distanza di presa [m]

d: dimensione del pixel del sensore [ $\mu\text{m}$ ]

f: distanza focale della camera

Una volta che la deviazione standard rientra entro questa determinata soglia accettabile, si passa all'elaborazione della nuvola di punti densa (avente milioni di punti) prodotta dagli automatismi del software.



Nuvola di punti densa degli interni della Cappella di San Eldrado in Novalesa.  
Fonte: Foto dell'Autore.

## Prodotti della fotogrammetria digitale

Ottenuta la nuvola di punti, si passa alla successiva triangolazione dei punti alla generazione di una maglia poligonale a definire la forma dell'oggetto rilevato detta mesh. Infine è possibile, come ultima elaborazione, effettuare la texturizzazione del modello tridimensionale, ovvero l'estrapolazione delle informazioni cromatiche di ogni fotogramma e l'applicazione di queste al modello 3D.

Grazie all'impiego di software fotogrammetrici è possibile estrarre ortofoto dai modelli generati, ovvero apportare la correzione delle variazioni altimetriche (Gomarasca, 2004). Per definizione *“l'ortofoto di precisione è una rappresentazione bidimensionale ottenibile a partire da un modello di fotogrammi orientati, per i quali cioè, è stata determinata l'esatta posizione del centro di presa nel momento dell'acquisizione dei fotogrammi. [...] La realizzazione dell'ortofoto prevede che i singoli pixel del fotogramma originale siano proiettati dapprima sul modello altimetrico (DEM) secondo la geometria proiettiva ricostruita tramite il processo fotogrammetrico e poi su un piano, corrispondente generalmente al piano orizzontale (cartografico se ci si trova in tale ambito) oppure ad un qualsiasi piano di proiezione degli elaborati architettonici (piani di proiezione e sezione orizzontali o verticali)”*<sup>21</sup>; DTM (*Digital Terrain Model*) ovvero un formato vettoriale di punti che descrive le caratteristiche morfologiche ed altimetriche del terreno senza considerare le componenti in alzato come manufatti architettonici o la vegetazione; DEM (*Digital Elevation Model*) un'immagine raster avente associazione di informazioni altimetriche per ogni pixel, rappresentante tutte le caratteristiche di elevazione del sito (Spanò et al, 2017).

Ulteriori prodotti da fotogrammetria sono le nuvole di punti che possono essere editate in differenti programmi specifici per l'editazione di *point clouds*, per ricavare sezioni di particolari manufatti come comportamenti delle murature, curve di livello per le deformazioni strutturali di volte o cupole, come del resto, andamenti altimetrici di porzioni di terreno e quindi, la successiva vettorializzazione grafica con programmi di disegno tecnico come AutoCAD.

<sup>21</sup> Antonia Spanò, Elisabetta Donadio, Filiberto Chiabrando, Modelli 3D densi tra esperienze didattiche e ricerche di soluzioni fruibili, in, “SCAVI AD AQUILEIA III. Aquileia, l'insula tra Foro e porto fluviale Lo scavo dell'Università degli Studi di Trieste 1. La strada”, Trieste, EUT Edizioni Università di Trieste, 2017, pp. 79-100.

## 2.2 LIDAR Processing

Per l'elaborazione dei dati LIDAR è stato impiegato il software della casa produttrice degli strumenti laser impiegati durante le missioni di rilievo, ovvero FARO Scene.

Il software permette l'allineamento delle diverse scansioni partendo dall'importazione nel programma dell'intero volume di lavoro suddiviso per cartelle. In seguito vengono seguite due metodologie integrate di allineamento. La prima consiste nell'allineare ed unire le scansioni con il metodo *Cloud to Cloud*, ovvero un primo allineamento approssimativo per forma e distribuzione dei punti nello spazio, che viene ottimizzato usando l'algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*), ovvero un processo intelligente di confronto punto a punto, che riconosce in modo abbastanza definito i punti distribuiti nelle parti dell'oggetto ricoperte da diverse scansioni.

La seconda invece, consiste nell'allineare le scansioni con l'utilizzo delle coordinate topografiche misurate al momento del rilievo.

Il procedimento prevede l'assegnazione sul software delle coordinate di ogni marker rilevato, nominando ogni punto allo stesso modo di come sono stati nominati sul campo e sugli eidotipi (questo per evitare confusione ed errori nei differenti passaggi rilievo-laboratorio). Per comodità dell'operatore il programma predispone una visualizzazione planare delle differenti nuvole, così che possa essere facile l'identificazione e assegnazione dei punti sui marker sull'oggetto.

Spesso è buona norma sul campo, distribuire più marker a scacchiera di quelli che in realtà vengono rilevati poi con la stazione totale, questo per facilitare il riconoscimento in relativo del software<sup>22</sup>.

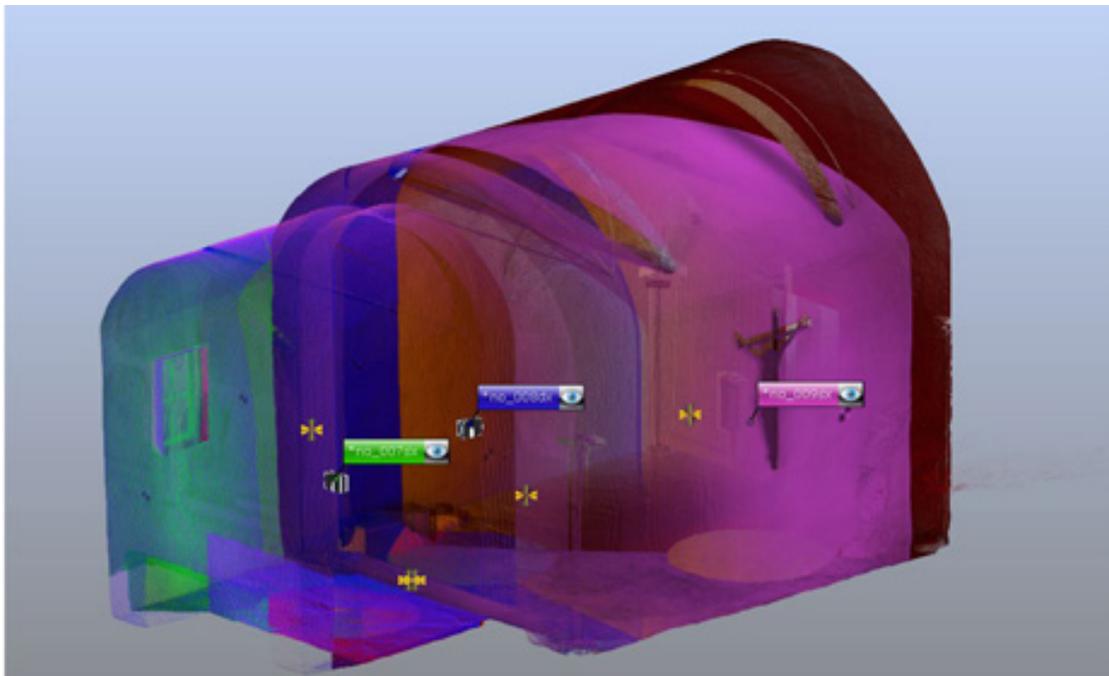
Ultimato l'inserimento dei punti celerimetrici, si inserisce il file in formato .csv contenente le coordinate di ogni punto misurato.

---

<sup>22</sup> I marker in relativo, ovvero non rilevati da stazione totale, vengono riconosciuti automaticamente dal software di LIDAR Processing utilizzando il sistema di orientamento in coordinate relative al centro strumentale.



Visualizzazione planare di una nuvola di punti della cappella di San Michele in Novalesa, con l'identificazione dei marker. Software FARO Scene. Fonte: Foto dell'Autore.



Registrazione delle differenti scansioni in un'unica nuvola rototraslata, cappella di San Michele in Novalesa. Software FARO Scene. Fonte: Foto dell'Autore.



Texturizzazione della nuvola completa della cappella di San Michele in Novalesa. Software FARO Scene. Fonte: Foto dell'Autore.

Dopo l'integrazione di questi passaggi e l'inserimento del sistema di coordinate, bisogna controllarne l'accuratezza, cioè che l'errore tra le coordinate dei marker sull'oggetto e la posizione dei marker sulla nuvola nel software (sqm) sia il più basso possibile, assicurando la bontà dei risultati.

Si procede così alla rototraslazione dell'intero modello in un'unica nuvola di punti composta da tutte le differenti nuvole.

L'ultimo passaggio consiste nel texturizzare la nuvola applicando le informazioni cromatiche relative ad ogni punto.

Ottenuta la nuvola di punti completa e texturizzata dell'oggetto, è possibile editarla in differenti software, oppure utilizzarla come base per successive estrapolazioni di elaborati bidimensionali, come piante prospetti e sezioni, curve di livello tramite sezioni<sup>23</sup> importabili in software come AutoCAD ed essere vettorializzate.

L'ottenimento di nuvole di punti, sia che si parta da fotogrammetria o tecnica LIDAR permette quindi di raggiungere gli stessi obiettivi in termini di risultati grafici e procedurali, la differenza sostanziale sta appunto nell'impiego di tecnologie totalmente diverse dal punto di vista dei costi e dei tempi di acquisizione, nonché i risultati sono diversi in termini di densità di punti e spesso di precisione. Infatti se non si dispone di avanzati strumenti come laser scanner, ottenere dati di discreta od ottima qualità è possibile comunque eseguendo operazioni di presa sul campo in tempi e costi ristrettissimi, con l'impiego dei normali dispositivi mobili come smartphone o tablet (Calantropio et al, 2017). Questo vale anche per l'impiego di droni, ormai sempre più facilmente reperibili a prezzi accessibili.

---

<sup>23</sup> Per le letture ed interpretazioni delle nuvole di punti tramite sezioni vengono utilizzati software come PointCab e CloudCompare.



### 3 Applicazione dei metodi e delle tecniche in differenti scenari multiscala

In questo capitolo vengono illustrati tre differenti scenari di applicazione dei metodi del rilievo metrico 3D, le tecniche e tecnologie impiegate e le relative fasi procedurali sia sul campo che in fase di elaborazione.

I tre siti presi come campo applicativo si distinguono per scala, consistenza e storia, il primo è la chiesa della Rocca di San Silvestro, sito archeologico inserito nel Parco Archeominerario di San Silvestro, nella provincia di Livorno; il secondo sito è il Cappellone della Basilica di San Nicola in Tolentino in provincia di Macerata, basilica risalente al XIII secolo, sito colpito dal sisma nell'ottobre del 2016; l'ultimo, interessante esempio di archeologia industriale dei primi del '900 è il paraboloide di Casale Monferrato in provincia di Alessandria.

I primi due interventi sono nati da stage didattici legati al team studentesco Team DIRECT, i rilievi sul Paraboloide, invece, appartengono a diverse campagne di collaborazione tra dipartimenti del Politecnico di Torino ed il comune di Casale Monferrato, nel corso di diversi anni.

#### Il Team DIRECT

DIRECT (*Disaster Recovery Team*) è un team che coinvolge studenti e professori appartenenti ai dipartimenti del Politecnico di Torino DAD (*Dipartimento di Architettura e Design*), DIATI (*Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture*) e DISEG (*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica*), che si pone l'obiettivo di una costante formazione studentesca nel tempo, a formare del personale specializzato nel settore della Geomatica nel rilievo metrico 3D e telerilevamento, nell'ambito del "*disaster management*", in caso di situazioni di emergenza o di ordinario monitoraggio della vulnerabilità ambientale del territorio, del patrimonio edilizio e dei beni ambientali<sup>24</sup>.

---

<sup>24</sup> [https://didattica.polito.it/team\\_studenteschi.html](https://didattica.polito.it/team_studenteschi.html)



La Rocca Di San Silvestro. Fonte: Foto dell'Autore.

### 3.1 Caso studio: Chiesa della Rocca di San Silvestro

Durante la missione del Team Direct alla Rocca e al Parco Archeominerario di San Silvestro durata dal 19 al 23 settembre 2016, sono stati eseguite campagne di tipo fotogrammetrico terrestre, UAV, LIDAR. Fu sperimentata anche la tecnologia SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) Mobile Mapping System, sistema mobile a scansione che negli ultimi anni permette di sviluppare migliori procedure di *close-range mapping system*<sup>25</sup> (Sammartano, Spanò, 2018); fu usata con l'obiettivo di rilevare l'insieme territoriale del parco, le consistenze archeologiche della Rocca e, una miniera medioevale chiamata la Buca della Faina.

---

<sup>25</sup> Close-range: definizione di distanza di mappatura fotogrammetrica o laser (vicina), riferita alla scala di rappresentazione futura. A.Spanò, 2015-2016, cit, p. 10.

## La Rocca e il territorio dell'entroterra Campigliese

La Rocca di San Silvestro è un piccolo borgo medievale di interesse archeologico, sito nel Parco Archeominerario di San Silvestro nel comune di Campiglia Marittima, in provincia di Livorno.

Già gli Etruschi, nel VII secolo a.C. posero la loro attenzione verso gli affioramenti minerari dell'entroterra dell'odierno Campigliese, spostandosi internamente intuendo il possibile beneficio nel ricavare minerali dalle colline maremmane, estraendo minerali quali rame, piombo, ma soprattutto argento.

In quella che è un'area di sessanta chilometri quadrati, riuscirono grazie ad un tenace e durissimo lavoro di secoli, a scavare ed inoltrarsi all'interno della roccia per più di due chilometri e a sfruttare cavità carsiche di oltre cento metri di profondità.

L'antico villaggio della rocca nasce agli inizi del XI sec. d.C. dalla volontà di un'importante famiglia dell'alto medioevo di origini longobarde dal nome di Della Gherardesca. Gli ottimi rapporti della famiglia con le città stato di Lucca e Pisa posero le basi per un fruttuoso se ben breve periodo di commercio di minerali. Per questo la famiglia decise di ergere un insediamento di minatori in prossimità delle antiche miniere Etrusche.

Col nome di *Castello Novo*, si ergeva su di una collinetta all'imbocco della valle dei Manieti, un piccolo villaggio con cinta muraria e un minuscolo sistema urbano sviluppato verso l'alto, dove, in sommità si ergeva la principale struttura di controllo dei signori del luogo.

Questa situazione durò fino alla fine del XI secolo d.C., quando i Della Gherardesca cedettero il controllo della zona e del villaggio ad un'altra famiglia di loro vecchi alleati, i Della Rocca.

*“è un'urbanistica abile e spregiudicata, capace di dare forma, in spazi ridottissimi, a un villaggio complesso”<sup>26</sup>*

---

<sup>26</sup> Andrea Semplici, *Guida al Parco Archeominerario di San Silvestro*, Editore Parchi Val di Cornia SPA, Piombino, 2011, cit. p. 36.

Questo fu il più proficuo e splendente periodo della Rocca di San Silvestro (allora chiamata Rocca a Palmento) dove i Della Rocca seppero amministrare gli affari minerari meglio dei precedenti signori e, portarono significative migliorie all'impianto urbano, ingrandendo la torre difensiva sommitale, raddoppiando il sistema di cinta muraria, inserendo una chiesa, probabilmente già allora dedicata a San Silvestro; distribuirono sull'intera collina una moltitudine di edifici a differente destinazione come forno del pane, cisterne dell'acqua e ovviamente le abitazioni degli abitanti minatori.

Data la continua richiesta di operai alla rocca e l'impossibilità di espandere il villaggio al di fuori delle mura difensive, gli edifici non poterono che



Ricostruzione storica della Rocca Di San Silvestro.

Fonte: A. Semplici, Guida al Parco Archeominerario di San Silvestro, 2011, p. 137.

crescere verso l'alto, ospitando nel periodo più popoloso 250 abitanti. Interessanti inoltre, le disposizioni gerarchiche sociali e delle fruizioni, ovvero le abitazioni signorili erano ben distinte e separate da quelle operaie e, le aree dedicate all'intensa attività estrattiva e fusoria erano esposte ai venti, di modo da eliminare i pesanti fumi di combustione e lavorazione, le abitazioni e i luoghi di vita comune sono riparati dai venti e meglio esposti a est.

In questi due secoli anche il paesaggio circostante si trasforma, si coltivava e si disboscava per favorire l'allevamento e per fornirsi di legname da ardere e per costruire.

La forte richiesta di metalli della zona dura per un paio di secoli, fin quando le sorti della Rocca cambiano bruscamente.

Investita da una crisi politica ed economica dettata dalle grandi città stato come Pisa, che non accettarono più questo tipo di fiorentina autonomia e, spinte inoltre da una più favorevole disponibilità di metalli da regioni vicine, spinsero i Della Rocca nel 1310 a vendere i diritti di possesso a Raniero di Raniero e a lasciare l'entroterra Campigliese per trasferirsi a Pisa, lasciando la Rocca ad un lento ed inesorabile abbandono. Le miniere intorno, senza più mercato per via del nascere di nuove tecnologie estrattive e metallurgiche vengono lentamente dimenticate.

La Rocca venne invasa dalla vegetazione e gli edifici vennero utilizzate solo da qualche pastore come riparo o come rifugio per le greggi.

Col passare del tempo persino il nome della Rocca viene dimenticato, ma viene ricordato solo San Silvestro.

Dovettero trascorrere ben due secoli e mezzo perché nascesse di nuovo l'interesse per l'area mineraria intorno alla Rocca. Cosimo de'Medici, primo granduca di Toscana, appassionato di minerali, lungimirante nel volere un'economia moderna per il granducato.

Aveva bisogno di ingenti risorse minerarie, tanto che si convinse facilmente nel prendere in considerazione le miniere Etrusche del Campigliese, dopo una breve campagna di ricerca.

Vi furono enormi investimenti e ingaggiati molti minatori provenienti dal Tirolo (chiamati dalla popolazione locale i Lanzi). Di rilevante fu la costruzione di villa Lanzi dove poter ospitare i minatori il più vicino possibile ai giacimenti minerari e alle gallerie.

La scarsità d'acqua per le lavorazioni e, ancora le mancate tecnologie

metallurgiche e le difficili condizioni climatiche della zona dell'Alta Maremma ridurranno la campagna estrattiva di Cosimo a qualche anno, lasciando nuovamente che la vegetazione si riprendesse le aree estrattive e di scavo.

Trascorsi altri quattro secoli, alcuni geologi francesi, conosciuti come i più preparati del secolo, condussero delle campagne di ricerca sulle colline di San Silvestro dimostrando la presenza di filoni argentiferi. Nel 1841 una società francese riprese gli scavi per estrarre metalli, rimanendo nell'area più di trent'anni, cambiando spesso geologi, direttori dei lavori, ma come spesso in passato accadde, dovettero arrendersi alla mancanza di tecnologie adatte, e all'effettiva scarsità di materiale minerale utile.

Nei successivi quarant'anni si susseguirono ben quattro società inglesi nel tentativo di identificare grandi quantitativi di minerale argentifero e rame, ma sempre con più scarso successo; l'ultima di queste, la *Etruscan Mines*, società londinese di capitalisti, che nei primi anni del '900 lasciò una forte testimonianza del suo passaggio con la costruzione di diverse linee di trasporto di materiali, la villa Gowett<sup>27</sup>, poco distante da Villa Lanzi e, l'imponente complesso metallurgico, ora esempio interessante di archeologia industriale, recuperato e musealizzato dopo un periodo di abbandono, in cui venivano trasportati e lavorati i minerali grezzi da separare.

Non sono ben note le ragioni che portarono un'importante schiera di ricchi capitalisti inglesi ad investire in maniera massiccia nel Campigliese, quando molti studiosi e geologi mettevano fortemente in dubbio l'effettiva possibilità di fare affari con le attività estrattive. Probabilmente, le vicende girarono intorno ad *“una spregiudicata speculazione di borsa a danno di investitori sprovveduti”*<sup>28</sup>.

Di nuovo per altri quarant'anni le miniere vennero abbandonate finché nel 1951 una società milanese tentò di estrarre zinco, rame, piombo e soprattutto di nuovo l'argento.

---

27 Ernest Gowett: fu il direttore delle miniere di San Silvestro nei sei brevi anni (1901-1907) che videro l'*Etruscan Mines* stanziarsi nel Campigliese.

28 A. Semplici, 2011, cit p. 56.

Durante i vent'anni successivi i costi di separazione del minerale dallo skarn divennero sempre più insostenibili, in più le condizioni di lavoro nelle attività estrattive erano estenuanti e ingiuste nei confronti degli operai e minatori. Dopo un susseguirsi di battaglie sindacali nel 1976 le miniere vennero definitivamente chiuse, ma gli operai, come già accadde in passato non abbandonarono subito le colline, fino al completo allontanamento di ogni operaio restio.

L'interesse culturale e paesaggistico per questo luogo da parte degli studiosi nasce negli anni '80

Con la riscoperta e l'inarrestabile curiosità della comunità archeologica, si è passati ad imponenti e vasti interventi di scavi e di restauro della Rocca a partire dal 1996, con la fondazione del Parco Archeominerario di San Silvestro, come simbolo di un percorso di recupero e tutela delle tracce delle civiltà che hanno popolato questo luogo, che ad oggi costituisce un unicum (Semplici, 2011).

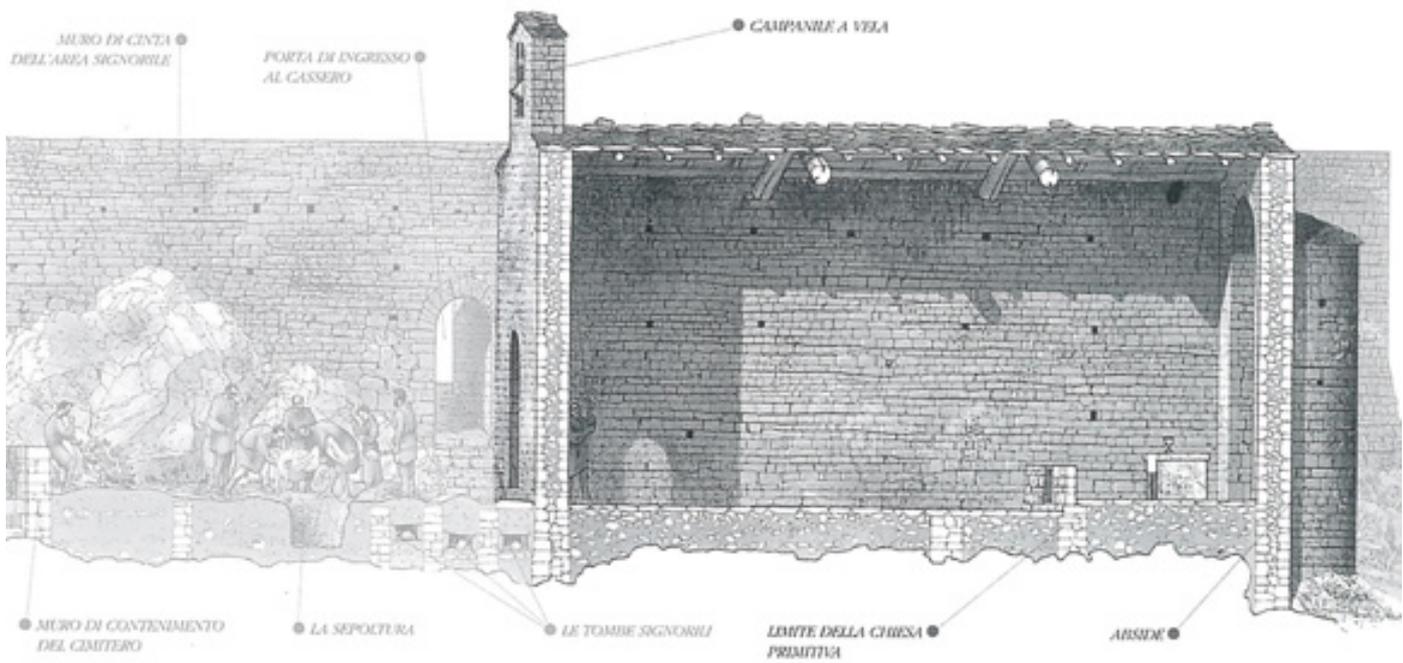
## La Chiesa di San Silvestro

Interessante esempio di edificio religioso rurale, romanico, dell'area maremmana pisana, in linea con le caratteristiche di molte altre chiese della zona dello stesso periodo è la chiesa di San Silvestro.

Eretta a fine del XI secolo d.C., viene successivamente ampliata fra il XII e il XIII secolo, per via dell'aumento della popolazione. Il primo documento che parla della *Chiesa di San Silvestro* alla Rocca risale al 1281, menzionando perfino il cappellano. Dopo l'abbandono della Rocca agli inizi del XIV secolo, l'edificio della chiesa fu l'unico a conservarsi, probabilmente grazie alla permanenza della sede ecclesiastica. Si ha notizia del suo ultimo impiego nel 1399.

Si trattava di una chiesa a campata unica, absidata, con campanile a vela, la copertura era in capriate lignee, il manto era in pietra. I due ingressi erano quello principale e uno laterale a fianco dell'altare. L'illuminazione era scarsa, portata semplicemente da una croce lucifera, al di sopra del portale sulla facciata principale e da due monofore sull'abside e sulla facciata est.

Una particolarità costruttiva che emerge è la bicromia dei conci (Guideri, 2005).



Ricostruzione storica della chiesa di San Silvestro. S. Guideri, Rocca San Silvestro, *percorso didattico*, 2005, p. 25 .



Chiesa della Rocca Di San Silvestro oggi. Fonte: Foto dell'Autore.

### **3.1.1 Fotogrammetria UAV**

In questo capitolo viene approfondito il metodo del rilievo fotogrammetrico partendo dall'utilizzo di dispositivi UAV. Grazie alla possibilità di vedere l'oggetto di studio dall'alto e da quote differenti è quindi possibile ottenere un'enorme quantità di immagini aeree, che, una volta elaborate tramite l'ausilio di software di fotogrammetria daranno luce a modelli spaziali come nuvole di punti, modelli poligonali e, successivamente elaborati classici del linguaggio architettonico, come viste planimetriche prospetti e sezioni. Inoltre, esportando determinati database raster (DSM) in specifici programmi di elaborazione come quelli destinati alla gestione di sistemi informativi geografici, è possibile ottenere ulteriori analisi spaziali del modello dell'oggetto, tramite l'utilizzo di informazioni specifiche contenute in ogni pixel dell'immagine.

### **3.1.2 Strumentazione Utilizzata**

Durante la campagna di rilievo sono stati pianificate due tipologie di volo, servendosi di due differenti droni, uno ad ala fissa ed un esacottero.

Il drone ad ala fissa è il modello eBee SenceFly/Menci EBM-1539 ed è stato impiegato per l'analisi territoriale del parco, con voli ad una quota media di 150 metri; l'esacottero, invece, è il modello Ubik Diati MK01, un multi rotore a sei motori, con sistema elettronico che permette il controllo in remoto o in automatico, ed è stato impiegato per voli ad una quota inferiore (60-70 metri c.ca), concentrandosi sull'analisi della Rocca e dell'intero colle.

Per i risultati approfonditi, in questo capitolo verranno analizzati solo i dati dell'esacottero.



Esacottero Ubik Diati MK01. Fonte: Chiabrando et al, 2017.

## Caratteristiche Drone

Tipologia	Esacottero
Rotori	6 motori brushless
Peso massimo con equipaggiamento	3,6 kg
Diametro	120 cm
Altezza	33 cm
Velocità massima orizzontale	5 m/s
Velocità massima verticale	-3/+5 m/s
Diametro Eliche	15 inches
Fotocamera	Sony Ilce 5100



Fotocamera Sony Ilce 5100.

Fonte: <http://www.fototreviso.it/mirrorless/5531-sony-alpha-5100.html>.

## Caratteristiche Fotocamera

Fotocamera	Sony Ilce-5100
Distanza focale	20 mm
Dimensione pixel sensore	4 $\mu\text{m}$
Risoluzione immagine	6000x4000 px

### 3.1.3 Intervento sul campo e metodo applicativo

Primo passo fondamentale sul campo di rilievo è la definizione del sistema topografico; come già accennato in precedenza può essere definito in relativo o in assoluto. Il sistema adottato alla Rocca di San Silvestro è stato in coordinate assolute riferite all'UTM-WGS84<sup>29</sup>.

La costruzione della rete di vertici di inquadramento è avvenuta tramite la distribuzione nell'area adiacente la Rocca e al suo interno, di vertici topografici, materializzati utilizzando geometrie esistenti come spigoli lapidei o altri oggetti facilmente riconducibili ad un punto. Dove invece non è risultato comodo utilizzare una preesistenza materica, si è fatto ricorso all'utilizzo di chiodi tassellati inseriti direttamente in blocchi lapidei o nel terreno, segnalati tramite dischi metallici, scatolette di plastica colorate, di modo che possano permanere nel tempo e, se ci fossero ulteriori interventi di rilievo in futuro, saranno utili per potersi allacciare nuovamente alla rete, tralasciando la definizione di una nuova rete topografica.

La registrazione delle coordinate è stata eseguita con l'ausilio di dispositivi GNSS, in questo caso sono stati usati gli strumenti *Leica 1203+* e *Geomax Zenit 35*. Durante le acquisizioni ci si è appoggiati alle costellazioni GPS, GLONASS e Beidou.

A San Silvestro sono stati misurati undici punti per la rete topografica in metodo statico, successivamente sono stati posizionati omogeneamente i marker su tutta la Rocca assicurandosi che non fossero coperti da ostacoli di modo da essere riconoscibili dalla fotocamera sul drone. In seguito si è passati alla registrazione delle coordinate di questi marker, sempre con l'utilizzo di dispositivi GNSS ma questa volta in metodo RTK.

I vertici della rete topografica sono stati utilizzati inoltre come punti di appoggio per le stazioni totali, con le quali sono stati misurati sulle facciate dei diversi ruderi della Rocca, i marker utili al sistema di riferimento per fotogrammetria terrestre.

---

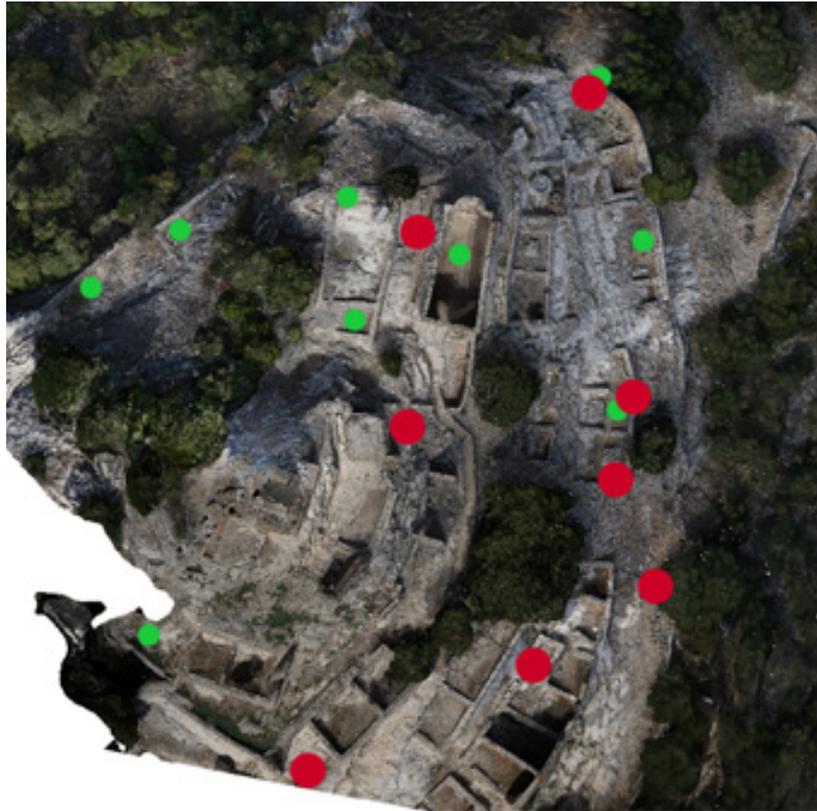
<sup>29</sup> La sigla UTMWGS84 definisce la proiezione gaussiana della superficie terrestre UTM (*Universal Transverse of Mercator*), riferita al sistema di coordinate globali WGS84 (*World Geodetic System 1984*) su un ellissoide elaborato nel 1984.



Strumento GPS Leica 1203+ in fase di acquisizione. Fonte: foto dell'Autore.



Materializzazione di un vertice a terra con chiodo e disco metallico. Fonte: Foto dell'Autore



Distribuzione sulla Rocca dei Vertici (in rosso) e dei punti RTK (in verde). Fonte: foto dell'Autore.

M05	567.041	1664.831	290.568
M06	512.346	1701.984	291.492
T03	552.567	1705.674	302.517
T04	569.110	1688.566	292.132
T05	572.585	1707.563	291.007
T06	565.155	1723.572	292.816
T09	540.884	1698.700	305.249
T10	540.672	1711.820	305.774
V05	569.940	1688.534	292.154
V07	566.162	1725.194	292.495
T1007	561.307	1704.882	296.650
T12	499.702	1694.002	291.117
T13	509.942	1667.811	297.164

Tabella di coordinate dei vertici e dei punti a terra. Fonte: Calcoli

Al momento della pianificazione dei voli del drone bisogna tenere in considerazione diversi fattori affinché le acquisizioni vadano a buon fine. Determinante è l'analisi morfologica al momento del volo<sup>30</sup>, dev'essere ben nota l'area da rilevare, capirne le caratteristiche morfologiche, bisogna inoltre tener conto dell'autonomia ridotta delle batterie dei dispositivi e quindi, definire il percorso di volo del drone.

Come già accennato nel capitolo 1, la fotogrammetria aerea si basa sul ricoprimento o overlapping.

Per raggiungere una buona percentuale di ricoprimento dell'oggetto (intorno al 70-80%), è fondamentale impostare una specifica quota di volo, distanza di presa, numero di fotogrammi e le corrette traiettorie al di sopra dell'oggetto.

Il percorso di volo è definito grazie all'inserimento in un'immagine da un browser (Google Maps, Google Heart ecc) dei differenti *waypoints*, "*punti specifici di riferimento nello spazio fisico utilizzati per la navigazione*"<sup>31</sup>.

Quindi, una volta impostati i parametri della fotocamera, l'altezza e la velocità di volo, l'intervallo continuo tra i fotogrammi e definite la traiettorie del velivolo, si procede con il volo vero e proprio.

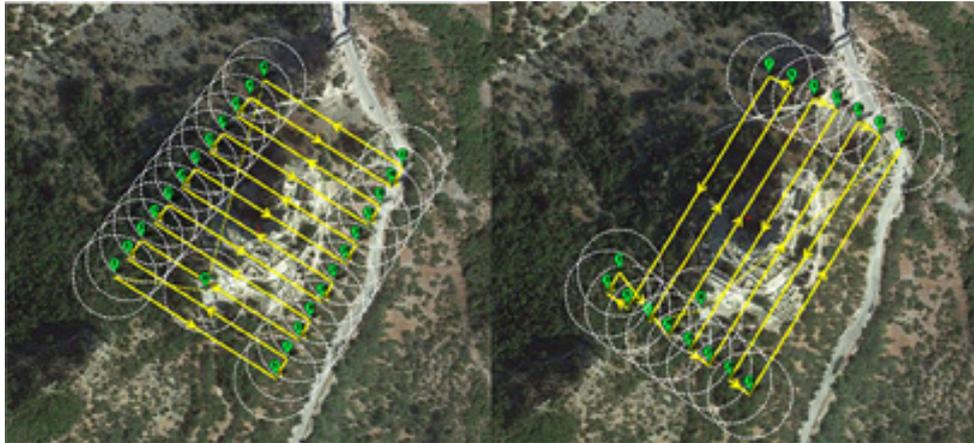
A San Silvestro sono stati eseguiti cinque voli con l'ausilio dell'esacottero, due con camera puntata nadiralmente sull'oggetto, due con orientamento della camera inclinato di 45° (le due coppie di voli sono state eseguite in maniera perpendicolare nord-sud ed est-ovest, data la morfologia del sito), ed un volo circolare, ovvero l'impostazione di un obiettivo bersaglio da parte del drone (in questo caso la Rocca), con camera orientata sempre a 45°, in modo da ottimizzare il ricoprimento delle parti oggetto verticali, (Chiabrando et al, 2017).

Nel complesso sono state scattate 1119 immagini, con voli della durata di circa 15 minuti ciascuno.

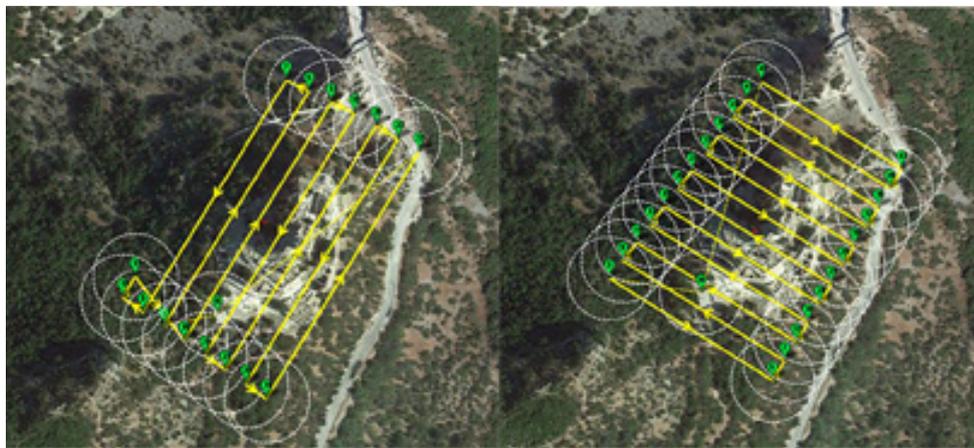
---

30 Dev'essere verificata la soglia massima di vento ammissibile per pilotare, o per eseguire le manovre base.

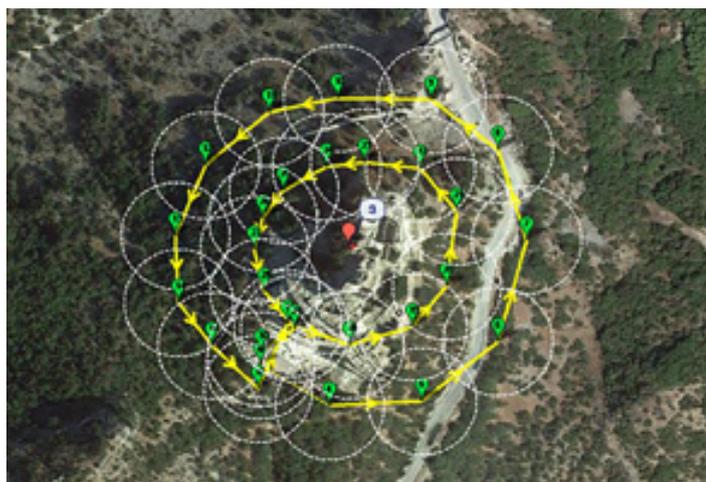
31 Chiabrando et al, *The influence of flight planning and camera orientation in UAVs Photogrammetry. A test in the area of Rocca San Silvestro (LI), Tuscany*, 2017, pp. 164.



Percorsi di volo con strisciate perpendicolari Nord-Sud. Fonte: Chiabrando et al, 2017.



Percorsi di volo con strisciate perpendicolari Est-Ovest. Fonte: Chiabrando et al, 2017.



Percorso di volo circolare, camera a 45°. Fonte: Chiabrando et al, 2017.

### 3.1.4 Elaborazioni

L'intera mole di dati è stata successivamente suddivisa e selezionata per qualità ed effettiva utilità al processo fotogrammetrico.

Una volta in laboratorio, la prima fase è stata appunto quella della scelta dei fotogrammi utili, ovvero, ci si è concentrati sull'area della Chiesa della Rocca.

Sono stati quindi impiegati, dei cinque voli, 103 fotogrammi dei voli nadirali, 133 dei voli a 45° e 194 del volo circolare sempre a 45°. Non sono stati necessari interventi di miglioramento di immagine data la buona qualità dei fotogrammi.

Si è passati quindi all'inserimento dei dati nel software di fotogrammetria *Agisoft Photoscan*.

Al fine di ottimizzare le tempistiche e di non forzare i computer per la processazione si è deciso di suddividere l'intero lavoro in tre blocchi, detti *chunks*, contenenti le immagini dei rispettivi voli (nadirale, a 45°, circolare). Per questo motivo tutti i passaggi sono stati ripetuti per ogni *chunk* fino alla generazione della nuvola di punti densa.

Il primo passaggio è stato quello di ottenere il primo allineamento automatico delle immagini da parte del software e la generazione della prima nuvola di punti rada, senza l'ausilio e l'inserimento delle coordinate<sup>32</sup>, impostando un *processing* in modalità *medium*<sup>33</sup>.

Eseguito l'allineamento delle 430 immagini, il software ha riconosciuto un numero di *ATP* pari a 1.436.597 e, ha visualizzato la distribuzione spaziale dei punti.

---

<sup>32</sup> Come già accennato nel capitolo 2.

<sup>33</sup> Nei software, le modalità di elaborazione si distinguono in base alle esigenze dell'operatore, un processo in *low* definisce un risultato decisamente speditivo senza l'ausilio di particolari potenze in termini di computer, con *medium* e *high*, i tempi di processazione e le potenze dei processori aumenteranno proporzionalmente all'aumentare della qualità del risultato.



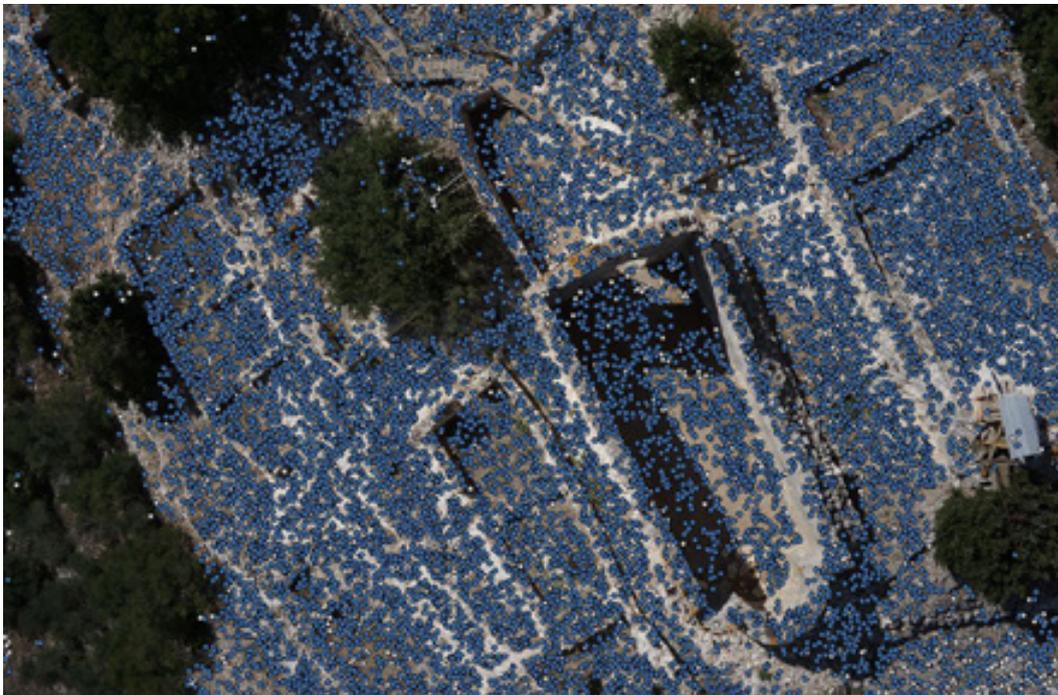
Fotogramma con orientamento nadirale della camera. Fonte: Foto dell'Autore



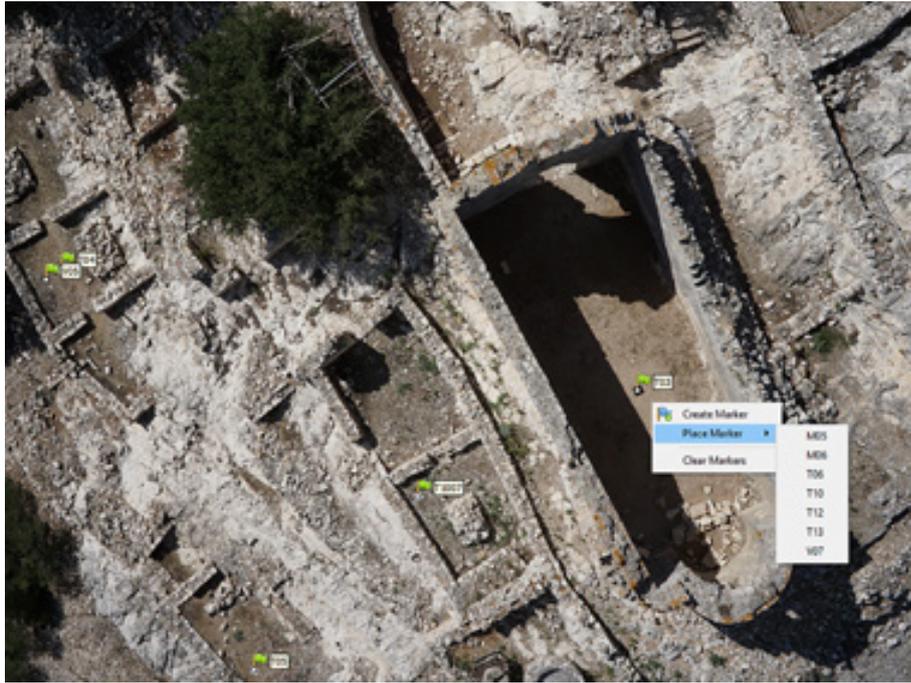
Fotogramma con orientamento a 45° della camera. Fonte: Foto dell'Autore



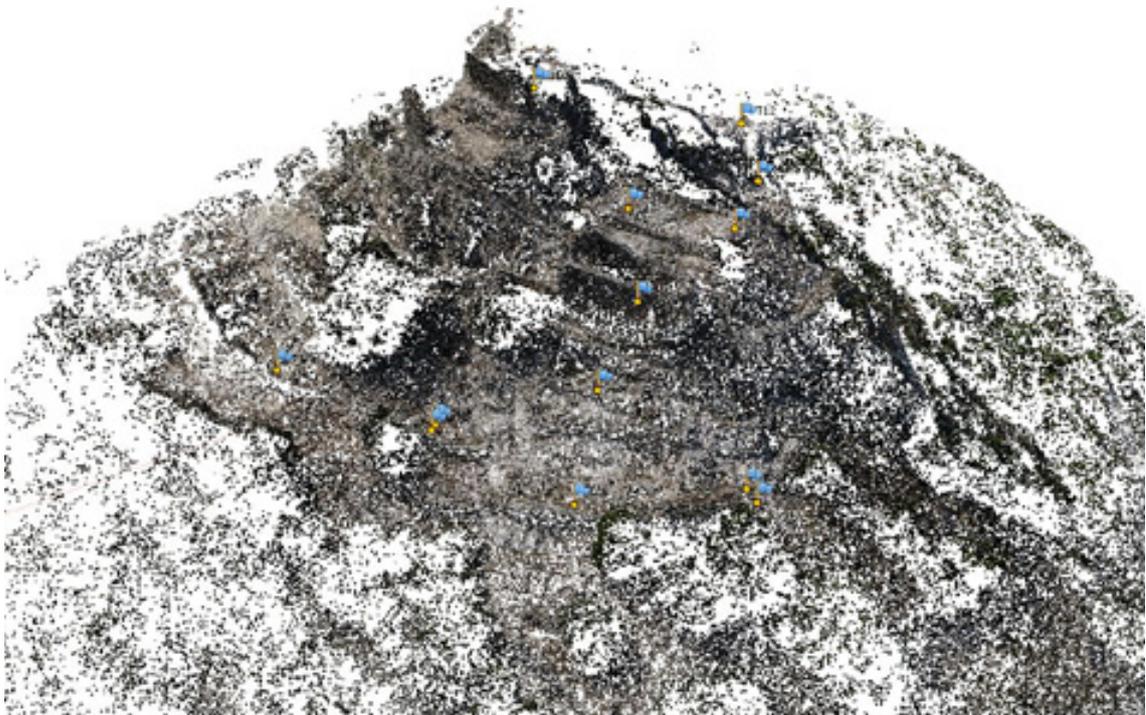
Nuvola di punti rada di uno dei tre chunk. Fonte: Foto dell'Autore



Verifica della omogenea distribuzione dei Tie Points sul fotogramma. Fonte: Foto dell'Autore



Inserimento dei marker sui fotogrammi. Fonte: Foto dell'Autore



Distribuzione tridimensionale dei marker sulla nuvola rada. Fonte: Foto dell'Autore

Una volta controllata la complessiva distribuzione dei *tie points* e verificato un buon ricoprimento, si è passati all’inserimento del file di coordinate in formato .csv dei vertici, inserendo quindi i primi tre punti, distribuiti omogeneamente sul sito e in qualche fotogramma, così da poter eseguire la prima rototraslazione del modello.

Verificata la corretta rototraslazione sono stati inseriti gli altri dieci punti di coordinate note su tutti i fotogrammi che raffigurassero i marker. Ripetendo l’operazione di rototraslazione con l’inserimento dei rimanenti punti si affina il risultato andando a ridurre l’errore geometrico. Si è passati quindi alla generazione della nuvola di punti densa, in modalità *medium*, processo più lungo dell’intero lavoro di elaborazione.

Il risultato è stato l’ottenimento di tre nuvole di punti:

Chunk immagini nadirali: 16.639.323 punti

Chunk immagini a 45°: 16.094.825 punti

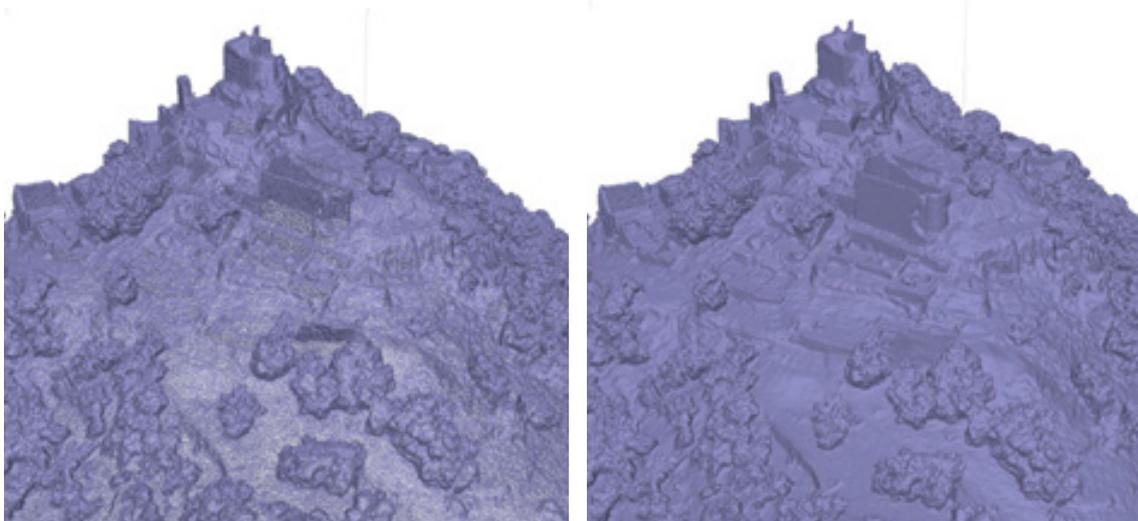
Chunk immagini circolari: 20.633.987 punti

Una volta ottenuta una nuvola di punti densa per ogni *chunk* si è eseguita un’unione delle cartelle di lavoro, alla generazione di un’unica complessiva nuvola di oltre 53 milioni di punti.

Ultimato il processo è stata elaborata la mesh, ovvero la poligonizzazione della nuvola densa, alla generazione del modello solido e la texture, consistente nella distribuzione delle informazioni cromatiche dei diversi fotogrammi alla mesh ad una risoluzione di 4096 px.



In Alto: le tre nuvole di punti dense dei tre differenti chunks. Fonte: Foto dell'Autore.  
In Basso: l'unione delle tre nuvole dense a formare un'unica nuvola. Fonte: Foto dell'Autore.



A sinistra: Mesh in visualizzazione geometrica *Wireframe*. Fonte: Foto dell'Autore.

A destra: Mesh in visualizzazione solida . Fonte: Foto dell'Autore.



Mesh texturizzata. Fonte: Foto dell'Autore.

### 3.1.5 Risultati e Rappresentazioni

Con l'ottenimento dei differenti modelli 3D è stato possibile generare ortofoto; nuvole di punti editabili in programmi di *point cloud editing*; DEM processabili in ambiente GIS.

In ogni istante delle elaborazioni, è possibile verificare la bontà dei risultati con l'esportazione di un report, con elencate modalità di elaborazione e risultati in termini di precisione.

Il report illustra i differenti risultati:

L'overlapping, ovvero la percentuale di ricoprimento dei vari fotogrammi in pianta in maniera grafica scalare, riferendosi alla quantità di prese che effettivamente si sovrappongono.

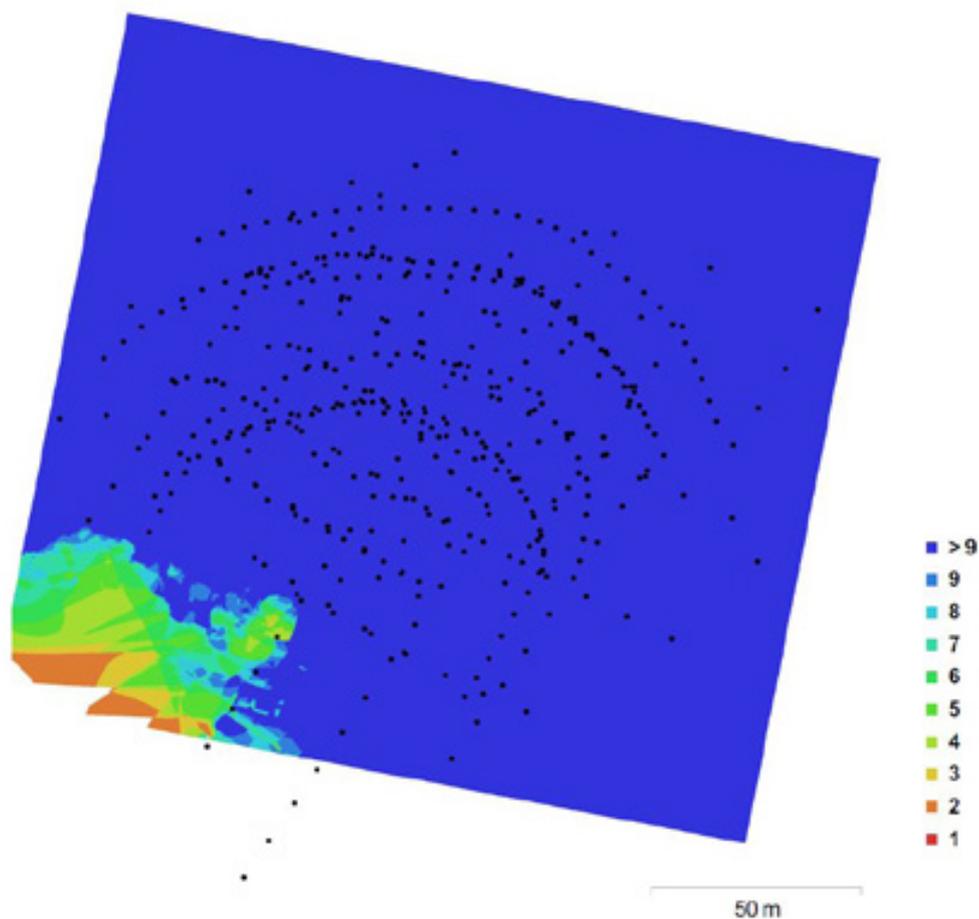


Diagramma di overlapping: Analizzando lo schema si riscontra un'ottima percentuale di ricoprimento, andando a scemare nell'area a sud-ovest, dovuta alla mancanza di immagini per ottenere una sufficiente sovrapposizione (mancanza che si ripercuote in tutti i passaggi successivi di elaborazione). Fonte: Foto dell'Autore.

## Risultati fotogrammetrici

Quota di volo media	66,8 m
Numero di fotogrammi	430
GSD	1,23 cm/pix
Area Coperta	0,0304 km <sup>2</sup>
sqm	2,77 cm

In questo caso si è verificato che il GSD, che rappresenta il grado di dettaglio della nuvola, risultava 1,23 cm/pix, e lo scarto quadratico medio di 2,77 cm, benchè la teoria dica che è inutile che il GSD sia minore dello sqm, dal momento che in questo caso sono due valori più che prossimi e che in ambito archeologico la capacità di lettura di elementi piccoli è sicuramente importante, è stata accettata questa situazione.

Per gli elaborati è stata adottata una scala degli elaborati di 1:500.

## Elaborati

Al fine di svolgere uno studio mirato all'approfondimento dell'uso del suolo nell'area del Parco Archeominerario di San Silvestro, sono state eseguite ulteriori analisi, utilizzando *dataset* precedentemente sviluppati. Con l'obiettivo di sviluppare un inquadramento territoriale, partendo dalle aree limitrofe al Parco sono stati utilizzati i dataset del Geoportale della Regione Toscana, e gli elaborati per formare mappe tematiche, elaborate poi in ambiente GIS, con riferimento alla morfologia, alla geologia, alle aree urbane, aree naturali e aree di interesse paesaggistico.

Il passaggio successivo è stato una discesa di scala, integrando i dati geografici ottenuti del Parco, ai risultati raster da *processing* fotogrammetrico delle immagini da drone eBee SenceFly/Menci (Ortofoto e DEM), dove l'area di interesse comprendeva il complesso della Rocca, Vila Lanzi, Palazzo Gowett e la stazione dei Lanzi.

L'ultimo passaggio, ha visto lo studio dei versanti della collina della Chiesa di San Silvestro, non più a scala territoriale ma architettonica. Sono state eseguite sezioni territoriali, partendo dalla nuvola densa dal *processing* fotogrammetrico delle immagini da drone Ubik/Diati, mettendo in luce le caratteristiche morfologiche del colle, in relazione ai manufatti

architettonici in alzato.

## Il sistema GIS

Il GIS (*Geographic Information System*) è “un potente insieme di strumenti in grado di acquisire immagazzinare, recuperare, trasformare, analizzare e riprodurre dati spaziali riferiti al territorio”<sup>34</sup>.

Lo scopo dell'utilizzo del GIS è quello di produrre e aggiornare cartografia numerica tematizzata, modificabile e, globalmente condivisibile, al fine di svolgere studi ed indagini in determinati settori.

Il sistema GIS per poter gestire informazioni di diversa natura, utilizza dati geometrici, vettoriali e alfanumerici.

Questo sistema permette di gestire e controllare le relazioni topologiche tra le entità geometriche di base e ne permette la tematizzazione degli elementi spaziali con diversi contenuti (sia globali che di settore), gestendo tutto in un sistema di riferimento definito (Surace, 2010).

L'importanza della georeferenziazione e dei rapporti topologici permette di confrontare e modificare dati cartografici, oppure di passare da un sistema di riferimento ad un altro, definendo una caratteristica fondamentale: l'aggiornabilità dei *dataset*, spinta dalla necessità sempre maggiore di avere un controllo globale dell'utente, sulle informazioni territoriali (Gomasca, 2004).

I principali ambiti che impiegano il GIS sono la pianificazione territoriale, l'urbanistica, la geografia, l'architettura, la sociologia e l'agricoltura.

---

<sup>34</sup> P. A. Burrough, *Principles of Geographic Information Systems for Land Resource Assessment. Monographs on Soil and Resources Survey*, No. 12, Oxford Science Publications, New York 1986.



Inquadratura territoriale del Parco Archeominerario. Fonte: Base satellite: Ortofoto 1:10000 2013 WMS (Regione Toscana), confini area Parco: shapefile Geoportale Regione Toscana: ap\_anpil\_region\_ap\_anpil. Pre-elaborazione di E.Colucci.

## Analisi territoriale del Parco Archeominerario

Per effettuare l'analisi territoriale del Parco e le successive tematizzazioni, ci si è appoggiati ai lavori di tesi svolti da ex-studenti sulle basi delle attività di stage del Team Direct e, da lavori svolti a seguito della Convenzione tra il Politecnico di Torino e la Società Parchi Val di Cornia S.p.a. In particolare i lavori di Elisabetta Colucci nella tesi di laurea magistrale: *Architettura e Natura di paesaggi archeologici. Analisi spaziali integrate in ambiente WEB GIS per la conservazione e la comunicazione della memoria storica: Il Parco Archeominerario di San Silvestro*, tesi che ha avuto l'obiettivo di organizzare e approfondire la documentazione territoriale dell'area del Parco Archeominerario, col fine di valorizzare e diffondere la conoscenza del luogo e della storia; e gli esiti del lavoro comune tra la Società Parchi Val di Cornia e il Politecnico di Torino, pubblicati in: *The Geomatics Contribution for the Valorization Project in the Rocca of san Silvestro Landascape Site*. ISPRS, (Brocchini et al, 2017)

I dati utilizzati da queste fonti sono stati fondamentali allo studio di inquadramento dell'area del Parco Archeominerario di San Silvestro e degli intorno.

La prima fase di analisi dell'area del Parco Archeominerario di San Silvestro è stata interessata da una tematizzazione della morfologia, presenza antropica, aree verdi, antropizzate o naturali; i sistemi di comunicazione, strade urbane ed extraurbane, come anche i sentieri che si diramano all'interno del Parco. Queste informazioni territoriali sono state acquisite dalla banca dati del Geoportale della Regione Toscana, GEOscopio, Cartoteca e Open Data geografici, in formato .shp e raster (Ortofoto e DEM) e sono state importate ed elaborate in ambiente GIS. Il sistema di riferimento utilizzato è stato in coordinate globali WGS 84/ UTM zona 32N.

La seconda tematizzazione è stata eseguita in base alle caratteristiche geologiche del Parco e del suo intorno ad una scala di rappresentazione finale di 1:15000, partendo dalla Carta Geologica Unitaria della Toscana ad una scala di 1:10000.

Infine si è approfondito il tema dell'uso del suolo, integrando dati del Geoportale della Regione Toscana e il Database Villa Lanzi del Parco Archeminerario, mettendo in luce le antiche zone di attività estrattiva quali gallerie, imbocchi, creste ed affioramenti e i principali manufatti archeoindustriali (Rocca di San Silvestro, Palazzo Gowett e l'impianto industriale della Etruscan Mines); sono stati rappresentati distintamente, invece, i siti moderni di estrazione: Cave e discariche.

Queste tre analisi nascono dalla reinterpretazione di dati elaborati ed armonizzati nella tesi di laurea sopra citata da Elisabetta Colucci.

Concluse le prime carte di inquadramento territoriale, è stato inserito nel progetto GIS, il file raster dell'ortofoto da volo Ebee, anch'esso frutto dei precedenti lavori, riscontrando una corretta relazione nei sistemi di riferimento utilizzati e la bontà delle acquisizioni topografiche avvenute sul campo.

Il risultato è stato la tematizzazione dell'ortoimmagine del complesso della rocca di San Silvestro in scala finale di rappresentazione di 1:5000, segnalando più nel dettaglio le emergenze architettoniche ed archeologiche, i sentieri antichi, le strade ed i vecchi siti minerari (Fonte: Colucci 2017; Bricchini et al, 2017).

Le ultime elaborazioni, in questo caso a scala architettonica, sono state la produzione di ortofoto della Rocca e l'analisi del colle della Chiesa di San Silvestro, andando a definire due sezioni territoriali degli andamenti del sito. Le sezioni sono state eseguite tramite il software PointCAB dove si è importata la nuvola densa del *processo* fotogrammetrico<sup>35</sup>. Le sezioni sono state esportate in file .dwg ed elaborate in AutoCad dove sono stati disegnati al tratto la morfologia del terreno, le pendenze e gli alzati delle architetture principali.

---

35 Come già citato al capitolo 3.1.4

LEGENDA

-  Confini Parco Archeominerario
-  Aree estrattive-Cava
-  Edificato
- Sentieri**
-  Via delle fonti
-  Via dei Manietti
-  Via dei filoni
-  Va dei Lanzi
-  Via delle ferruzze
-  Via del temperino
- Strade**
-  Strada Extraurbana Principale
-  Strada Locale/vicinale
- Verde**
-  Area Agricola
-  Area incolta o a pascolo
-  Area boschiva
-  Aree verdi
-  Area priva di vegetazione
- Curve di Livello**
-  0
-  250
-  500
-  750
-  1000
- Toponomastica**
-  Miniere antiche

Fonti

Base: morfologia DTM 10 m orografico (WMS)

Geoportale Regione Toscana

Aree Estrattive-Cava

Edificato

Strade

Verde

Miniere antiche

Elaborazioni. Fonte: (Colucci, 2017)

Sentieri

Parco Archeominerario di San Silvestro

Studio morfologico

Fonte Colucci, 2017

1:15.000

0 200 400 600 800 1000 m



## LEGENDA

-  Confini Parco Archeominerario
- Denominazione unità geologiche**
-  Depositi alluvionali attuali
-  Depositi alluvionali Pleistocene
-  Argilliti varicolori magnesifere con marne
-  Argilliti e calcari Poggio Rocchino
-  Arenarie torbiditiche silicoclastiche
-  Filoni Porfirici
-  Calcare massiccio
-  Calcare Selcifero di Limano
-  Arenarie quarzoso feldspatiche
-  Marne e calcari marnosi
-  Calcari e calcari dolomitici
-  Calcari modulari rosati
-  Argilliti siltose
-  Graniti

## Fonti

Base: morfologia DTM 2013

## Geoportale Regione Toscana

- Confini Parco Archeominerario
- Depositi alluvionali attuali
- Depositi alluvionali Pleistocene
- Argilliti varicolori magnesifere con marne
- Argilliti e calcari Poggio Rocchino
- Arenarie torbiditiche silicoclastiche
- Filoni Porfirici
- Calcare massiccio
- Calcare Selcifero di Limano
- Arenarie quarzoso feldspatiche
- Marne e calcari marnosi
- Calcari e calcari dolomitici
- Calcari modulari rosati
- Argilliti siltose
- Graniti

Parco Archeominerario di San Silvestro

Geologia del Suolo

Fonte: Colucci, 2017

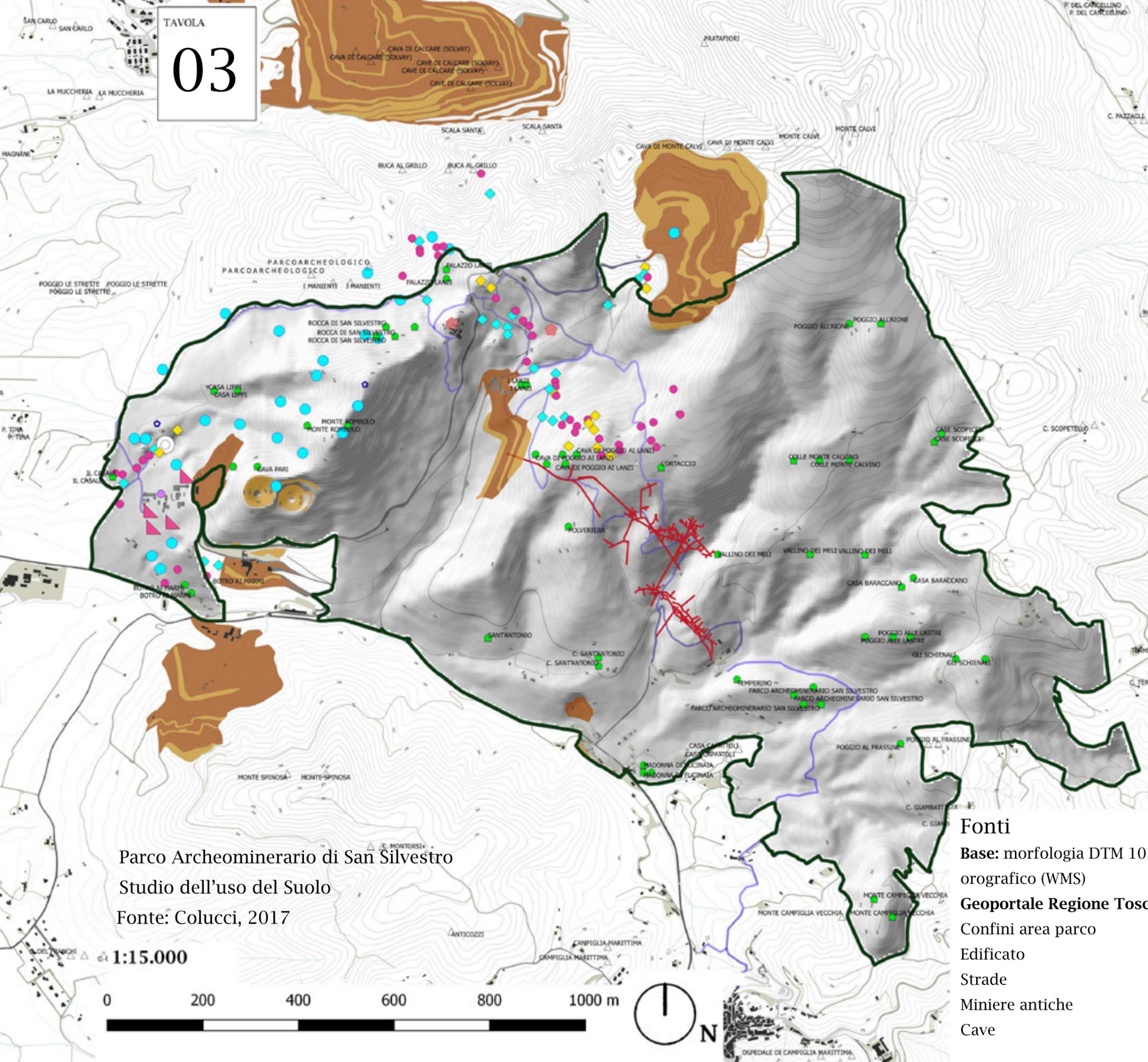
1:15.000

0 250 500 750 1000 m



**LEGENDA**

-  Confini Parco Archeominerario
-  Cave
-  Opere di Sostegno cave
-  Gallerie Sito Minerario
-  Edificato
- Sito Minerario San Silvestro**
-  Breccie di Affioramento
-  Cave
-  Cavità Carsica
-  Discarica Materiali cava
-  Manufatti Archindustriali
-  Ingressi Gallerie
-  Ingressi Pozzo
-  Impianto industriale
-  Insedimento
-  Scavo minerario a cielo aperto
-  Trincea
- Strade**
-  Extraurbana Principale
-  Strada Locale/vicinale
- Curve di Livello**
-  0
-  250
-  500
-  750
-  1000
- Sentieri**
-  Via delle fonti
-  Via dei Manieti
-  Via dei filoni
-  Via dei Lanzi
-  Via delle ferruzze
- Toponomastica**
-  Miniere antiche



Parco Archeominerario di San Silvestro  
Studio dell'uso del Suolo  
Fonte: Colucci, 2017

**Fonti**

- Base: morfologia DTM 10 m orografico (WMS)
- Geoportale Regione Toscana
- Confini area parco
- Edificato
- Strade
- Miniere antiche
- Cave

**Elaborazioni. Fonte: (Colucci, 2017)**

- Sentieri
- Database Villa Lanzi
- Sito Minerario
- Gallerie Sito Minerario

1:15.000

0 200 400 600 800 1000 m



**Legenda**

- ▭ Confini Parco Archeominerario
- Edificato

**Fonti**

**Base:** morfologia DTM 10 m orografico (WMS)  
Ortofoto eBee. Fonte: Brocchini et al 2017; Colucci 2017.

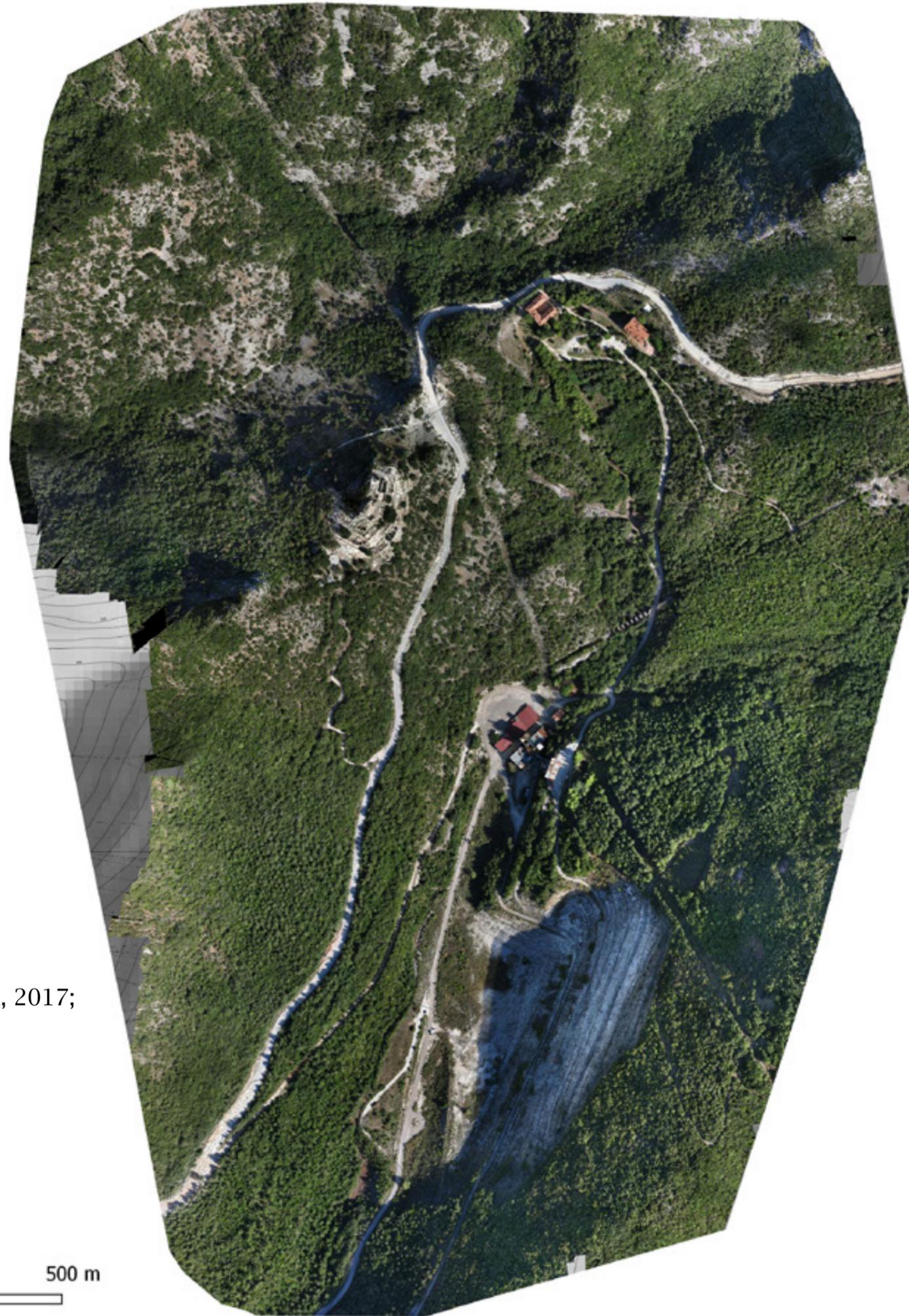
**Geoportale Regione Toscana**

Confini area parco  
Edificato

Inserimento dell'ortofoto eBee del Complesso di San Silvestro nell'area del Parco Archeominerario  
Fonte: lavoro comune Brocchini et al 2017; Colucci 2017.

**1:15.000**





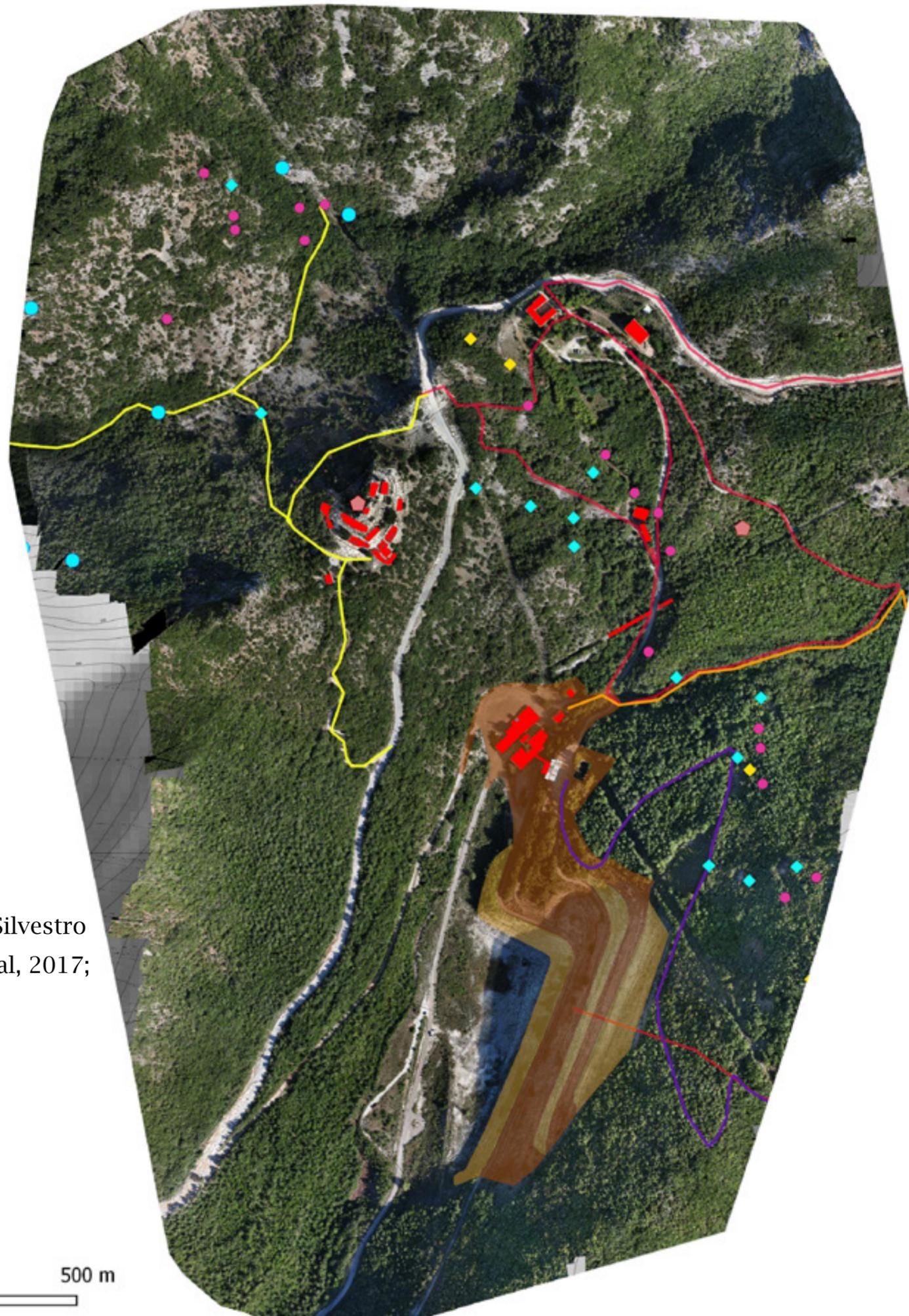
Ortofoto Volo Ebee

Fonte: lavoro comune, Brocchini et al, 2017;  
Colucci, 2017.



1:5.000





## Legenda

### SITO MINERARIO

- ◆ Edifici Archeoindustriali
- ◆ Imbocco di Galleria
- Imbocco di Pozzo
- Impianto Industriale
- ◆ Scavo minerario a cielo aperto

### SENTIERI

- via delle fonti
- via dei manieti
- via dei filoni
- via dei lanzi
- via delle ferruzze
- via del temperino
- Opere di sostegno cave
- Cave
- Gallerie Sito Minerario
- Edificato

### Fonti

#### Database Villa Lanzi

- Edifici Archeominerari
- Imbocchi di Galleria
- Imbocco di Pozzo
- Impianto Industriale
- Scavo minerario a cielo aperto
- Gallerie Sito Minerario

#### Geoportale Regione Toscana

- Cave
- Opere di sostegno cave
- Edificato

#### Elaborazioni (Fonte: Colucci, 2017)

- via delle fonti
- via dei manieti
- via dei filoni
- via dei lanzi
- via delle ferruzze
- via del temperino

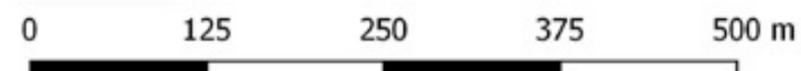
Ortofoto Volo Ebee

Teamatizzazione siti minerari San Silvestro

Fonte: lavoro comune, Brocchini et al, 2017;  
Colucci 2017.



1:5.000





Ortofoto Rocca di San Silvestro  
volo Ubik/Diati  
scala 1:500

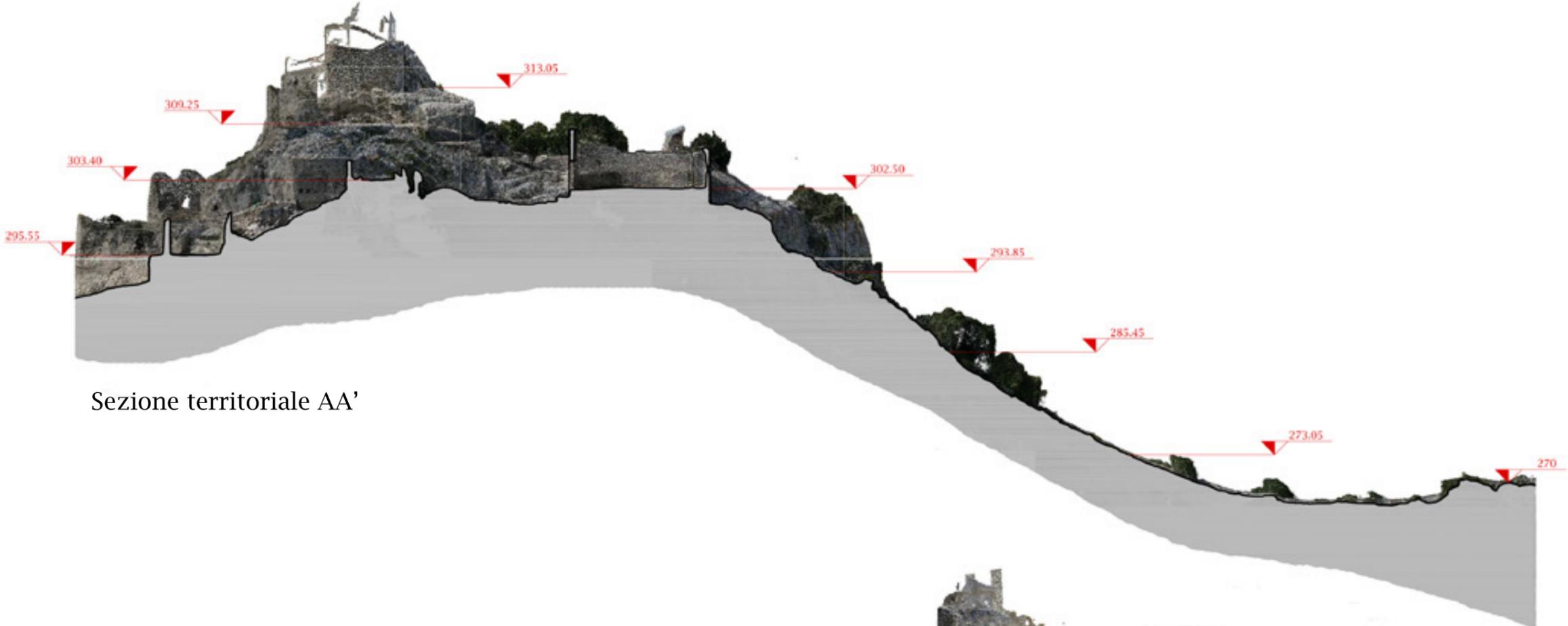
0 5 10 15 20m



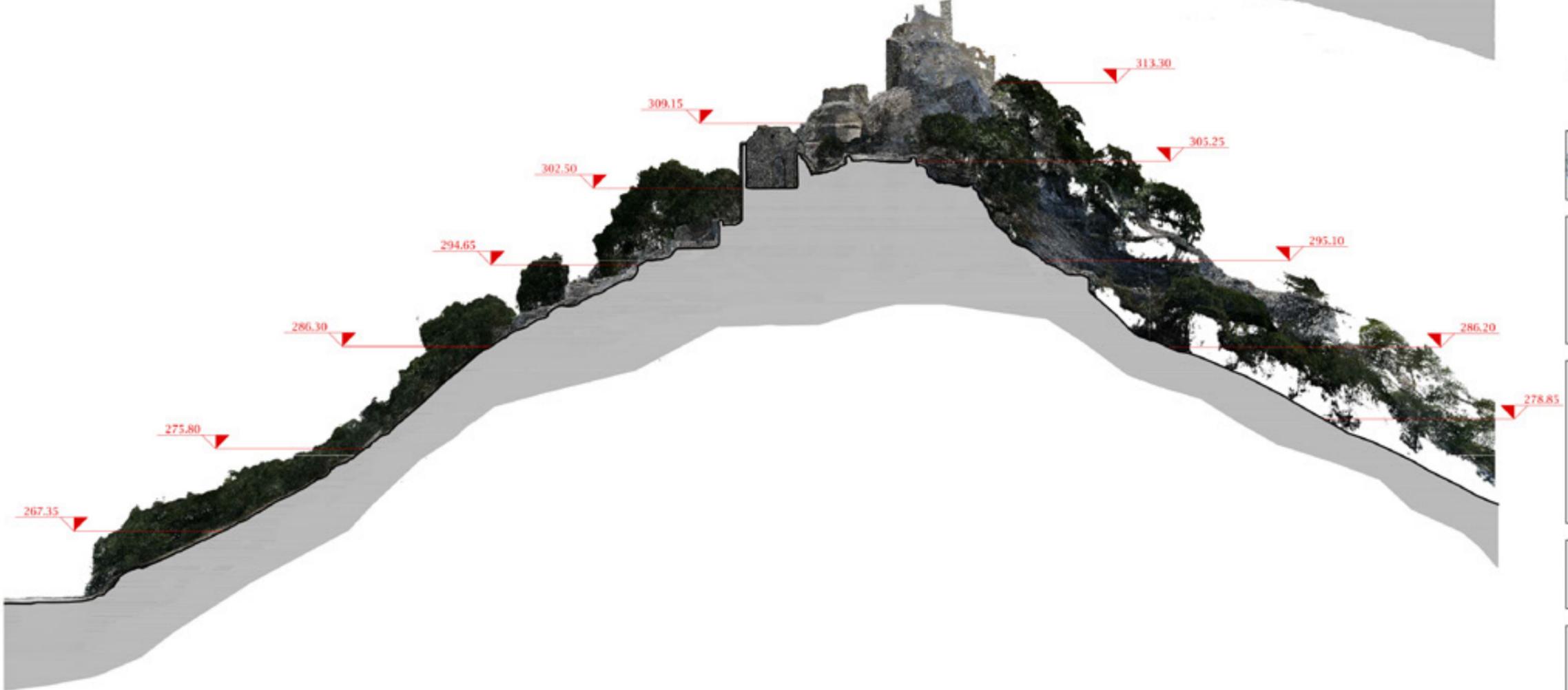
N

TAVOLA

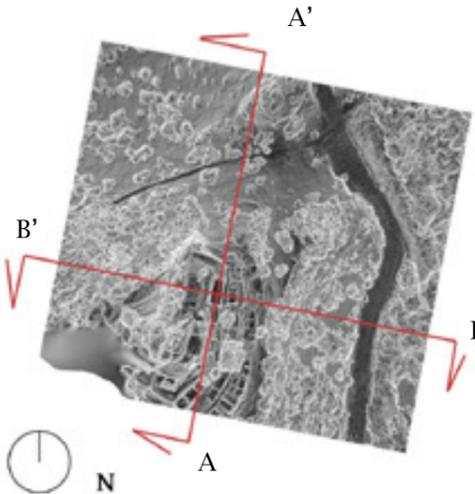
07



Sezione territoriale AA'



Sezione territoriale BB'



 **POLITECNICO DI TORINO**  
Dipartimento di Architettura e Design

**RILIEVO METRICO INTEGRATO E  
RESTITUZIONE GRAFICA DELLA  
ROCCA DI SAN SILVESTRO (LI)**

Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali

Oggetto elaborato  
**SEZIONI / scala 1:500**

Identificazione file  
Sezioni territoriali

TAVOLA

Data acquisizioni  
Settembre 2016

**08**

### 3.1.6 Riscontri e valutazioni critiche dei risultati

Con l'utilizzo dei sistemi informativi geografici è stato possibile lo studio e l'approfondimento territoriale dell'area del Parco Archeominerario di San Silvestro, includendo *dataset* provenienti da differenti lavori sviluppati precedentemente e derivanti dalle risorse di banche dati disponibili on line. Il vantaggio principale nell'operare in ambiente GIS è la notevole flessibilità nel raccogliere ed organizzare dati all'ottenimento di risultati grafico numerici su cui poter condurre indagini ed analisi del sito o del ben in questione.

Un'altra caratteristica fondamentale è la georeferenziazione che permette di includere dati enormemente differenti in termini di tematiche, in un unico sistema di riferimento. In questo lavoro è stata riscontrata un'ottima correlazione tra i dati raccolti *on line* e i dati ottenuti dai rilievi del 2016 dal Team Direct e, dalle successive elaborazioni, nello specifico i risultati ottenuti dal volo ebee, elaborati da E. Colucci e, dal lavoro comune tra il Politecnico di Torino e la Società Parchi Val di Cornia. Questa importante caratteristica di mantenere in un unico sistema di riferimento un numero sempre crescente di informazioni, tematizzandole e descrivendole, permette un metodo di lavoro aggiornabile nel tempo, rivisitabile con la possibilità di migliorarlo e approfondirlo.

Il raggruppamento di una moltitudine di informazioni in un unico *dataset* permette inoltre lo sviluppo di analisi mirate, controllando le differenti caratteristiche e le loro relazioni.

Per quanto riguarda lo sviluppo di elaborati architettonici come ortofoto e sezioni territoriali della Rocca di San Silvestro e nello specifico della Chiesa e del colle sulla quale sorge, può essere un importante strumento di supporto per le équipes di geologi, ingegneri strutturali e restauratori, che da molti anni conducono una serie di interventi mirati al consolidamento statico del sito archeologico. Questi rilievi possono fornire importanti informazioni sui comportamenti morfologici del colle e dei possibili interventi futuri su di esso.

Inoltre questa fase di studio può fornire informazioni sullo stato di fatto della Chiesa alla comunità dei restauratori, come primo *step* per una possibile serie di interventi di rilievo e monitoraggio col passare del tempo, degli stati di fatto e degli interventi di recupero.



### **3.2 Caso studio: Cappellone della Basilica di San Nicola a Tolentino**

Il secondo caso studio analizzato è il Cappellone della Basilica di San Nicola in Tolentino, in provincia di Macerata. Anche in questo caso, gli interventi di rilievo sono stati eseguiti dal Team Direct durante la missione che ha avuto luogo dal 20 al 24 febbraio. Nei giorni di permanenza in terra marchigiana è stata condotta una prima campagna di rilievo nel paese di San Severino Marche, presso Monte Nero, concentrandosi sul Duomo Vecchio e la Torre Smeducci. La seconda campagna di rilievo, più corposa, è avvenuta nel comune di Tolentino, concentrandosi sul complesso della Basilica di San Nicola. Entrambi i siti sono stati colpiti dal sisma del centro Italia del 2016/2017; le campagne Direct infatti sono state condotte alla verifica dei potenziali danni da sisma su beni architettonici, artistici e sulle strutture.

Durante l'intera campagna sono state impiegate sia tecniche fotogrammetriche terrestri che UAV, che tecniche LIDAR.



Basilica e Chiostro di San Nicola in Tolentino. Fonte: Foto dell'Autore.

## La Basilica di San Nicola

*San Nicola* da Tolentino (1245-1305), fu una figura mite ma molto appassionata, dopo aver preso i voti in giovane età, nel 1275 entra a far parte dei frati eremitani di Sant'Agostino in Tolentino. Già famoso e considerato uomo di Dio per via di molti aneddoti sulla sua devota esistenza religiosa, vi rimase per trent'anni morendo agli inizi del XIV secolo e, successivamente canonizzato nel 1325.

La Basilica di San Nicola in Tolentino nacque come piccolo luogo di culto dei frati eremitani Agostiniani, come documentano fonti del 1256. L'originaria



San Nicola da Tolentino.

Fonte: <http://www.sannicoladatolentino.it/profilo-storico-di-san-nicola.html>

chiesetta dedicata a Sant'Agostino si presentava a pianta quadrata con portichetto e copertura a falde, ma, già al momento dell'arrivo di Nicola nel 1275, gli eremitani desideravano da molto tempo poter ampliare gli spazi per poter migliorare le loro funzioni, tantè che fu possibile iniziare i primi ampliamenti nel 1284 con fondi di Donna Bionda dei Franchi.

Nel 1305, all'età di sessant'anni, Nicola morì e, data l'importanza e la "fama" per le sue azioni, si destinò la vecchia chiesa a luogo della sua sepoltura. Data l'enorme affluenza di fedeli che giungevano per pregare le spoglie del frate, si affrettarono molto le opere di costruzione della nuova grande chiesa ad una navata.

La vecchia chiesa venne rimaneggiata all'attuale aspetto di *Cappellone* voltato ed affrescato da Pietro da Rimini, maestranza eccelsa del periodo. Successivamente alla beatificazione di San Nicola, il centro religioso di Tolentino aumentò di notorietà, portando sempre più pellegrini e uomini potenti a visitare le spoglie del santo.

Nei cinquant'anni tra il 1340 ed il 1390 il complesso Tolentinate si espanse ancora, con la costruzione di un chiostro, di un porticato laterale alla chiesa e, alla costruzione di edifici di ampliamento per le funzioni dei religiosi a soddisfare la necessità di ospitare le alte personalità che giungevano in visita al complesso.

La facciata della chiesa, originariamente a capanna, venne notevolmente abbellita nel 1432 su commissione di Niccolò Mauruzi, con l'inserimento di un portale d'ingresso, intervento di Nanni di Bartolo, maestranza fiorentina.

Nel 1465, la chiesa, che inizialmente doveva esser dedicata a Sant'Agostino, venne intitolata a San Nicola.

Vent'anni più tardi, gli eremitani di San Nicola vennero cacciati per lasciar posto sempre ad eremitani Agostiniani, ma appartenenti alla *congregazione osservante di Lombardia*, che successivamente non ebbero buoni rapporti con i gli abitanti del luogo, ma, durante la loro permanenza di quasi quattro secoli seppero promuovere in maniera molto efficace il culto di Tolentino e del proprio Santo.

Il XVII secolo fu un grande periodo di interventi di ampliamento e modifica per il complesso ecclesiastico.

La chiesa si presentava a navata unica con tetto a capriate lignee a vista. Tra il 1605 ed il 1628 Filippo da Firenze costruì il maestoso cassettonato

ligneo a chiusura delle capriate, su commissione di Gianbattista Visconti. Nel 1630 venne riprogettata l'intera facciata da Florindo Orlandi, in stile tardo-manierista, ma dell'intervento ne venne concluso solo l'ordine inferiore (Centro studi "Agostino Trapè", 2008).

Nel periodo tra il 1632 ed il 1634, il vecchio portico medievale venne fortemente ridotto ed il chiostro venne modificato dall'originaria pianta rettangolare, a pianta quadrata, per poter inserire le otto cappelle laterali della chiesa. Inoltre si rimosse il tetto a capriate dei corridoi del chiostro per creare spazi voltati che avrebbero sorretto le sopraelevazioni dei nuovi ambulacri, per le varie funzioni e, le camerate dei frati. Nell'ultimo decennio del '600 Giovanni Anastasi e Agostino Orsoni affrescarono i corridoi del chiostro.

Con l'arrivo di Napoleone, gli eremitani agostiniani lombardi vennero cacciati e, per un breve periodo nessuno si prese cura del complesso. Nel 1815 però con la Restaurazione, si reintrodussero gli Agostiniani Piceni, eremitani di San Nicola.

Nel 1757 Giovanni Andrea Ascani restaurò l'intera facciata e ne completò l'ordine superiore con l'inserimento del rosone e delle figure scultoree in sommità.

Nel 1926 dopo un lungo e faticoso lavoro di ricerca di padre Nicola Fusconi venne ritrovato il corpo di San Nicola e, nel 1932 si conclusero i lavori alla costruzione della Cripta che tuttora custodisce le spoglie del Santo (<http://www.sannicoladatolentino.it/vicende-storiche-e-costruttive.html>). Tra il 2016 ed il 2017, l'area è stata colpita dal terremoto del centro Italia portando significativi danni alle strutture ed alle consistenze artistiche del sito.

## Il Cappellone

L'odierno Cappellone in origine fu la chiesa di Tolentino dedicata originariamente al culto di Sant'Agostino.

Venne costruita a pianta quadrata, con copertura a falde, portichetto e tettoia di ingresso a capanna.

Con la morte di Nicola, se ne cambiò totalmente la destinazione, da luogo di funzione a luogo di sepoltura, ne venne fortemente rimaneggiata la pianta da quadrata a rettangolare, sostituita la chiusura superiore con voltone a crociera, riccamente affrescata da Pietro da Rimini.

Al centro di questo spazio si trova l'Arca lapidea e la statua policroma di San Nicola, costruite per deporvi le spoglie del Santo, ma che in realtà non le ospitarono mai. Quest'urna lapidea fu commissionata da Pietro Millini nel 1474 ed eseguita dallo scultore Francesco di Simone Ferrucci.

Questo luogo ospita il ciclo di affreschi trecenteschi in Italia più ricco e meglio conservato ai giorni nostri.

Gli affreschi si suddividono in tre ordini principali, più le volte, anch'esse affrescate, con descrizioni cicliche e puntuali di differenti momenti della vita di Nicola, di Gesù e di avvenimenti storico-religiosi.

Al primo ordine sono raffigurate tutte le vicende della vita di San Nicola, dalla nascita e l'istruzione, sino ai numerosi eventi miracolosi avvenuti durante la sua vita, il ciclo viene interrotto dalla raffigurazione della crocifissione di Gesù nell'area centrale dell'altarino sulla parete di Nord-Est (Degli Azzi Vitelleschi, 1934).

Al secondo ordine troviamo un susseguirsi di scene storico-religiose, dalla strage degli innocenti da parte di Erode, la pentecoste, la discesa al Limbo e le Marie al sepolcro nel momento dell'ascensione, l'ingresso di Gesù a Gerusalemme e l'orazione nell'orto, le nozze di Cana, il ritorno a Nazareth e la disputa con i dottori.

Il terzo ordine sulle lunette rappresenta la presentazione di Gesù al tempio, la natività e la visitazione dei Magi, la Dormitio Virginis ed infine l'Annunciazione.

Sugli Spicchi delle volte, infine, sono raffigurate le quattro figure evangeliste Matteo, Luca, Giovanni e Marco affiancati ai quattro dottori della chiesa tra cui Sant'Agostino, intenti a scrivere volumi secondo i canoni evangelici (Centro studi "Agostino Trapè", 1992).



Interni affrescati del Cappellone di San Nicola in Tolentino  
Fonte: [https://it.wikipedia.org/wiki/Maestro\\_di\\_Tolentino](https://it.wikipedia.org/wiki/Maestro_di_Tolentino)

### 3.2.1 Fotogrammetria Terrestre

In questo caso studio viene approfondito l'approccio del rilievo fotogrammetrico terrestre sugli interni del Cappellone della Basilica di San Nicola. L'interesse preponderante dell'utilizzo di questa tecnica è la componente radiometrica del oggetto. Questo metodo permette di mettere in luce le consistenze materiche costruttive, i degradi del tempo e del sisma, come l'importante ciclo di affreschi trecenteschi rappresentati. La fotogrammetria si presta molto al rilievo *close-range* di interni, purchè vi siano le adeguate condizioni di luminosità ad assicurare una corretta qualità fotografica.

### 3.2.2 Strumentazione Utilizzata

Per il rilievo fotogrammetrico degli interni del Cappellone è stata impiegata una fotocamera Nikon D800E equipaggiata con obiettivo Nikon da 24 mm.

Inoltre si è fatto uso di treppiede per stazionare la fotocamera e, di luci fotografiche al *neon* per ovviare alla bassa luminosità del luogo chiuso.



Fotocamera Nikon D800E.

Fonte: [https://kenrockwell.com/nikon/d800/d800e/D3S\\_8282-d800e-1200.jpg](https://kenrockwell.com/nikon/d800/d800e/D3S_8282-d800e-1200.jpg)

### Caratteristiche Fotocamera

Fotocamera	Nikon D800E
Distanza focale	24 mm
Dimensione pixel sensore	4,89 $\mu\text{m}$
Risoluzione immagine	4912x7360 px

### 3.2.3 Intervento sul campo e metodo applicativo

Come nel precedente lavoro esposto, il primo passaggio importante è stato la definizione del sistema topografico, su cui ci si è successivamente appoggiati per georiferire gli elaborati.

Sono stati dapprima misurati con sistema GNSS in modalità statica, cinque punti a terra nell'intorno della Basilica e uno all'interno del chiostro. Inoltre, è stato necessario misurare una rete poligonale aperta con stazione totale, legata alle coordinate GNSS, con vertici esterni ed interni alla Basilica, per poter meglio distribuire sugli alzati interni e nelle piazze esterne i punti di controllo, sempre tramite stazione (Costanzo et al, 2017).

Nel complesso sono stati misurati sei vertici con sistema GNSS e cinque con stazione totale.

Per la misurazione dei punti con sistema GNSS sono stati utilizzati gli strumenti Leica 1203+ e Geomax Zenit 35, appoggiandosi alle costellazioni GPS, GLONASS e Beidou.

Per la registrazione dei punti di controllo a terra, intorno alla basilica, è stata impiegata la stazione totale con l'ausilio del prisma su palina, per via della densità del costruito intorno alla basilica, che non permetteva la visibilità sulla volta celeste di un numero sufficiente di satelliti.

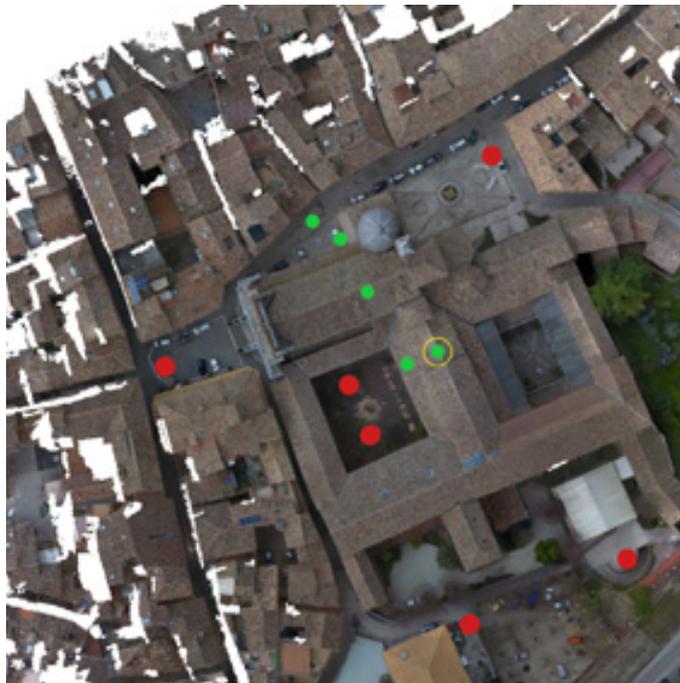
Il sistema RTK con GPS è stato impiegato, invece, solo nella zona sud del complesso per la sufficiente apertura di visuale.

Per la registrazione dei punti di controllo interni al Cappellone, ci si è appoggiati su un solo punto topografico a terra. Da qui, sono stati misurati 52 punti sulle pareti affrescate, segnalati da spigoli sulle rappresentazioni degli affreschi, o su punti materiali, come buche o degradi marcati degli intonaci facilmente identificabili. Il motivo per il quale non sono stati utilizzati marker cartacei, è dato dalla condizione delicata delle pareti interne del Cappellone, evitando quindi, l'assoluto contatto con le superfici.

Per la presa fotografica è stato necessario l'utilizzo di due luci al neon, per garantire un'adeguata luminosità degli interni e quindi massimizzare la resa dei dettagli.

Durante la fase di presa si è fatto uso di fotocamera montata su treppiede ed azionata in remoto. Le prese sono avvenute con fotocamera proiettata

orizzontalmente, nadiralmente ed inclinata di 45° verso le pareti e le volte del Cappellone, di modo da massimizzare l'overlapping.  
 Nel complesso sono state scattate 142 fotografie.



Distribuzione all'intorno e all'interno dei vertici GNSS (in rosso) e dei vertici della poligonale con stazione (in verde). In giallo, il vertice misurato all'interno del Cappellone, da cui sono stati misurati punti di controllo sugli affreschi Fonte: Foto dell'Autore

DF101; 769.2690; 342.8820; 230.8260	DF127; 768.9820; 353.8730; 234.0200
DF102; 768.7970; 343.9060; 228.3170	DF128; 770.2880; 354.4760; 232.9520
DF103; 768.3090; 345.0020; 227.5730	DF129; 777.1120; 347.0310; 226.0430
DF104; 767.9310; 345.7790; 226.5410	DF130; 775.8730; 349.6340; 226.0770
DF105; 766.9310; 348.1200; 228.2370	DF131; 774.7710; 352.0060; 225.7670
DF106; 765.3240; 351.7320; 228.2700	DF132; 773.2570; 355.2520; 226.1340
DF107; 766.3770; 349.2850; 226.0170	DF133; 773.5780; 354.4450; 228.8180
DF108; 768.5800; 344.3900; 228.8940	DF134; 775.3860; 350.5540; 228.8200
DF109; 767.6850; 346.4500; 229.4720	DF135; 777.1720; 346.7460; 228.8340
DF110; 767.0390; 347.9230; 229.3850	DF136; 777.4820; 346.0590; 230.1960
DF111; 766.4010; 349.3600; 230.1230	DF137; 775.4270; 350.4570; 230.4180
DF112; 766.0240; 350.2190; 230.9040	DF138; 773.9120; 353.6950; 231.7760
DF113; 766.1680; 349.9230; 232.5950	DF139; 774.5150; 352.4300; 232.7100
DF114; 767.2640; 347.4070; 233.5890	DF140; 775.7840; 349.7480; 232.4980
DF115; 768.2160; 345.2520; 233.7880	DF141; 775.2200; 350.9720; 234.0820
DF116; 768.6440; 344.2920; 232.1710	DF142; 777.4740; 345.1730; 226.0460
DF117; 772.1010; 355.3550; 228.2820	DF143; 772.9960; 343.1150; 226.0440
DF118; 770.8230; 354.7870; 226.8170	DF144; 769.9890; 341.7030; 226.0570
DF119; 768.9030; 353.9070; 228.0770	DF145; 770.2660; 341.8750; 228.9260
DF120; 766.6590; 352.8860; 228.8160	DF146; 773.7920; 343.5220; 228.8920
DF121; 770.2550; 354.5010; 228.8070	DF147; 776.1750; 344.6210; 228.8720
DF122; 771.6880; 355.1270; 230.7680	DF148; 775.6000; 344.3620; 230.5320
DF123; 770.6590; 354.6630; 230.4430	DF149; 773.6860; 343.4680; 230.9250
DF124; 769.0350; 353.9280; 230.9090	DF150; 770.1050; 341.8250; 230.0430
DF125; 767.2270; 353.1180; 230.2040	DF151; 773.3950; 343.3060; 232.6940
DF126; 767.7680; 353.3390; 233.0340	DF152; 774.4150; 343.7750; 233.5990

Tabella di coordinate dei 52 punti misurati all'interno del Cappellone. Fonte: Calcoli

### 3.2.4 Elaborazioni

Una volta in laboratorio vengono selezionate le immagini utili alla creazione del modello fotogrammetrico, scartando quelle ridondanti o con pessime caratteristiche di esposizione luminosa, difficilmente correggibili. In seguito si è passati al miglioramento grafico delle immagini con difetti che avrebbero creato problemi al software o semplicemente ne avrebbero diminuito la qualità finale del risultato.

Delle iniziali 142 immagini, al processo fotogrammetrico ne sono servite 102.

Come per il caso studio di San Silvestro, anche per il Cappellone è stato utilizzato il software Agisoft Photoscan. Per questa elaborazione è bastata la creazione di un'unica area di lavoro (chunk).

Come prima passaggio si sono importate le immagini sul software ed è stata effettuata la prima fase di allineamento in modalità *high*. Il programma ha allineato tutte le immagini e ha generato una nuvola rada di 1.447.582 punti.

Successivamente si è passati all'inserimento delle coordinate dei punti di controllo in formato .csv e all'assegnazione dei marker oggetto sulle immagini. Come per aree vaste, anche per oggetti di ridotte dimensioni, l'inserimento delle coordinate deve avvenire con tre punti assegnati in maniera distribuita su diverse foto, dare una prima rototraslazione, assicurarsi che in linea di massima rispetti il corretto orientamento nel sistema di riferimento e quindi, assegnare tutti i restanti marker alle altre immagini, restringendo così la deviazione standard.

Verificato il corretto svolgimento delle procedure, si è generata la nuvola densa di punti, in modalità *high*, con un sorprendente risultato di una nuvola avente 98.160.055 punti.

La conseguente poligonizzazione dei punti della nuvola in mesh è avvenuta in modalità *high*, generando un modello geometrico di 3.225.224 punti e 6.442.048 vertici.

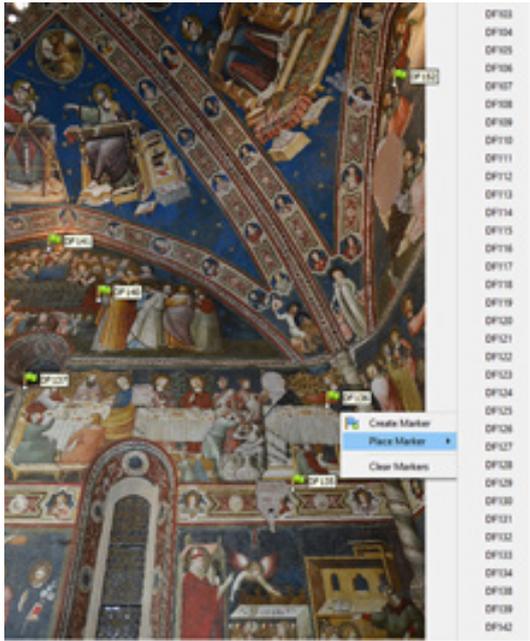
Ultima fase, la generazione della texture del modello.



A sinistra: Fotogramma della volta del Cappellone con difetti di esposizione .Fonte: Foto dell'Autore  
A destra: lo stesso fotogramma corretto radiometricamente. Fonte: Foto dell'Autore



A sinistra: Distribuzione omogenea dei Tie Points sul fotogramma. Fonte: Foto dell'Autore  
A destra: Nuvola rada del primo allineamento. Fonte: Foto dell'Autore

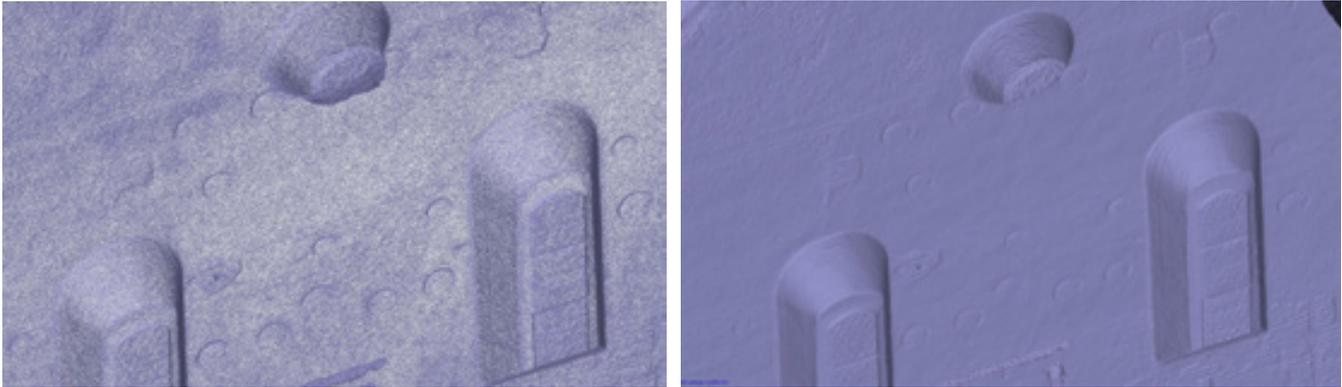


A sinistra: Inserimento dei marker sul fotogramma. Fonte: Foto dell'Autore.

A destra: rototraslazione del modello e distribuzione tridimensionale dei marker sulla nuvola rada. Fonte: Foto dell'Autore.



Nuvola di punti densa. Fonte: Foto dell'Autore.



A sinistra: Mesh in visualizzazione geometrica *Wireframe*. Fonte: Foto dell'Autore.

A destra: Mesh in visualizzazione solida. Fonte: Foto dell'Autore.

Per la rappresentazione delle mesh è necessario andare nel dettaglio, data la densità dei poligoni del modello.



Mesh texturizzata. Fonte: Foto dell'Autore.

### 3.2.5 Risultati e Rappresentazioni

Una volta esportato il report di elaborazione è possibile verificare i risultati di overlapping, calibrazione della camera e i dati risultanti dai vari processi.

Analizzando il grafico di overlapping in pianta si riscontra la completa copertura delle superfici, con aree meno dense, descritte all'esterno delle aperture, zone che comunque non sono utili al fine di questo rilievo.

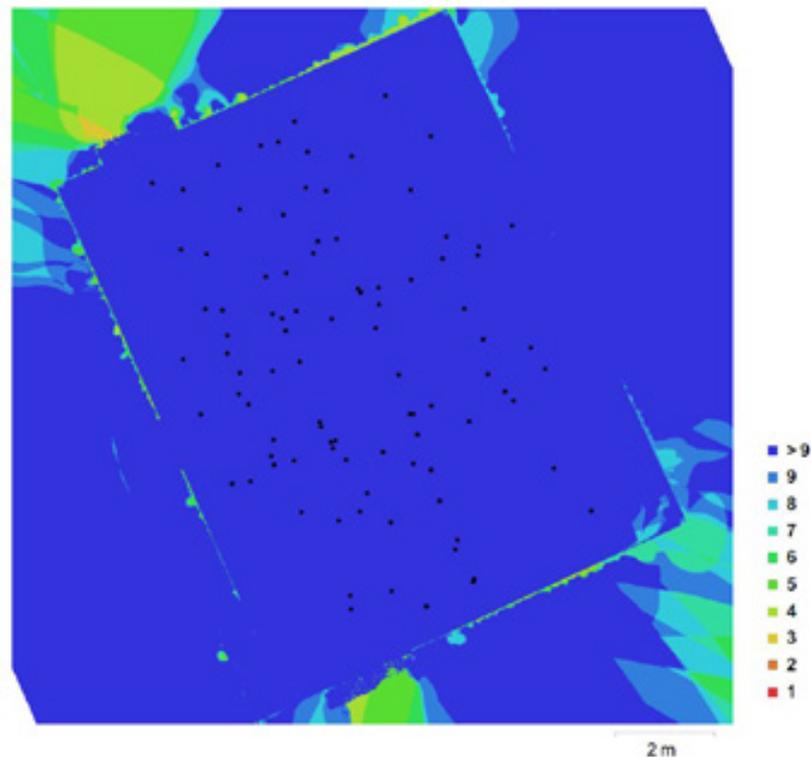


Diagramma di overlapping: Analizzando lo schema si riscontra una corretta percentuale di ricoprimento sulle superfici, andando a diminuire giustamente nelle zone oltre le aperture. Fonte: Foto dell'Autore.

#### Risultati fotogrammetrici

Distanza di presa media	6,92 m
Numero di fotogrammi	102
GSD	1,3 mm/pix
Area Coperta	241 m <sup>2</sup>
sqm	1,4 mm

Il GSD risulta essere 1,3 mm/pix, e lo scarto quadratico medio di 1,4 cm. Anche in questo caso nonostante la teoria dica che è inutile che il GSD sia minore dello sqm , i due valori più che prossimi permettono comunque un'adeguata capacità di lettura degli elementi per cui è stata accettata questa situazione.

Gli elaborati grafici sono stati restituiti in scala 1:50.

## Elaborati

Ottenuti i dati tridimensionali dal *processing* fotogrammetrico, si possono esportare file in differenti formati da poter essere in seguito elaborati. Per questo caso studio è stato necessario esportare la nuvola di punti fotogrammetrica in formato .LAS o .e57, dove è stata importata nel software PointCab. Questo software permette di sezionare la nuvola di punti partendo dalle tre visualizzazioni base: Pianta e due prospetti, rispettivamente in *Top*, *Front*, *Left*, per arrivare infine, alla produzione di piante, prospetti e sezioni. In PointCab, La nuvola importata mantiene il sistema di coordinate.

Avvenute le opportune sezioni si generano file contenenti dati relativi alla linea di sezione e dell'area antistante proiettata sul piano.

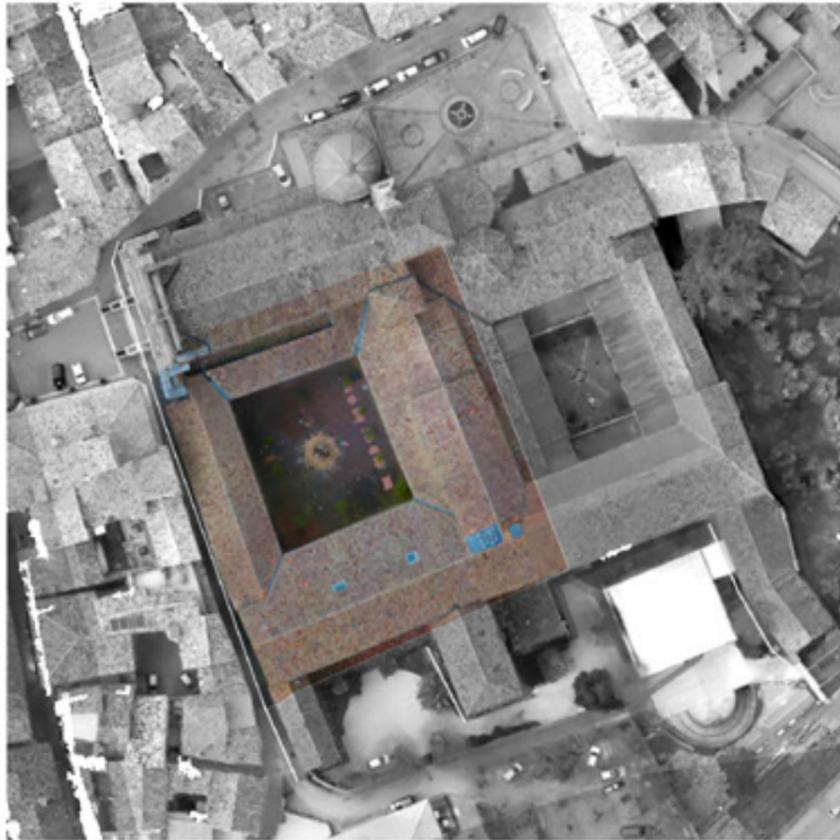
In automatico il software produce file Autodesk AutoCAD e file raster con le relative coordinate.

Con la generazione di file .DWG è possibile disegnare al tratto le caratteristiche morfologiche del manufatto in scala.

Questo passaggio è stato fondamentale allo studio e all'approfondimento dell'analisi dei degradi materici degli affreschi interni al Cappellone, rappresentandone le consistenze in opportuni elaborati in scala 1:50. Di seguito sono rappresentate le sezioni, i prospetti interni delle pareti affrescate e la pianta delle volte, con le caratteristiche cromatiche delle murature proiettando l'ortotimmagine di riferimento, associate alla rappresentazione dei degradi.

Lo sviluppo degli elaborati 3D è stato supportato dal materiale precedentemente prodotto sia nell'ambito del workshop di "fotogrammetria e Scansioni 3D" del Politecnico di Torino nell'a.a. 201-2017, che da dataset provenienti dal report dei lavori di rilievo e dal monitoraggio strutturale post-sisma, svolto dai docenti del Politecnico di Torino per la conferenza nazionale ASITA 2018.

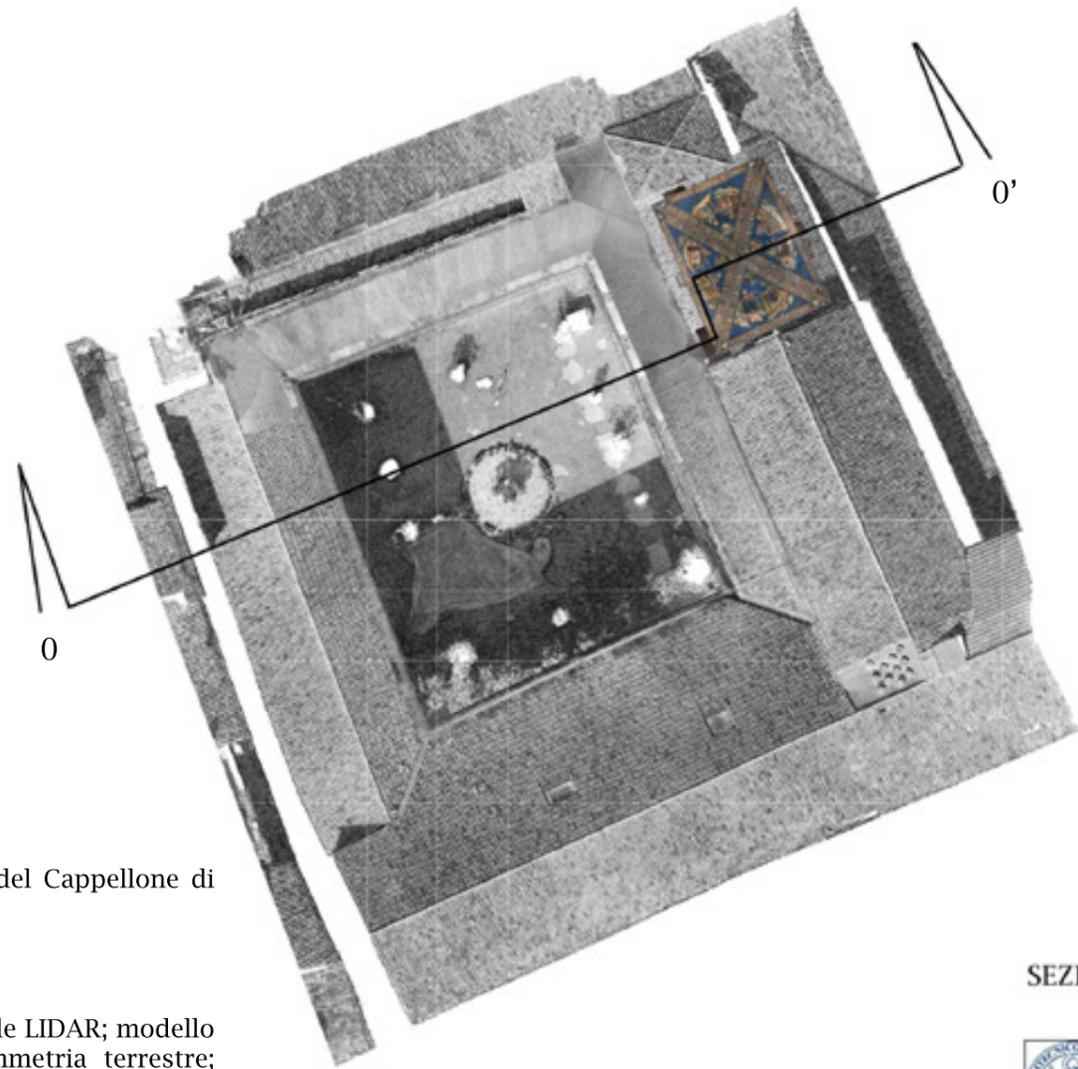
Sezione trasversale del complesso della Basilica di San Nicola in Tolentino,  
 Fonte: elaborazioni: Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali del Politecnico di Torino;  
 elaborazioni: Workshop "Fotogrammetria e Scansioni 3D" a.a. 2016-2017.



1. Basilica e Chiostro di San Nicola in Tolentino

Scala 1:1000

Ortofoto ottenuta da modello 3D da UAV, rilievi Team Direct febb. 2017.



2. Georeferenziazione del modello 3D del Cappellone nel Chiostro del complesso della Basilica di San Nicola in Tolentino.

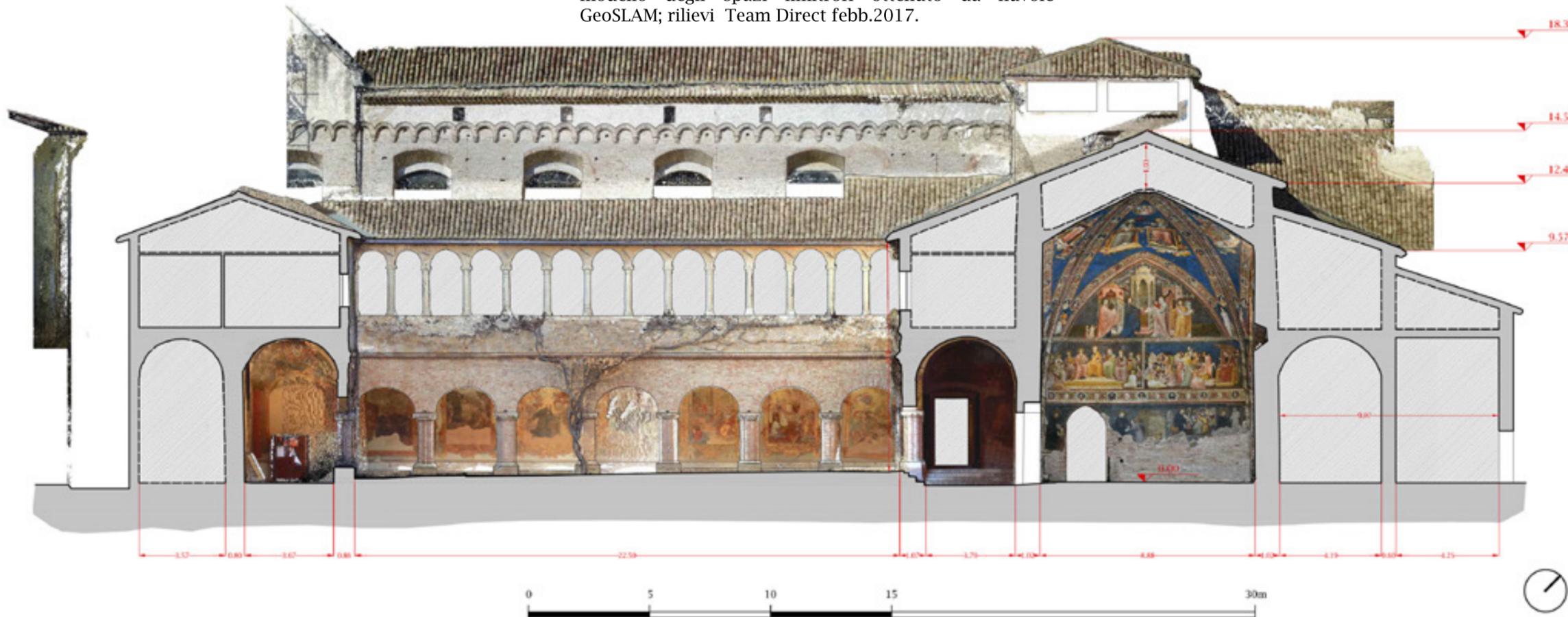
Scala 1:500

Modello Cappellone ottenuto da fotogrammetria terrestre;  
 Modello del complesso ottenuto da voli UAV; rilievi Team Direct febb. 2017.

3. Georeferenziazione del Chiostro e del Cappellone di San Nicola in Tolentino

Sezione Scala 1:200

Modello del Chiostro ottenuto da nuvole LIDAR; modello del Cappellone ottenuto da fotogrammetria terrestre; modello degli spazi limitrofi ottenuto da nuvole GeoSLAM; rilievi Team Direct febb.2017.



SEZIONE 0-0'



RILIEVO METRICO INTEGRATO E RESTITUZIONE GRAFICA DEL CAPPELLONE DI SAN NICOLA IN TOLENTINO (MC)

Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali

Oggetto elaborato  
 SEZIONI / scala 1:200

Identificazione file  
 Sezione 0

TAVOLA  
 09

Data acquisizioni  
 Febbraio 2017



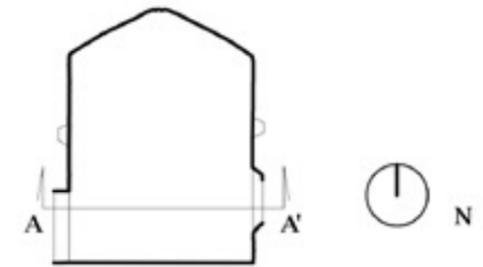
Sezione architettonica con immagine ortoproiettata

SEZIONE A-A'



LEGENDA

- Sezionato
- - - Sezionato ipotizzato
- Muratura proiettata
- Impiasto decorativo in proiezione
- - - Proiezione oggetti non in vista
- Degradi
- Decorazioni di gesso in bassorilievo



RILIEVO METRICO INTEGRATO E  
RESTITUZIONE GRAFICA DEL  
CAPPELLONE DI SAN NICOLA IN  
TOLENTINO (MC)

Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali

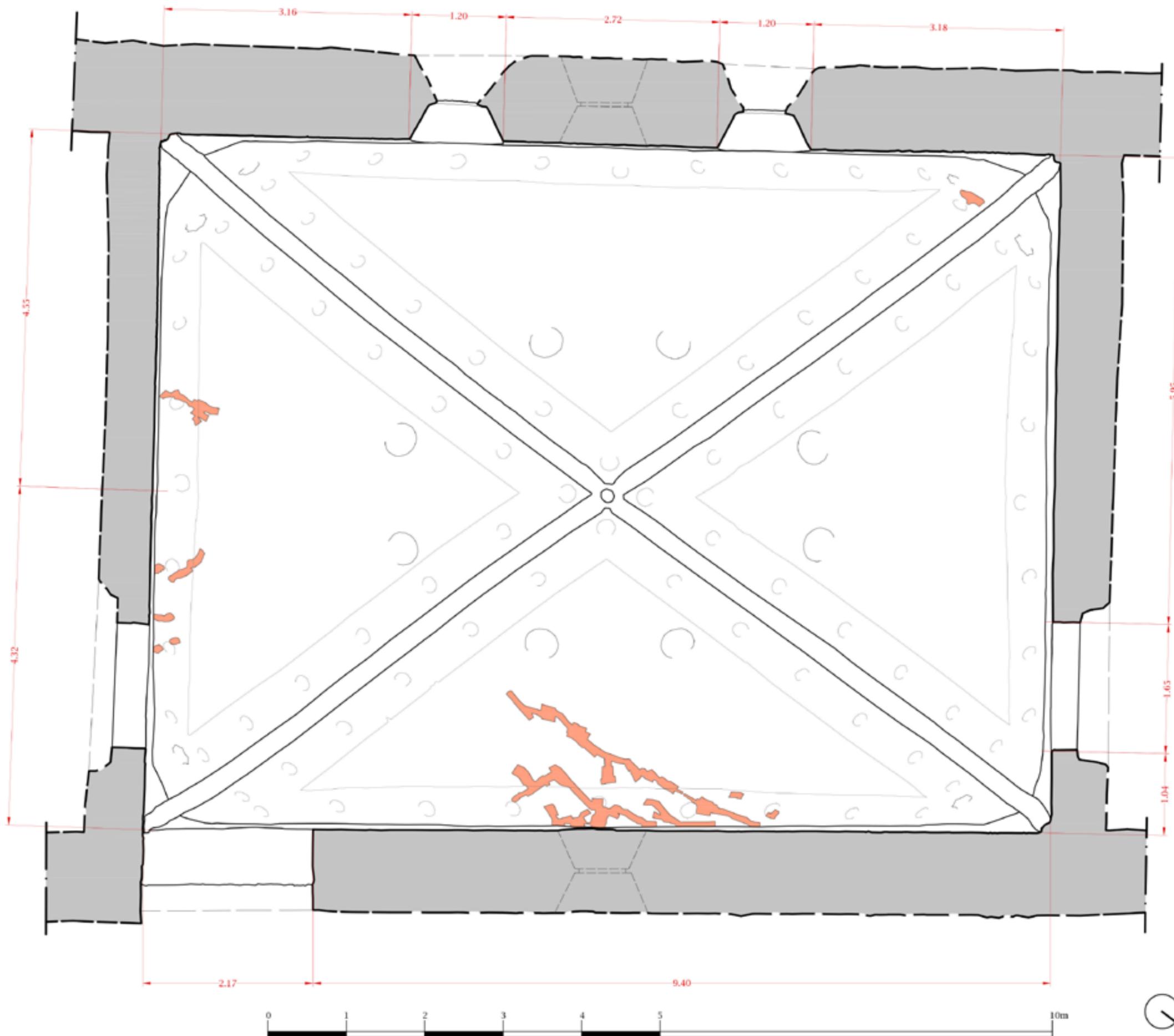
Oggetto elaborato  
SEZIONI / scala 1:50

Identificazione file  
Sezione A  
Pianta rovescia delle volte

Data acquisizioni  
Febbraio 2017

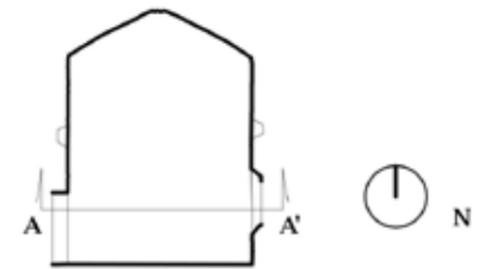
TAVOLA  
**10**

Sezione architettonica dei degradi  
SEZIONE A-A'



LEGENDA

-  Interventi contenitivi distacco affreschi (adesivi)
-  Decorazioni di gesso in bassorilievo



 **POLITECNICO DI TORINO**  
Dipartimento di Architettura e Design

RILIEVO METRICO INTEGRATO E  
RESTITUZIONE GRAFICA DEL  
CAPPELLONE DI SAN NICOLA IN  
TOLENTINO (MC)

Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali

Oggetto elaborato  
**SEZIONI / scala 1:50**

Identificazione file  
Sezione A  
Pianta rovescia delle volte

Data acquisizioni  
Febbraio 2017

TAVOLA

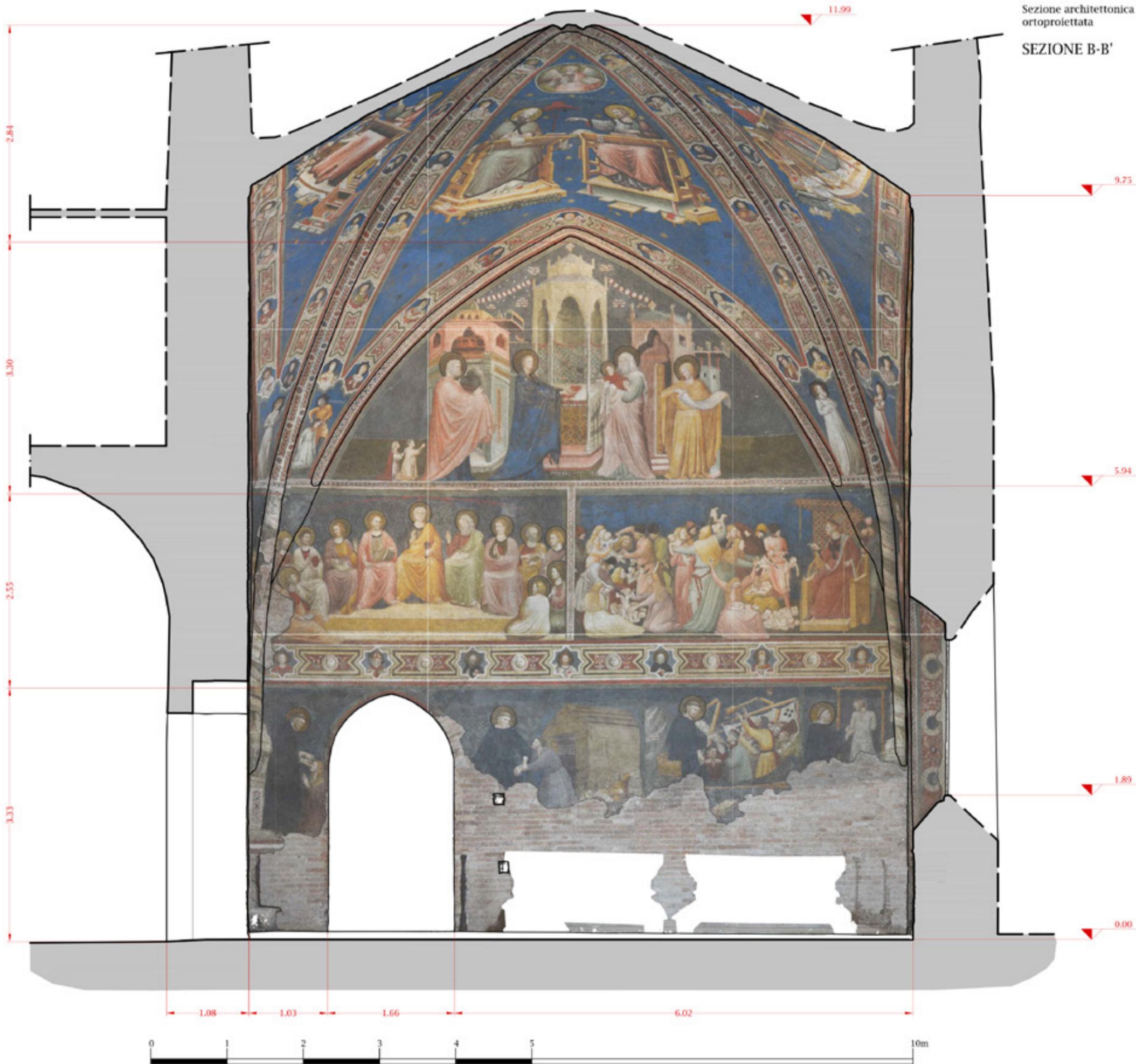
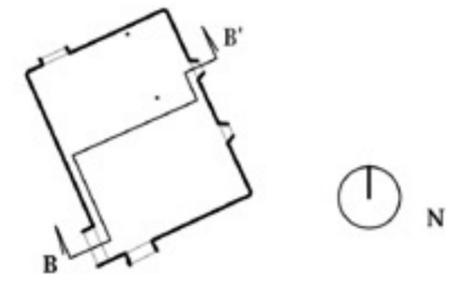
**11**

Sezione architettonica con immagine ortoproiettata

SEZIONE B-B'

LEGENDA

- Sezionato
- - - Sezionato ipotizzato
- Muratura in proiezione
- Impianto decorativo in proiezione
- Degradi
- Decorazioni di gesso in bassorilievo
- ▼ Quote altimetriche



 **POLITECNICO DI TORINO**  
Dipartimento di Architettura e Design

**RILIEVO METRICO INTEGRATO E RESTITUZIONE GRAFICA DEL CAPPELLONE DI SAN NICOLA IN TOLENTINO (MC)**

Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali

Oggetto elaborato  
**SEZIONI / scala 1:50**

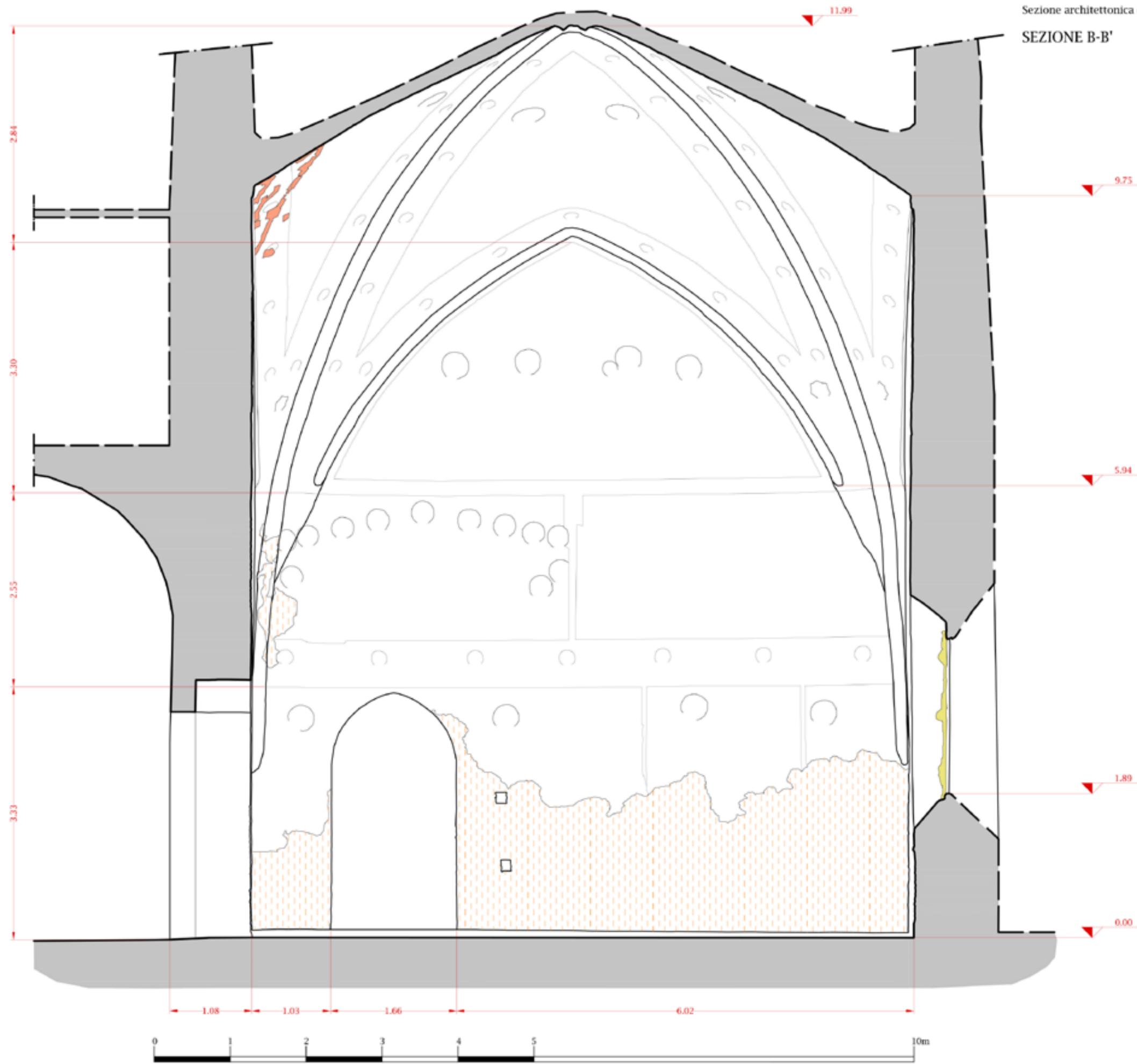
Identificazione file  
Sezione B

Data acquisizioni  
Febbraio 2017

TAVOLA  
**12**

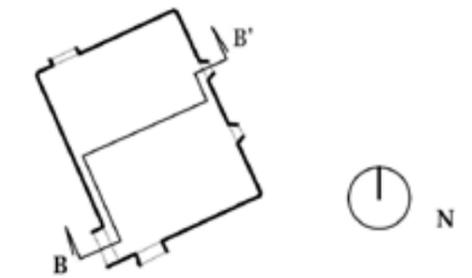


Sezione architettonica dei degradi  
SEZIONE B-B'



LEGENDA

-  Distacco
-  Interventi contenitivi distacco affreschi (adesivi)
-  Tamponamento
-  Decorazioni di gesso in bassorilievo
-  Quote altimetriche



 **POLITECNICO DI TORINO**  
Dipartimento di Architettura e Design

**RILIEVO METRICO INTEGRATO E  
RESTITUZIONE GRAFICA DEL  
CAPPELLONE DI SAN NICOLA IN  
TOLENTINO (MC)**

Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali

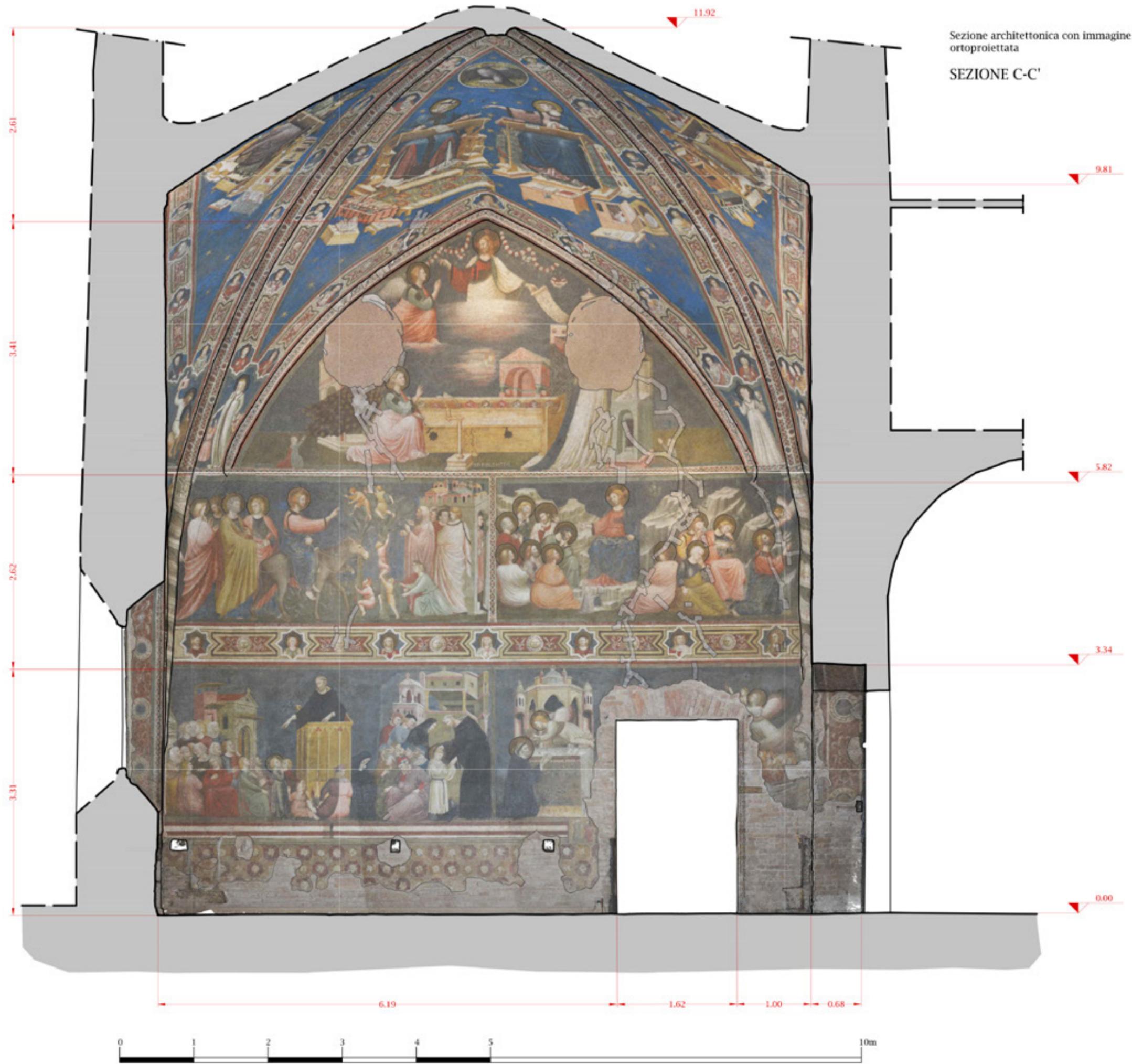
Oggetto elaborato  
**SEZIONI / scala 1:50**

Identificazione file  
Sezione B

Data acquisizioni  
Febbraio 2017

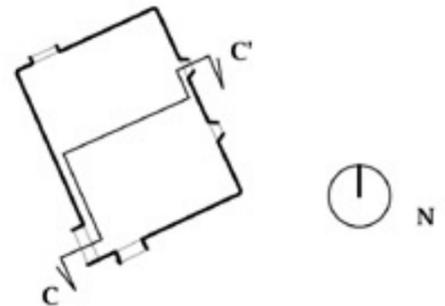
TAVOLA

**13**



Sezione architettonica con immagine ortoproiettata  
**SEZIONE C-C'**

- LEGENDA**
- Sezionato
  - - - Sezionato ipotizzato
  - Muratura in proiezione
  - Impianto decorativo in proiezione
  - Degradi
  - Buca pontata
  - Decorazioni di gesso in bassorilievo
  - ▼ Quote altimetriche



 **POLITECNICO DI TORINO**  
 Dipartimento di Architettura e Design

**RILIEVO METRICO INTEGRATO E RESTITUZIONE GRAFICA DEL CAPPELLONE DI SAN NICOLA IN TOLENTINO (MC)**

Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali

Oggetto elaborato  
**SEZIONI / scala 1:50**

Identificazione file  
 Sezione C

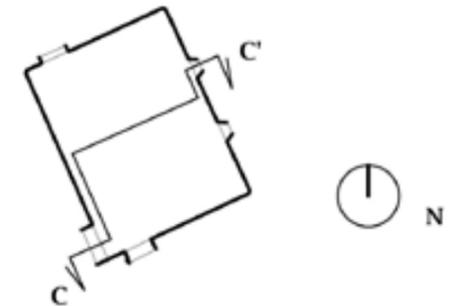
Data acquisizioni  
 Febbraio 2017

TAVOLA  
**14**



**LEGENDA**

-  Distacco
-  Interventi contenitivi distacco affreschi (adesivi)
-  Tamponamento
-  Lacune
-  Buca pontaria
-  Decorazioni di gesso in bassorilievo
-  Quote altimetriche



 **POLITECNICO DI TORINO**  
Dipartimento di Architettura e Design

**RILIEVO METRICO INTEGRATO E  
RESTITUZIONE GRAFICA DEL  
CAPPELLONE DI SAN NICOLA IN  
TOLENTINO (MC)**

Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali

Oggetto elaborato  
**SEZIONI / scala 1:50**

Identificazione file  
Sezione C

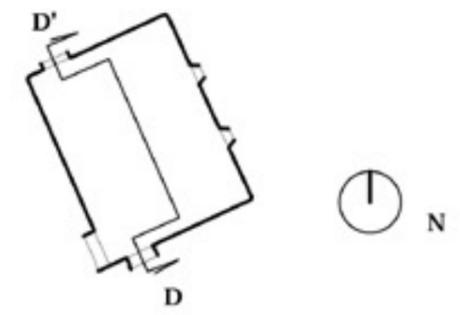
Data acquisizioni  
Febbraio 2017

TAVOLA  
**15**



**LEGENDA**

- Sezionato
- - - Sezionato ipotizzato
- Muratura in proiezione
- Impianto decorativo in proiezione
- Degradi
- Buca puntaia
- Decorazioni di gesso in bassorilievo
- ▼ Quote altimetriche



 **POLITECNICO DI TORINO**  
Dipartimento di Architettura e Design

**RILIEVO METRICO INTEGRATO E RESTITUZIONE GRAFICA DEL CAPPELLONE DI SAN NICOLA IN TOLENTINO (MC)**

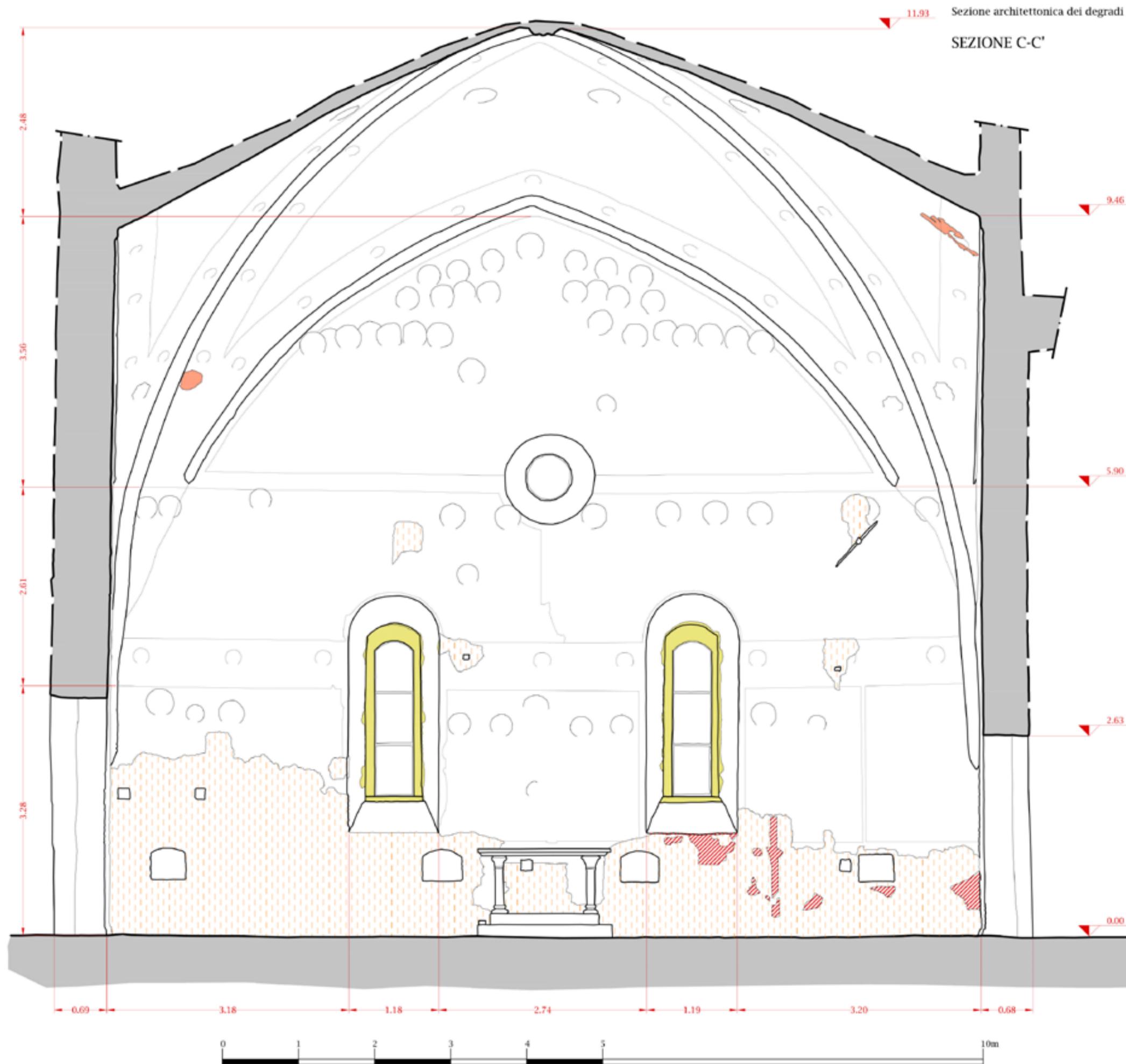
Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali

Oggetto elaborato  
**SEZIONI / scala 1:50**

Identificazione file  
Sezione D

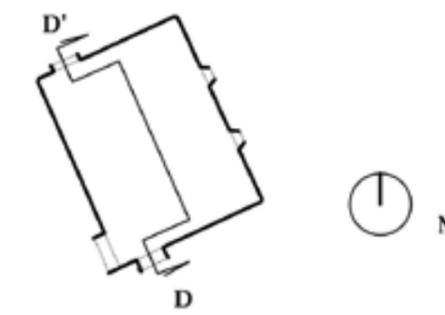
Data acquisizioni  
Febbraio 2017

TAVOLA  
**16**



**LEGENDA**

- Distacco
- Interventi contenitivi distacco affreschi (adesivi)
- Tamponamento
- Tracce di affresco
- Buca pontaià
- Decorazioni di gesso in bassorilievo
- Tirante strutturale
- Quote altimetriche



**POLITECNICO DI TORINO**  
Dipartimento di Architettura e Design

**RILIEVO METRICO INTEGRATO E  
RESTITUZIONE GRAFICA DEL  
CAPPELLONE DI SAN NICOLA IN  
TOLENTINO (MC)**

Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali

Oggetto elaborato  
**SEZIONI / scala 1:50**

Identificazione file  
Sezione D

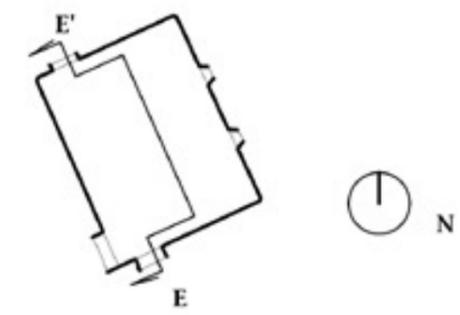
Data acquisizioni  
Febbraio 2017

TAVOLA  
**17**



LEGENDA

- Sezionato
- - - Sezionato ipotizzato
- Muratura in proiezione
- Impianto decorativo in proiezione
- Degradi
- Buca pontala
- Decorazioni di gesso in bassorilievo
- ▼ Quote altimetriche



 **POLITECNICO DI TORINO**  
Dipartimento di Architettura e Design

**RILIEVO METRICO INTEGRATO E RESTITUZIONE GRAFICA DEL CAPPELLONE DI SAN NICOLA IN TOLENTINO (MC)**

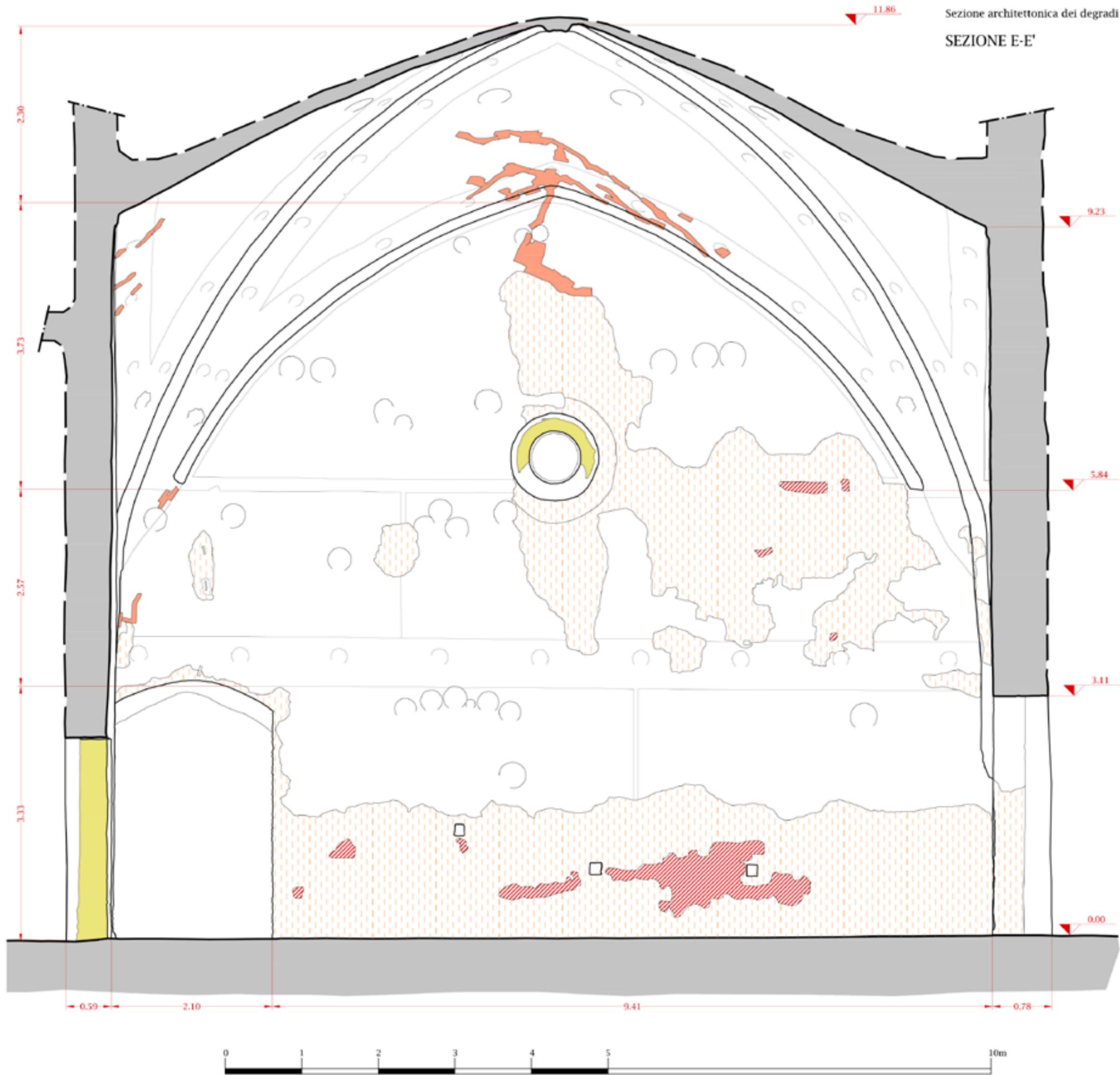
Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali

Oggetto elaborato  
**SEZIONI / scala 1:50**

Identificazione file  
Sezione E

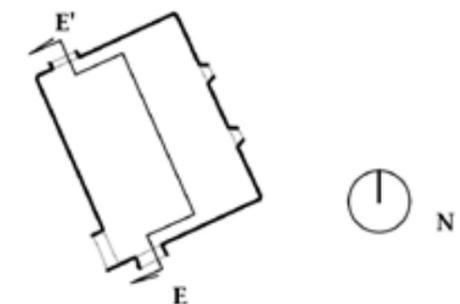
Data acquisizioni  
Febbraio 2017

TAVOLA  
**18**



**LEGENDA**

-  Distacco
-  Interventi contenitivi distacco affreschi (adesivi)
-  Tamponamento
-  Tracce di affresco
-  Buca pontiaia
-  Decorazioni di gesso in bassorilievo
-  Quote altimetriche



 **POLITECNICO DI TORINO**  
Dipartimento di Architettura e Design

**RILIEVO METRICO INTEGRATO E RESTITUZIONE GRAFICA DEL CAPPELLONE DI SAN NICOLA IN TOLENTINO (MC)**

Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali

Oggetto elaborato  
**SEZIONI / scala 1:50**

Identificazione file  
Sezione E

Data acquisizioni  
Febbraio 2017

TAVOLA  
**19**

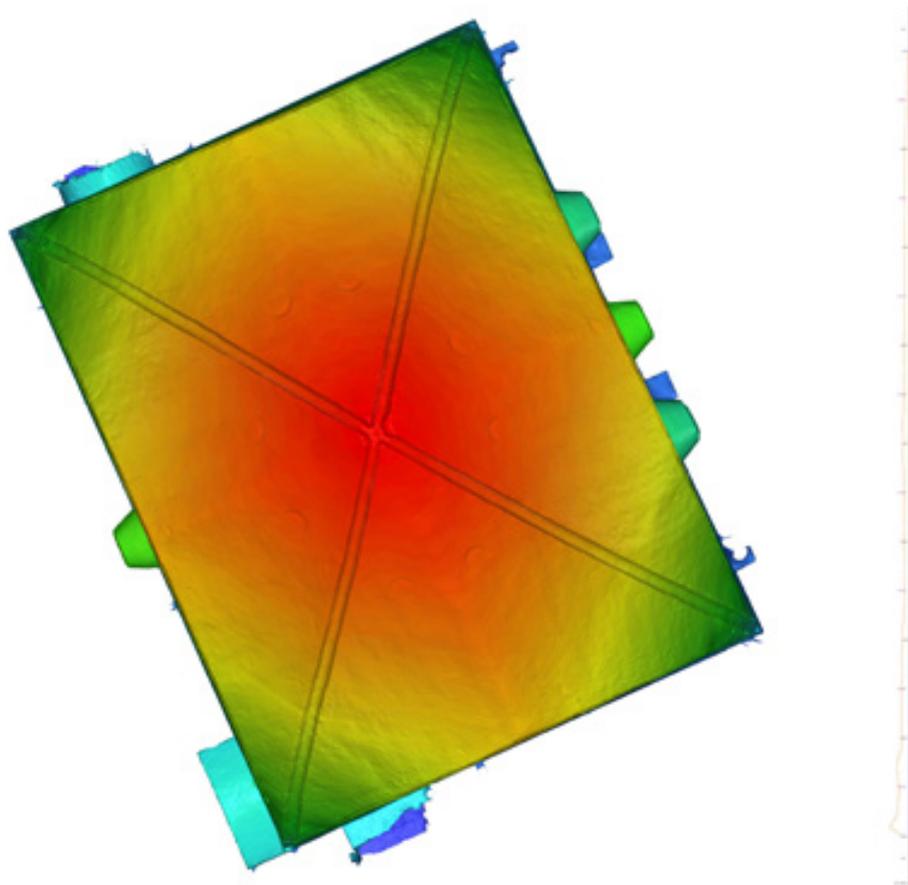
Con lo sviluppo di ortofoto da sezioni di nuvole di punti si è potuto analizzare la componente materica e dei degradi delle pareti interne del Cappellone.

Un'ulteriore analisi è stata quella degli andamenti della struttura, partendo questa volta dalla mesh texturizzata. In questo caso la mesh è stata esportata da A. Photoscan in formato .Obj ed importata in 3DReashaper. Partendo dalla visualizzazione piana della mesh si è generato il DEM (*Digital Elevation Model*) andando ad analizzare le variazioni altimetriche della volta. Queste informazioni sono visualizzabili sia in viste piane che con modello navigabile

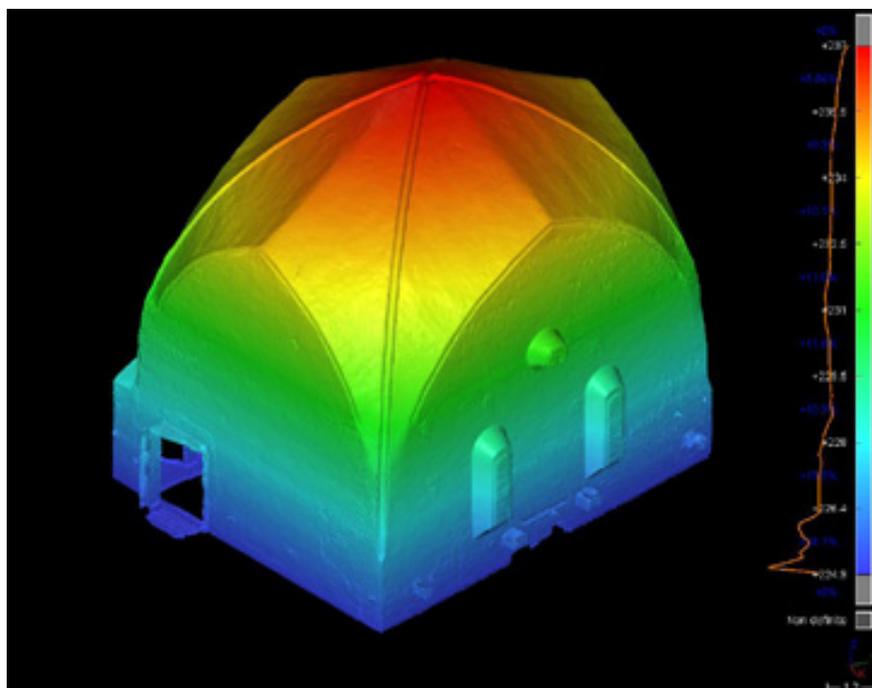
Inoltre, è stato possibile generare una sequenza di sezioni sul modello tridimensionale, generando quindi isoipse ad intervalli di 15 cm, marcando intervalli principali di assegnazione quota ogni 90 cm.



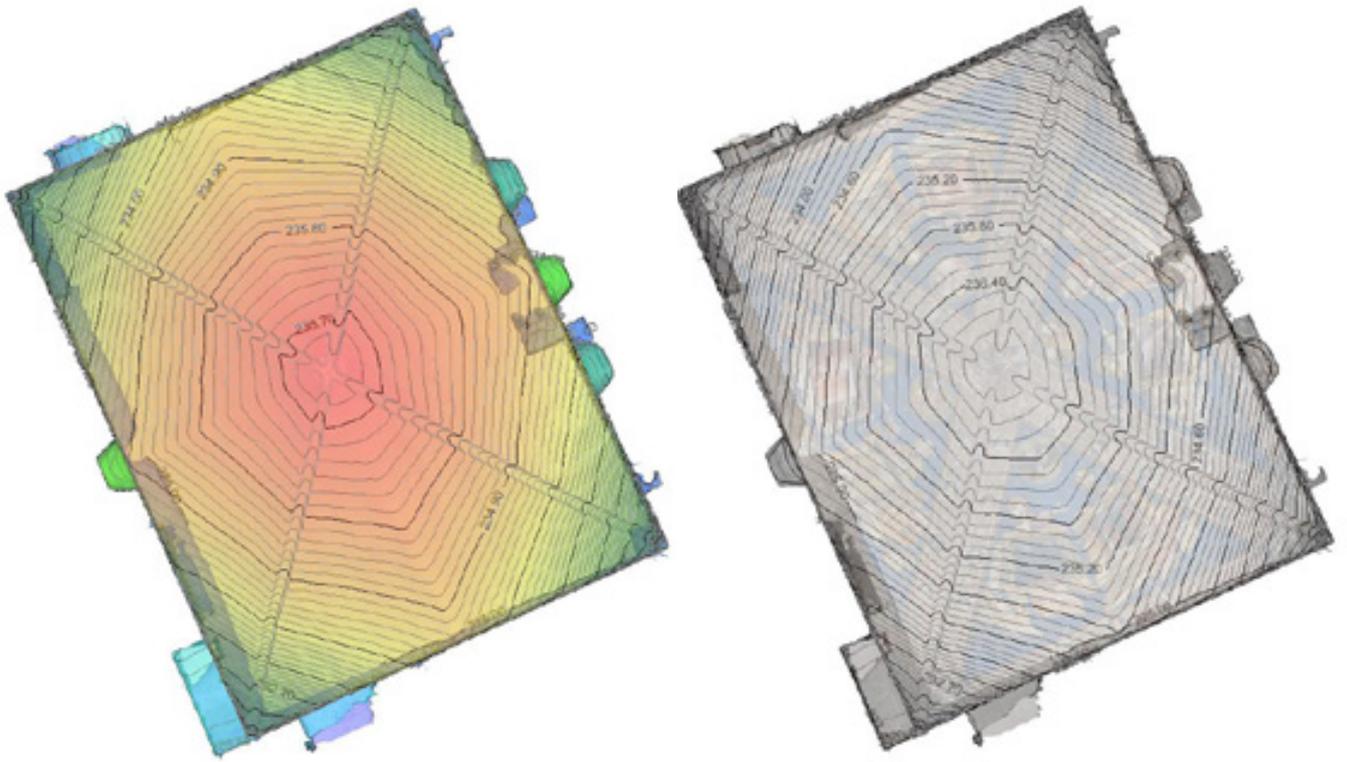
Mesh texturizzata del Cappellone, esportata per le analisi degli andamenti. Fonte: Foto dell'Autore.



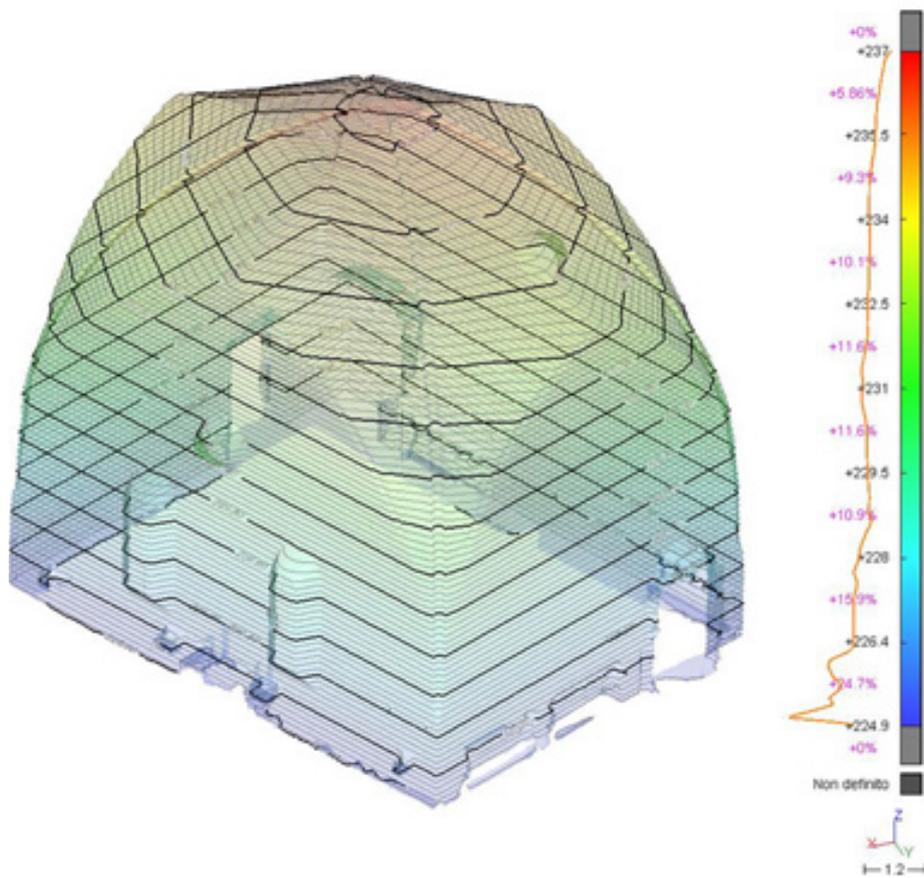
Vista planare del DEM del Cappellone. Fonte: Foto dell'Autore.



Visualizzazione dell'elaborazione DEM sul modello solido. Fonte: Foto dell'Autore.



A sinistra, visualizzazione planare del DEM e sviluppo delle curve di livello: Foto dell'Autore.  
 A destra, sviluppo delle curve altimetriche su mesh texturizzata in vista planare: Foto dell'Autore



Modello 3D DEM, rappresentazione tridimensionale dello sviluppo delle curve altimetriche.  
 Fonte: Foto dell'Autore.

### 3.2.6 Riscontri e valutazioni critiche dei risultati

Con la produzione degli elaborati grafici del Cappellone, quali piante, prospetti e sezioni, ricavati partendo dall'analisi e dallo sviluppo di nuvole di punti 3D, è stato possibile mettere in luce le caratteristiche geometriche e spaziali dell'edificio, approfondendo poi, gli elementi principali del degrado materico delle superfici affrescate.

Durante la stesura degli elaborati 2D su AutoCAD, sono stati identificati principalmente lo sviluppo in alzato di geometrie delle pareti e della volta a crociera costolonata, segnalando inoltre gli unici ma significativi apparati decorativi in bassorilievo (aureole dei santi).

Per quanto riguarda i degradi pittorici e murari sono stati identificati due importanti categorie di degrado: il deterioramento nel tempo delle superfici affrescate e, un secondo, provocato dal sisma del 2016. I primi sono conseguenza tipica della risalita capillare dell'umidità dal terreno, che ha portato al distaccamento continuo dello strato superficiale di finitura a ridosso del pavimento e delle aperture, con la conseguente esposizione dei laterizi della muratura; la riduzione della malta tra le fughe; presenza a tratti di patina biologica scura ed efflorescenze saline. Altri degradi portati dal tempo sono lacune di superficie affrescata, sia sulle pareti (come si nota sulla parete S-E) sia sulle ogive della volta.

Al fine di dare un'interpretazione più ampia possibile, sono stati segnalati gli interventi di restauro degli intonaci, in prossimità delle finestre circolari e delle monofore, segni di rimaneggiamenti agli infissi, o adeguamenti dopo il distacco degli intonaci.

Per quel che riguarda le conseguenze del sisma e dei danni portati alle pitture murarie, si sono formate diverse crepe molto sottili, in alcuni casi distribuite sulla quasi totalità delle pareti. Al momento del rilievo erano già stati effettuati interventi di contenimento del propagarsi delle rotture con l'impiego di nastri da restauro in carta. In questo caso il fine è stato quello di segnalare i nastri, avendo così poi una visione complessiva delle distribuzioni delle fratture sull'intero gruppo di superfici.

In un secondo momento, sono state eseguite indagini morfologiche sul comportamento della struttura. Partendo dal modello spaziale poligonale (mesh), da cui è stato generato un DEM, (immagine raster contenente informazioni altimetriche associate ad ogni pixel), sia in vista piana che

in 3D. L'andamento in alzato del Cappellone è rappresentato attraverso un intervallo di colori costanti. Insieme all'informazione grafica, è stato generato un diagramma numerico che mette in luce la relazione tra lo sviluppo delle superfici di muratura e l'altimetria.

Inoltre, dal modello, sono state generate isoipse ad intervalli continui costanti di 90 cm, al fine di ottenere in forma planare e tridimensionale l'andamento in alzato delle geometrie del Cappellone.

Dopo aver eseguito un controllo incrociato del DEM e delle isoipse, è stato possibile riscontrare che non vi sono comportamenti irregolari in alzato. Esaminando i differenti gruppi di *dataset* di questo caso studio, si è giunti alla conclusione che le consistenze a rischio, non riguardano le strutture ma l'apparato pittorico murario, che mostra particolari segni di fragilità e rottura data la complessa e allo stesso tempo delicata natura.

I dati ottenuti hanno molteplici scopi: oltre a quello di analisi dello stato di fatto, permettono di essere basi di supporto ad altri attori di diverse discipline che interverranno al fine della conservazione del bene. Tra questi, la comunità dei restauratori, degli storici e degli ecclesiasti.

Un possibile impiego del materiale grafico e dei dati ottenuti, può essere inoltre fonte di documentazione e divulgazione di un luogo momentaneamente inaccessibile ad un ampio pubblico, fin quando non sarà possibile ristabilirne la piena e sicura fruibilità.



### 3.3 Caso studio: Il Paraboloide di Casale Monferrato

Il terzo e ultimo caso studio di questa tesi è il Paraboloide di Casale Monferrato, importante esempio di architettura industriale testimone della forte attività nel campo dei leganti nel Casalese.

Gli interventi qui analizzati sono stati eseguiti in due differenti momenti, il primo durante un'operazione di rilievo del 2012 che ha visto coinvolti il Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali del dipartimento di Architettura e Design del Politecnico di Torino e il Comune di Casale Monferrato, con l'obiettivo di fornire dati sulle caratteristiche morfologiche e del degrado della struttura. Il secondo intervento è avvenuto nel luglio del 2017, sempre per i medesimi attori, in cui sono stati implementati dati di analisi.

Il primo intervento ha visto l'utilizzo del metodo LIDAR concentrandosi sull'intradosso e l'estradosso della volta del Paraboloide, durante il secondo, è stata impiegata fotogrammetria UAV esterna ed *Indoor* della volta, l'analisi delle gallerie al piano interrato con metodo fotogrammetrico terrestre e la tecnologia laser mobile SLAM.



Il Paraboloide di Casale monferrato.

Fonte: <http://www.patrimoniopubblicoitalia.it/it-it/Immobile/Dettaglio/635>.

## Il Paraboloide di Casale Monferrato

Testimonianze antiche sull'estrazione di calce aeree e materiali per leganti sono presenti già dal II secolo d.C., ma è dal 1590 con la costruzione della Cittadella di Casale da parte del Duca Vincenzo I Gonzaga che architetti come Sebastiano Le Preste, visitando l'opera appena compiuta confermarono la propria volontà di utilizzare le calce del Monferrato o materiali più simili possibili nelle costruzioni.

Ulteriori testimonianze dell'impiego delle pregiate calce del Casalese provengono dal periodo Napoleonico con le costruzioni fortificate di Casale ed Alessandria e, con la costruzione della rete ferroviaria del Regno di Sardegna nel 1845.

Dalla metà dell'800 numerosi interventi di ricerca di cave per l'estrazione di materiali per calce idrauliche, posero le basi per l'immenso sviluppo industriale del Monferrato per il successivo secolo (Rossi, Rossino, 2010).

Dal 1870 i produttori di calce del Monferrato, per contrastare la concorrenza Francese di Grenoble e di Bergamo istituirono la "*Società di Casale Monferrato per la Cottura di calce Idraulica*"<sup>36</sup>.

Questi scaltri imprenditori, studiarono le tecniche della produzione del Portland con metodi meno costosi, così da superare i concorrenti francesi e lombardi nel giro di pochissimi anni.

Nel 1873 la società sopra citata venne trasformata in "*Società Anonima Calce e Cementi*"<sup>37</sup>, ampliando la produzione e gli stabilimenti con la costruzione del moderno stabilimento Robatti in Piazza D'Armi. Tra questi imprenditori si ricordano principalmente Luigi Marchino, Giuseppe Cerrano, i fratelli Sosso e Luigi Musso.

La vera esplosione delle attività di produzione dei cementi fu all'inizio del '900, con l'arrivo di molti imprenditori interessati agli affari del cemento (tra i quali i fratelli Buzzi, il Senatore Giovanni Agnelli, Pietro Fenoglio e Giovanni Antonio Porcheddu) e, grazie anche alla costruzione delle linee ferroviarie Casale-Asti e Casale-Torino dal 1885 al 1887. Questo forte binomio ferrovia e industria, oltre a ridisegnare l'aspetto urbano andando ad incidere sulla forma delle città, favorì anche l'ampliamento e

---

36 Rossi, Rossino, Appunti di storia dell'industria dei leganti nel Monferrato, Associazione, 2010, cit. p. 2.

37 Rossi, Rossino, 2010, cit. p.2.

lo sviluppo delle piccole città limitrofe. Questo fu il periodo pionieristico dei cementi nel Monferrato.

Sul Territorio si diffuse un enorme numero di manufatti industriali destinati allo stoccaggio, trasporto e produzione e cottura dei cementi e altri leganti.

Con il rapido esaurimento degli affioramenti naturali di marne calcaree, vi fu un susseguirsi di migliorie tecnologiche alla formazione delle miscele del clinker, spinto da necessità prettamente economiche e dalla specializzazione dei cementi, tanto da portare il monferrino ad un'epoca di grande sviluppo industriale moderno.

Con la diffusione sul territorio delle attività produttive ci furono importanti sviluppi e traguardi a livello economico e sociale, con le regolamentazioni del 1907 dell'industria dei leganti.

Il settore dei cementi crebbe sempre di più, con il suo massimo splendore nel primo dopoguerra, ma durante gli anni '30, il settore entrò in sovrapproduzione ed iniziò una crisi per un calo dei prezzi di vendita, portando le piccole fabbriche ad essere assorbite dalle grosse società.

La crisi economica e l'impossibilità quindi di crescita e ammodernamento tecnologico, spinse il sistema industriale del casalese ad un continuo trend di fusioni e assorbimenti di aziende e società.

Con l'entrata dell'Italia nel secondo conflitto mondiale, il settore cementifero crollò definitivamente, dopo i grandi apici produttivi degli anni '30, andando definitivamente al collasso negli anni '50 dove l'estrazione e l'uso delle marne non era più sostenibile economicamente e si iniziò a produrre cemento in maniera artificiale.

Con la fine del settore cementifero, sul territorio del Monferrato rimangono tuttora un gran numero di strutture di rilevante interesse nell'ambito dell'archeologia industriale, tra questi vi è il Paraboloide, oggetto di questo studio, sito in Via Visconti, costruito agli inizi degli anni '30 dalla Italcementi, nell'area del vecchio stabilimento Robatti, come silo orizzontale di stoccaggio e miscela dei componenti del clinker (Saccocci, 2012).

Questo edificio venne progettato dall'ingegnere Luigi Radici, definendo questa particolare forma sia per necessità strutturali, che per ragioni politiche, dimostrando l'efficacia e le possibilità date dal cemento armato.

La struttura si compone di una campata unica costolonata da 8 archi in c.a. a sezione rettangolare discontinua, inspessendosi in prossimità degli appoggi. La superficie in pianta raggiunge i 960 m<sup>2</sup>, la volta in chiave dell'intradosso misura 12,5 m (Bertolini Cestari et al, 2014).

I lavori di rilievo del 2012 hanno portato a definire uno spessore di 8 cm della volta, anch'essa in c.a.<sup>38</sup>, questa, percorre fluida la costolonatura andando a terminare sulle pensiline laterali.

In questi anni il Comune e le associazioni di Casale hanno intrapreso varie iniziative di approfondimento al tema del recupero delle strutture industriali in abbandono, studiandone le caratteristiche morfologiche e la storia, per porre le basi di eventuali interventi di conservazione e rifunzionalizzazione per la comunità.

### **3.3.1 Integrazione tecniche Lidar e fotogrammetriche UAV**

In questo caso studio viene approfondita l'integrazione dei metodi LIDAR terrestre e di fotogrammetria UAV indoor, andando ad analizzare l'intradosso della volta del Paraboloide. L'obiettivo di questo processo è quello di poter far convergere differenti informazioni da diversi sistemi di rilievo raccolti in periodi significativamente diversi, andando infine ad esaminare le caratteristiche del degrado materico.

Nello specifico vengono impiegati dati dei rilievi eseguiti nel 2012, ovvero nuvole di scansioni laser terrestre all'interno dello spazio voltato, integrando dati provenienti da fotogrammetria UAV, sempre dell'intradosso della volta eseguiti nel 2017. Questi due interventi svolti dal Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali del Politecnico di Torino in collaborazione con il Comune di Casale Monferrato, fanno parte di un continuo percorso conoscitivo e di indagine della struttura e dello stato di conservazione delle superfici in calcestruzzo<sup>39</sup>.

Il motivo per cui si vuole approfondire questo processo viene dalla necessità di includere dati fotogrammetrici che al momento della prima campagna di rilievi non sono stati eseguiti a causa dell'assenza sul mercato di micro-droni.

---

38 Bertolini Cestari et al, The thin concrete vault of the "Paraboloide of Casale (Italy)": Innovative methodologies for the survey, structural assesment and conservation interventions, 2014, p.3.

39 Bertolini et al, La Geomatica per il progetto di recupero e valorizzazione del Paraboloide di Casale: La riconversione del patrimonio industriale, il caso del territorio casalese nella prospettiva italiana ed europea, 2013, pp. 148-157.

### 3.3.2 Strumentazione Utilizzata

Nel primo intervento di rilievo è stato impiegato il laser scanner FARO Focus<sup>3D</sup> 120S.



Laser Scanner FARO Focus<sup>3D</sup> 120S.

Fonte: <http://scanable.com/3d-laser-scanner-rental/faro-focus3d/>

#### Caratteristiche

Peso:	5 kg
Dimensioni:	24x20x10 cm
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:	70 Megapixel

Nel secondo intervento per l'esecuzione dei voli indoor è stato impiegato il modello di drone DJI Mavic PRO



Drone DJI Mavic PRO.

Fonte: <http://www.elemarket.it/prodotto/dji-mavic-pro-platinum/>

### Caratteristiche drone

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
Fotocamera	1/2.3" CMOS a 12 MP-4K

### 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

### 3.3.3 Intervento sul campo e metodo applicativo

Nel primo intervento del 2012 sono stati eseguiti rilievi di tipo LIDAR, effettuando scansioni dell'intradosso e dell'estradosso della volta del fabbricato, utilizzando un elevatore per meglio raggiungere quest'ultimo. Per l'inserimento dei modelli in un sistema di riferimento, sono stati misurati vertici all'intorno del Paraboloide e punti di controllo sugli alzati. Si è deciso di utilizzare un sistema di coordinate in relativo.

Durante la campagna di rilievo del 2017 sono stati eseguiti voli con drone sia all'esterno della struttura per un'analisi dell'intero complesso e della copertura e, nello specifico della passerella superiore, sia all'interno impiegando il metodo fotogrammetrico per l'intradosso della volta del fabbricato. Per questo rilievo è stato utilizzato il sistema topografico della campagna precedente, integrando qualche punto e, da qui, le misurazioni di una poligonale di vertici nell'interrato.

L'interessante innovazione metodica di questo caso studio è stata poter effettuare misure partendo da video. Per quanto riguarda i voli indoor, non sono stati pianificati piani di volo per via delle difficoltà di manovra e per i vincoli dati dallo spazio confinato, per cui si è optato per una guida in manuale.

Per garantire un sufficiente overlapping delle superfici interne, sono state eseguite strisciate lungo le pareti seguendo la direzione di campata e lungo le facciate principali.

In questo caso, invece di programmare lo scatto di una fotografia in un intervallo prestabilito si è deciso di effettuare riprese video, questo per via dei continui cambi di velocità di volo e di manovra dell'operatore; le immagini singole per la produzione del modello fotogrammetrico sono state estratte successivamente in laboratorio. Per ovviare al corretto inserimento del modello dell'intradosso in un sistema di riferimento, è stato utilizzato il sistema topografico del rilievo LIDAR misurato nel 2012.



Volo Indoor del Paraboloide.  
Fonte: Fotogramma drone in traiettoria centrale della volta



Volo Indoor del Paraboloide.  
Fonte: Fotogramma drone in fase di decollo.



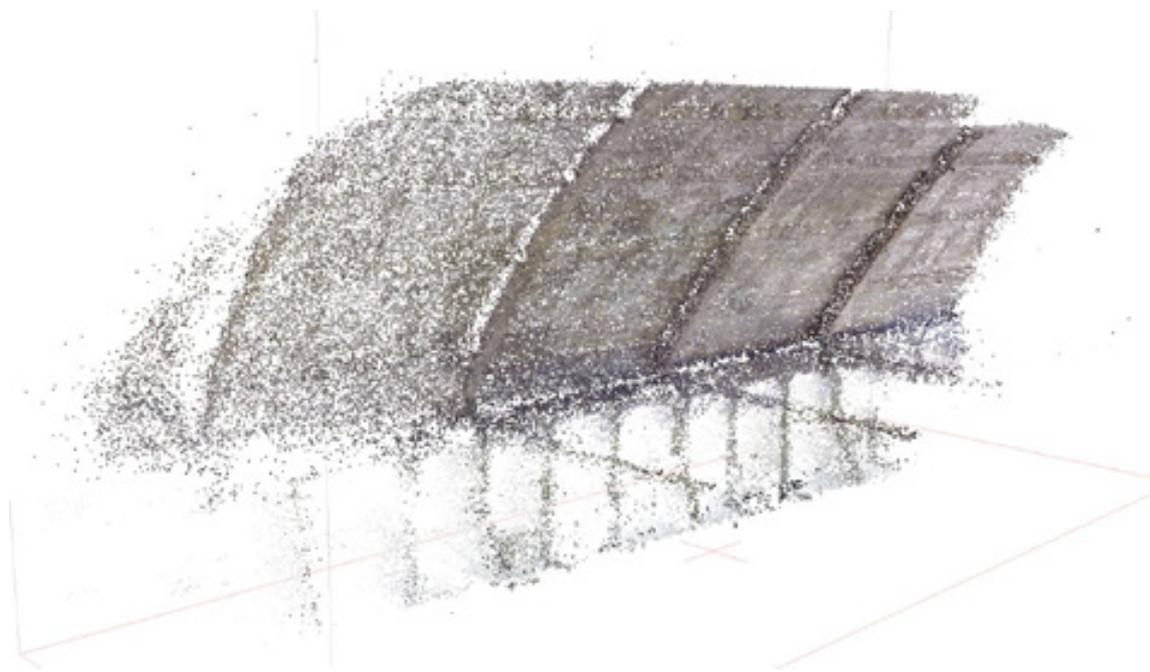
Sequenza di frame estratti dai video da drone degli interni del Paraboloid.  
Fonte: Foto dell'Autore

### 3.3.4 Elaborazioni

Successivamente, si è passati all'estrazione degli opportuni *frame* dei video, necessari all'identificazione delle superfici di volta da esaminare. Per mezzo del software fotogrammetrico, si è inserito un intervallo di tempo di estrazione di fotogrammi dai video che ritraevano la superficie campione, ottenendo così 57 immagini.

Le immagini scelte sono state migliorate graficamente rimuovendo i difetti che non favorivano il miglior risultato, come parti sovraesposte, troppo buie, con eccessive variazioni cromatiche o con scarsa messa a fuoco. Come per i precedenti casi studio, le immagini sono state elaborate con Agisoft Photoscan.

Ad un primo allineamento in modalità *high* si è generata la prima nuvola rada di 162.920 di *tie points*.



Prima nuvola rada dell'area oggetto di studio.

Fonte: Elaborazione dell'Autore

Per integrare un maggior numero di coordinate di controllo celerimetrico sull'intradosso, è stato necessario estrarre alcuni punti dalle nuvole di laser dei lavori della prima campagna del 2012, già elaborate e rototraslate nelle precedenti analisi da parte del Laboratorio di Gemoatica per i Beni Culturali per il comune di Casale Monferrato.

Sono state importate nel software 3DReashaper le nuvole di punti acquisite nel 2012 dell'interno dalla volta del Paraboloide. Una volta identificata l'area di analisi per questo studio, sono stati identificati sei punti sull'oggetto, in parti facilmente leggibili come gli spigoli delle strutture e se ne sono estratte le coordinate, esportando inoltre un punto di controllo già misurato durante i lavori del 2012. Infine le coordinate sono state salvate in un file .csv, da inserire successivamente nel modello fotogrammetrico da drone.



Nuvola di punti completa del Paraboloide ottenuta dalle scansioni dei lavori del 2012.  
Fonte: Elaborazioni precedenti, Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali del Politecnico di Torino



Distribuzione dei punti di controllo identificati sull'area di studio, estratti poi dalla nuvola dal software 3D Reashaper. Fonte: Rielaborazione dell'Autore su dataset elaborati precedenti, Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali.

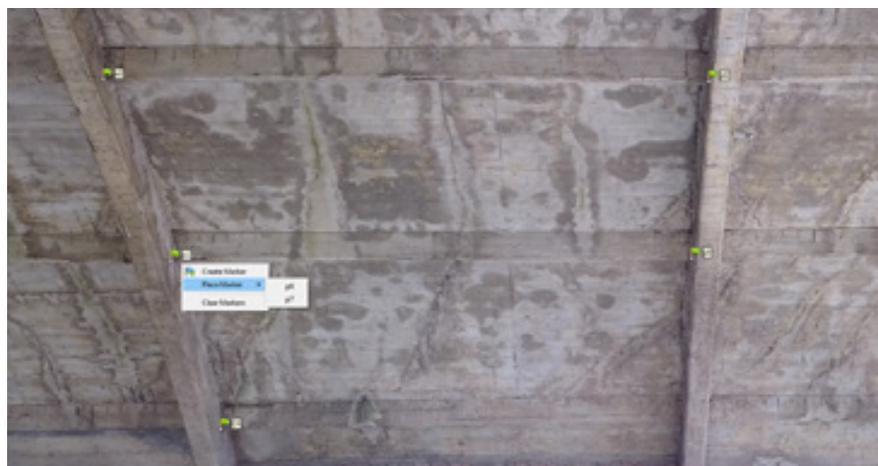
C4;138.770828;580.904808;161.327842
p1;137.780600;582.139900;163.501100
p2;136.812500;583.386200;165.302100
p4;132.923600;578.305000;163.471000
p5;131.943400;579.525300;165.258100
p6;130.976900;580.785500;166.597900
p7;135.822500;584.635500;166.625400

Tabella di coordinate dei punti di controllo.  
Fonte: Calcoli

Importato il file .csv in Photoscan si è passati all'inserimento dei marker in corrispondenza dei punti scelti dalle nuvole LIDAR.

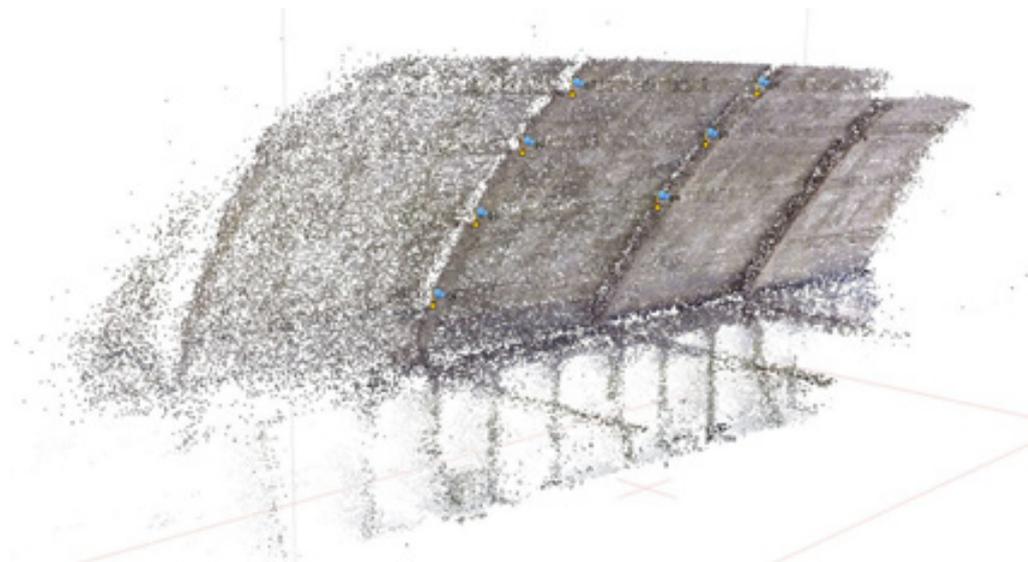
Terminato l'inserimento dei marker sulle immagini ed effettuata la rototraslazione, si è constatato una deviazione standard di 35 mm, considerevole eccessiva, ma in questo caso accettabile dato l'utilizzo di dati provenienti da *workflow* di metodi e periodi differenti.

Nonostante ciò, si è proceduto alla generazione della nuvola di punti densa in modalità *high*. Il risultato ottenuto è stata una nuvola avente 7.608.814 punti.



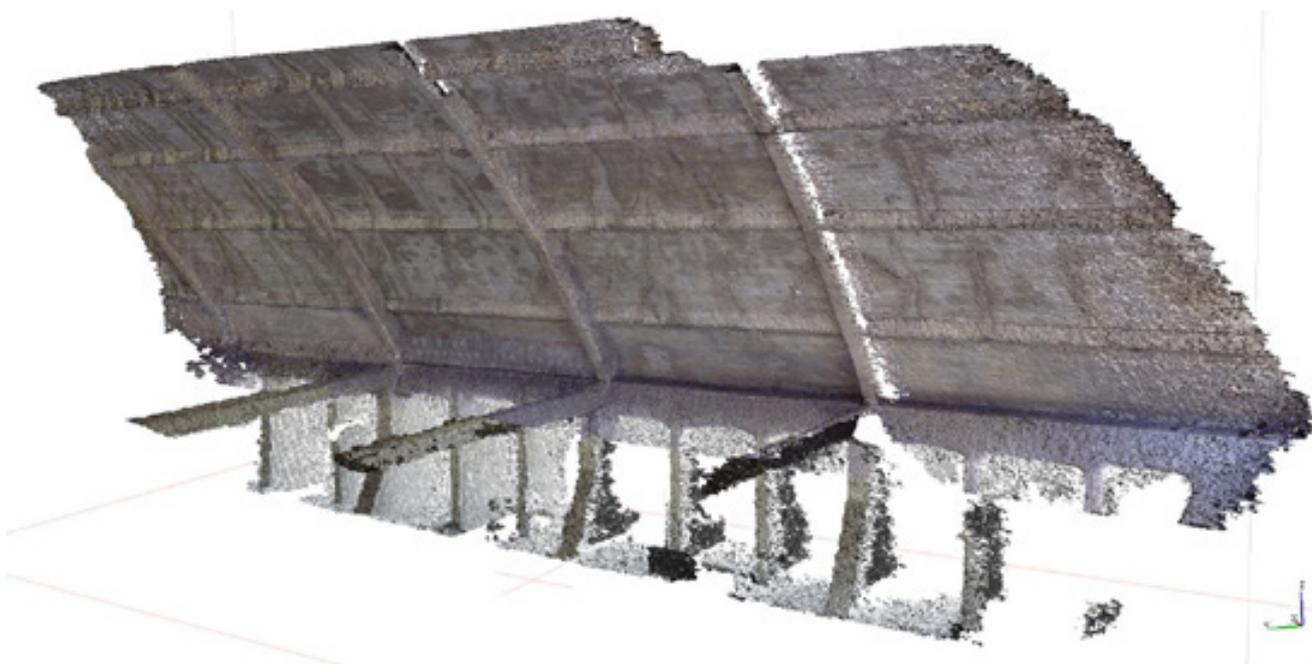
Inserimento sui fotogrammi dei marker estratti dalla nuvola originale.

Fonte: Elaborazione dell'Autore

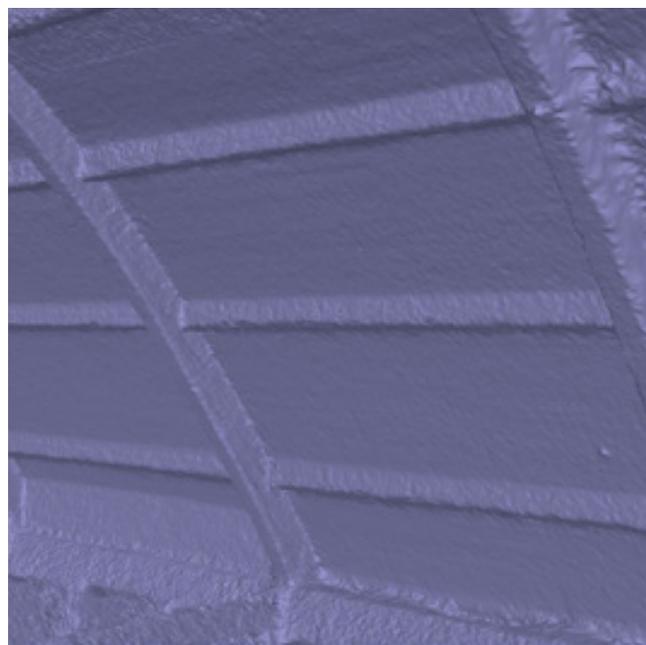
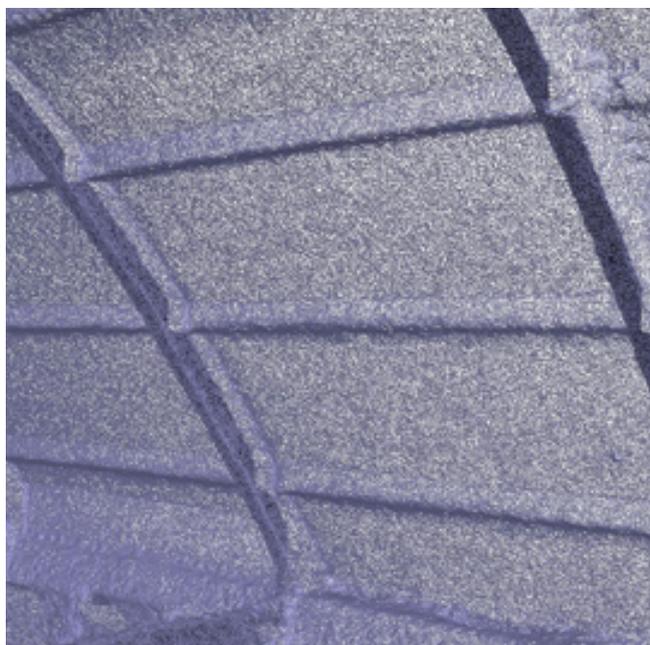


Distribuzione tridimensionale dei marker sulla nuvola rada.

Fonte: Elaborazione dell'Autore



Nuvola di punti densa dell'area analizzata.  
Fonte: Elaborazione dell'Autore



A sinistra: Mesh in visualizzazione geometrica *Wireframe*. Fonte. Fonte: Elaborazione dell'Autore  
A destra: Mesh in visualizzazione solida. Fonte. Fonte: Elaborazione dell'Autore



Texturizzazione del modello.  
Fonte: Elaborazione dell'Autore

Da questo punto sono state generate la poligonizzazione della nuvola a formare la mesh in modalità *high* ed infine la successiva texturizzazione. Il primo *workflow* fotogrammetrico ha generato una mesh di discreta qualità ed una texture ad una buona risoluzione.

### 3.3.5 Risultati e Rappresentazioni

Alla produzione del report di elaborazione si riscontrano i seguenti risultati:

Risultati fotogrammetrici

Quota di volo media	12,4 m
Numero di fotogrammi	57
GSD	3,79 mm/pix
Area Coperta	264 m <sup>2</sup>
sqm	4,2 mm

Dall'analisi del diagramma di overlapping si riscontra un'ottima percentuale di ricoprimento nell'area selezionata, andando a diminuire significativamente dove non vi era interesse di estrarre ed utilizzare fotogrammi.

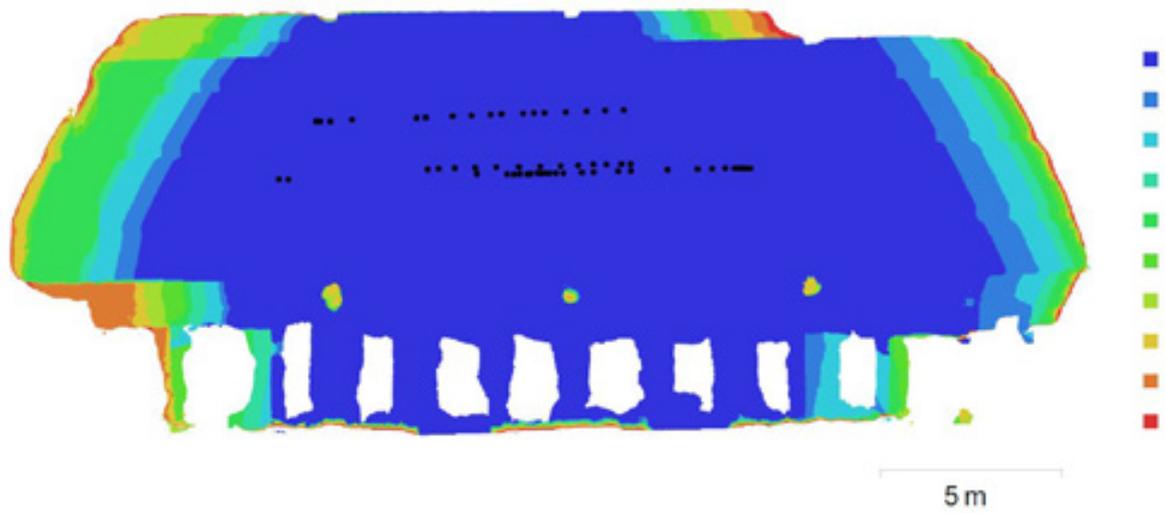


Diagramma di overlapping dell'area interna del Paraboloide. Fonte. Fonte: Foto dell'Autore



Ortofoto. Fonte. Fonte: Foto dell'Autore

L'obiettivo del caso studio è quello di individuare le differenze geometriche e topologiche tra le tecniche, ottenere risultati migliori integrando le tecniche LIDAR con quelle fotogrammetriche, ovvero andando a generare modelli poligonali più precisi, partendo dai dati delle nuvole di punti del 2012, generandovi poi la componente texturizzata utilizzando i dati fotogrammetrici UAV del 2017. Questo tipo di integrazione viene svolta per migliorare le due componenti: geometrica e radiometrica.

Con la tecnica LIDAR si ottengono nuvole di punti ad alto grado di precisione e contenenti l'informazione radiometrica e permettono di generare mesh molto fitte, senza però ottimizzarne la texturizzazione delle superfici; con il metodo fotogrammetrico se si cercasse di ottenere una buona componente geometrica dell'oggetto allora la mesh dovrà essere molto dettagliata; se si volesse ottenere le informazioni radiometriche e quindi generare ortofoto delle superfici sarà sufficiente una mesh di media risoluzione. In questo caso, la nuvola fotogrammetrica prodotta, non essendo di alta qualità non permette la generazione di una mesh che rispecchi le caratteristiche delle superfici analizzate, ma, permette di produrre texture fedeli alle caratteristiche cromatiche dell'oggetto.



Nuvola di punti da acquisizioni del 2012, identificazione dell'area oggetto di studio

Fonte. Fonte: Foto dell'Autore

Quindi, a partire dalle nuvole di punti acquisite nel 2012, si produrrà una mesh ad alta risoluzione, che verrà texturizzata con processo fotogrammetrico, utilizzando le immagini dei rilievi del 2017.

Partendo dall'insieme di nuvole LIDAR del 2012, importate sul software 3Dreashaper, si è identificata l'area interna della volta in esame, viene selezionata ed isolata, andando a produrre una nuvola più leggera, con le caratteristiche originali di scansione ed orientamento.

Per generare la mesh sono necessari tre differenti passaggi, di modo da ottenere un'adeguata risoluzione. Il primo step è la generazione di una mesh "grezza" con intervalli medi tra i punti di 5 cm, ottenendo così una prima maglia rudimentale.

Il secondo passaggio vede la generazione di una mesh più fitta utilizzando algoritmi che considerano sia la nuvola di punti che i punti della prima mesh grezza, andando a ridurre gli intervalli tra i punti al millimetro, generando una mesh di media risoluzione.

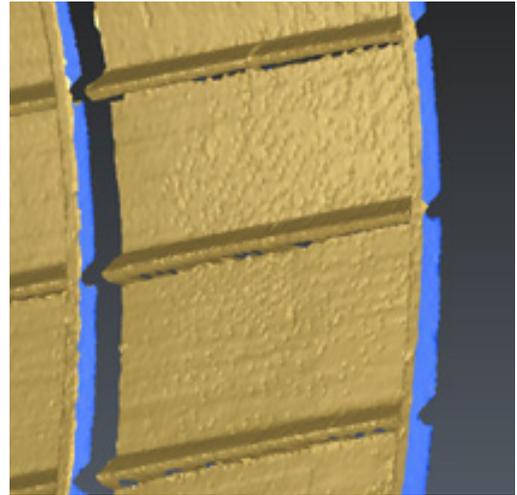
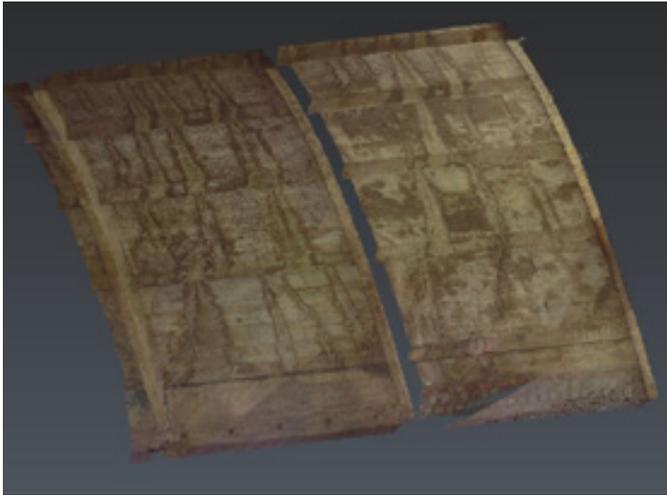
Il terzo ed ultimo passaggio vede un'ultima interpolazione, nuovamente tra i punti della nuvola e i punti della mesh "media" ponendo inoltre un limite di poligoni. Il risultato sarà una mesh ad altissima risoluzione che, se confrontata con quella fotogrammetrica evidenzierà notevoli differenze, quali la definizione dei particolari di superficie del cemento armato della volta, le fratture e i segni dei casseri, cosa che prima non emergeva per via della rumorosità delle superfici delle altre mesh.

Una volta ottenuta la mesh, viene esportata in formato Obj. ed importata in Agisoft Photoscan.

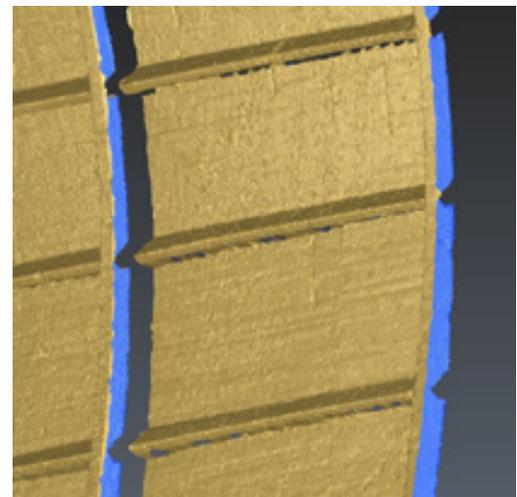
L'importazione avviene all'interno della cartella di lavoro del precedente *processing* fotogrammetrico, andando a sostituire la mesh fotogrammetrica con quella da nuvole LIDAR, verificando che si stia lavorando sullo stesso sistema di coordinate.

L'ultimo passaggio è quello di generare sulla mesh importata una texture ad alta risoluzione, partendo dai fotogrammi da drone.

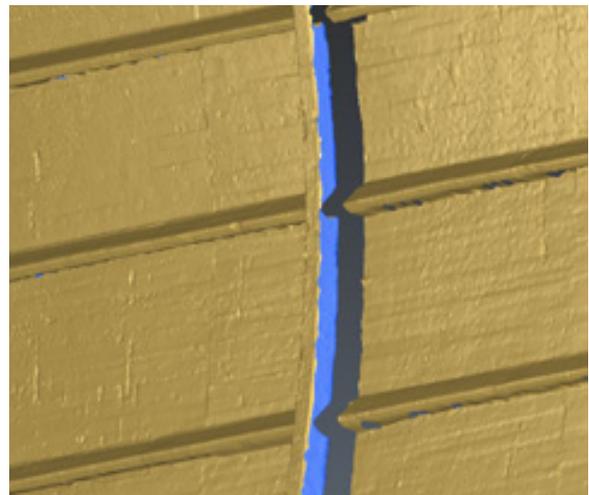
Si è riscontrato un'evidente miglioramento nella definizione dei dettagli, notando però, delle aree nere, conseguenza della mancanza di dati texture per quella specifica area, o l'incongruenza geometrica della mesh da nuvola LIDAR con la texture fotogrammetrica da drone.



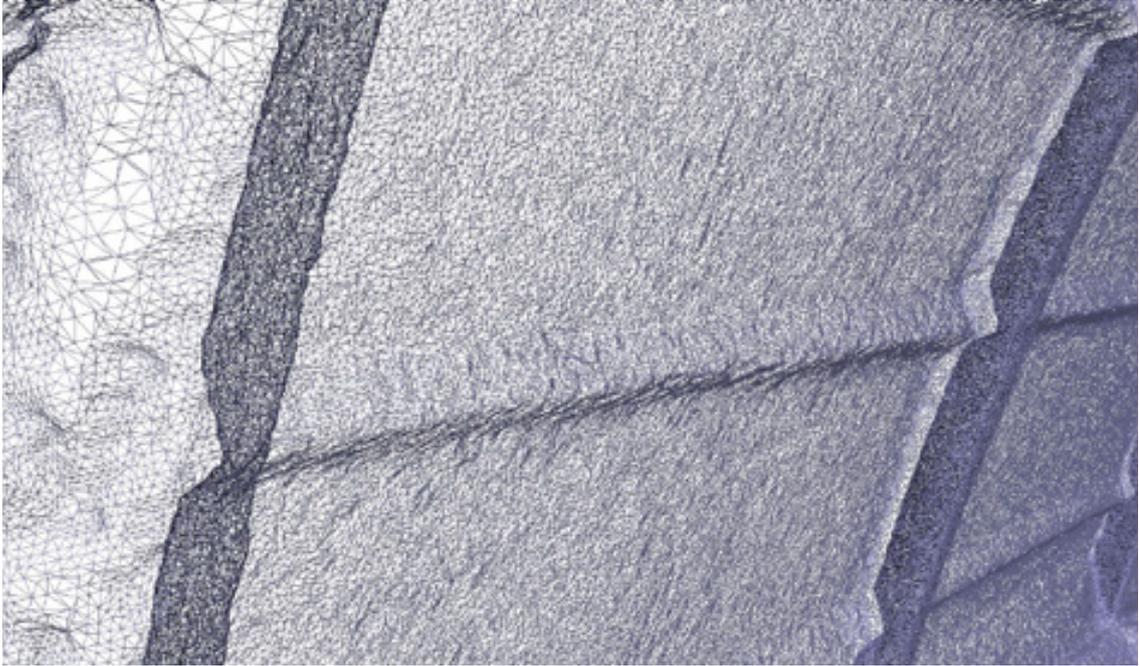
A sinistra: separazione dell'area di nuvola in esame; a destra: generazione prima mesh "grezza"  
Fonte. Fonte: Elaborazione dell'Autore.



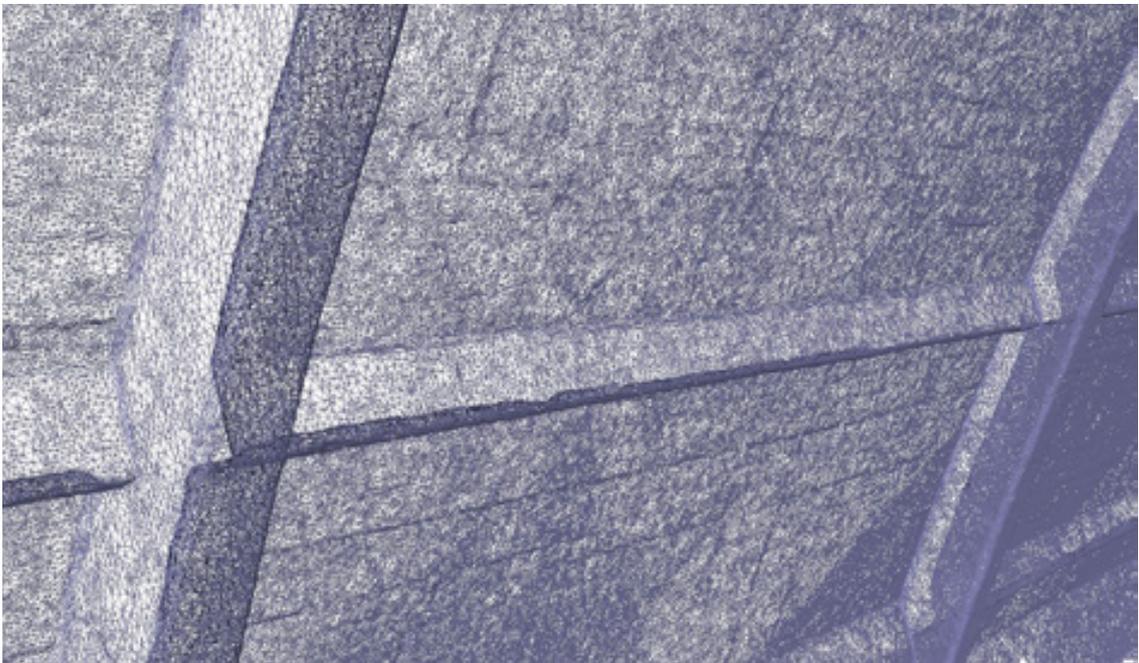
A sinistra: rielaborazione mesh con calcolo integrato nuvola e mesh "grezza"; a destra: seconda mesh a media risoluzione. Fonte. Fonte: Elaborazione dell'Autore.



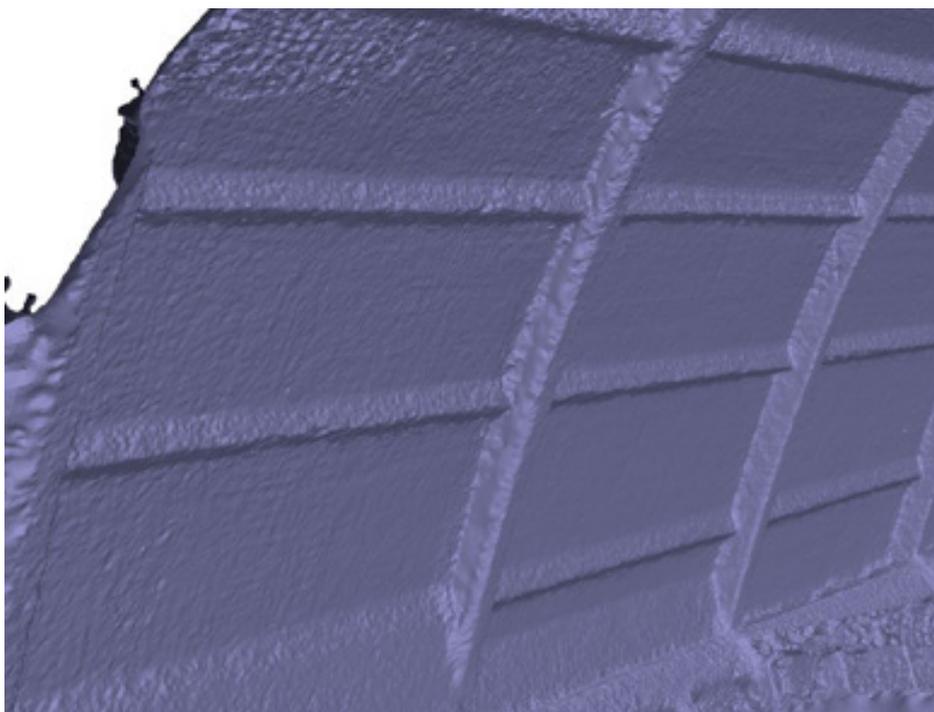
A sinistra: interpolazione nuvola di punti e mesh a media risoluzione; a destra: mesh ad alta risoluzione  
Fonte. Fonte: Elaborazione dell'Autore.



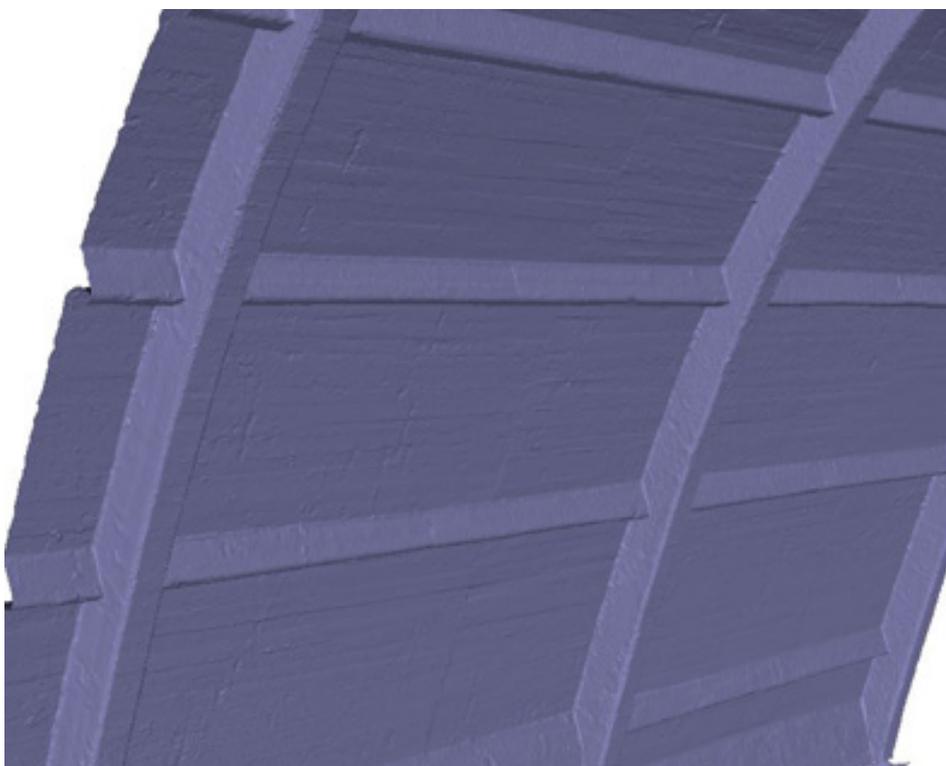
Mesh in visualizzazione Wireframe, generata dal volo da drone (Lavori 2017).  
Fonte: Elaborazione dell'Autore.



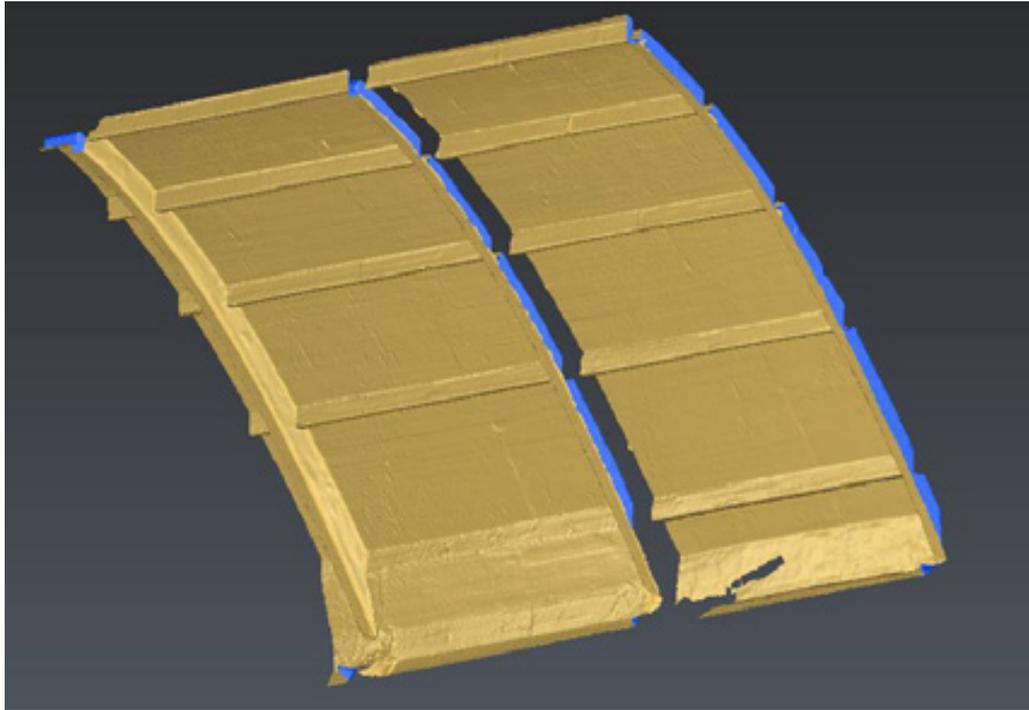
Mesh in wireframe generata dalle nuvole LIDAR (lavori 2012).  
Fonte: Elaborazione dell'Autore.



Mesh solida ricavata da processo fotogrammetrico (lavori 2017). Fonte: Elaborazione dell'Autore.



Mesh solida ricavata da nuvole LIDAR (lavori 2012) importata in A. Photoscan da 3DReashaper.  
Fonte: Elaborazione dell'Autore.



Mesh ricavata da nuvole LIDAR (lavori 2012) elaborata su 3DReashaper. Fonte: Elaborazione dell'Autore.



La stessa mesh importata in A. Photoscan e texturizzata on le informazioni fotogrammetriche (lavori 2017). Fonte: Elaborazione dell'Autore.



Mesh fotogrammetrica (2017) texturizzata. Fonte: Elaborazione dell'Autore.



Mesh da LIDAR (2012) texturizzata con dati fotogrammetrici (2017). Si nota una maggiore definizione nei dettagli, riscontrando però, delle piccole mancanze di color nero. Fonte: Elaborazione dell'Autore.

## Elaborati

Dopo aver effettuato l'integrazione di tecniche, allo scopo di ottimizzare i risultati in termini di qualità di modello e risoluzione della componente texturizzata, si è passati all'estrazione e alla produzione di elaborati grafici dei degradi materici della volta del Paraboloide.

Sono stati effettuati confronti di metodo nelle analisi delle componenti del degrado del cemento armato, in due differenti zone facenti parte dell'area in esame.

Il primo metodo è consistito nella produzione di ortofoto di parti dell'intradosso della volta, racchiuse nel disegno strutturale di travi ed archi. L'elaborazione di queste immagini è servito allo studio delle componenti del degrado del cemento. Quest'analisi è avvenuta per mezzo del disegno al tratto in AutoCAD, di modo da definire le differenti aree, classificando ognuna nello specifico degrado.

Il secondo metodo, invece, ha visto anche in questo caso, la produzione di ortofoto di un'altra piccola area della volta, ma, in questo caso, importata sul software QGIS, al fine di eseguire l'analisi dei degradi attraverso il riconoscimento automatico delle componenti radiometriche dell'immagine, assegnando così un valore cromatico opportuno al degrado. Per poter eseguire il riconoscimento automatico, però, l'ortoimmagine raster dev'essere prima migliorata nelle componenti radiometriche, attraverso i software A. Photoshop o direttamente da QGIS. Questo passaggio consiste nel comprimere tutte le bande di colore dell'immagine (spesso moltissime) appartenenti ad un colore primario, in poche bande semplificate ma che conservino comunque le caratteristiche cromatiche del raster<sup>40</sup>.

Una volta corretta la componente RGB dei raster, il software riconoscerà in maniera rapida le bande di colore assegnate dall'operatore, riassegnandone poi il nuovo colore, proprio della rappresentazione del degrado specifico.

---

40 A.T. Spanò, Dispense, "Fotogrammetria digitale e scansioni 3D", a.a. 2017/2018, pp. 7-10.



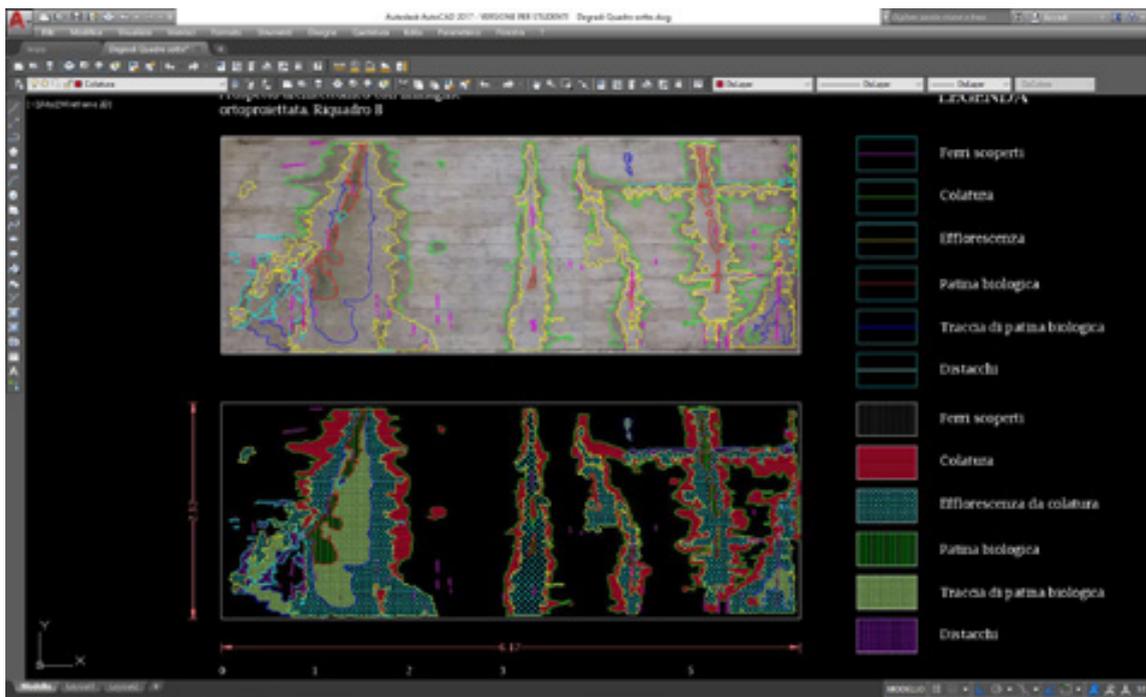
Selezione delle due parti approfondite nell'analisi del degrado del c.a. In rosso l'area analizzata con riconoscimento RGB automatico con QGIS, in arancione l'area analizzata con disegno al tratto in AutoCAD. Fonte: Foto dell'Autore.



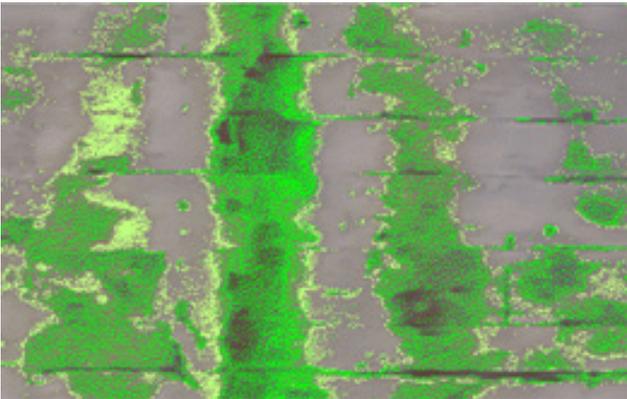
Ortofoto dell'area analizzata in QGIS. Fonte: Foto dell'Autore.



Ortofoto dell'area analizzata in AutoCAD. Fonte: Foto dell'Autore.



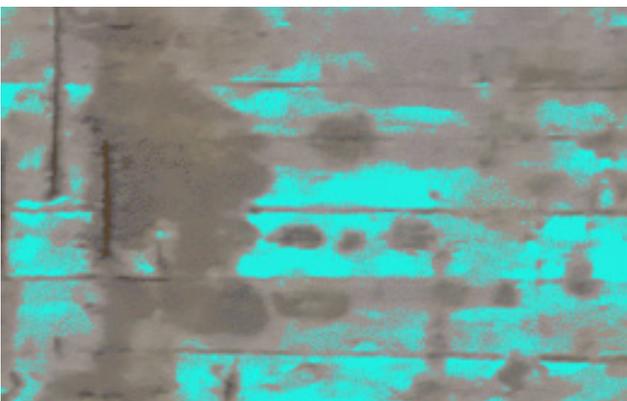
Processo di riconoscimento degradi e disegno al tratto in AutoCAD. Fonte: Foto dell'Autore.



A sinistra: particolare dell'ortofoto originale.  
A destra: semplificazione e riduzione delle bande RGB della patina biologica.

Sotto: riconoscimento automatico dei pixel e assegnazione della banda del degrado (in due bande di verde)

Fonte: Elaborazione dell'Autore.



A sinistra: particolare dell'ortofoto originale.

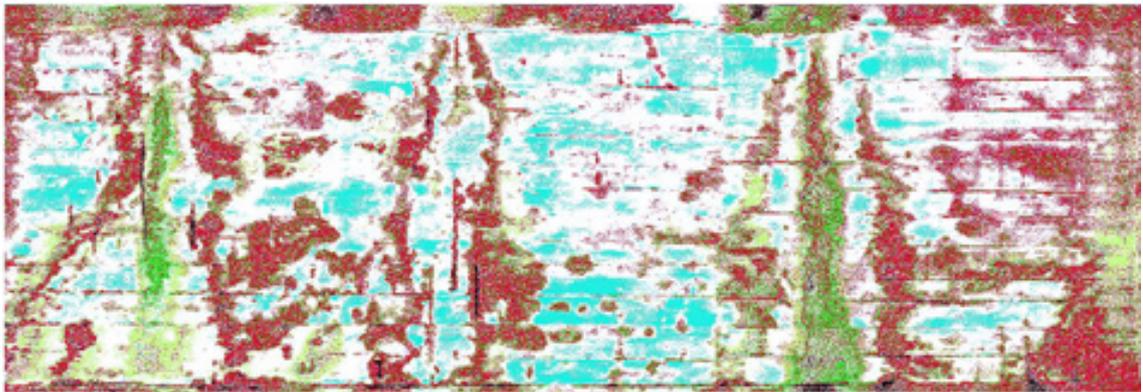
A destra: semplificazione e riduzione delle bande RGB delle efflorescenze.

Sotto: riconoscimento automatico dei pixel e assegnazione della banda del degrado (in azzurro)

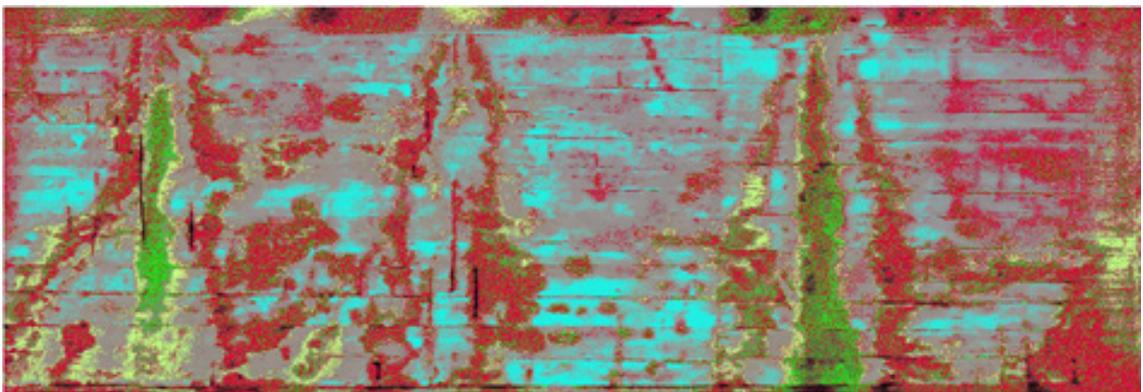
Fonte: Elaborazione dell'Autore.



Ortofoto originale. Fonte: Foto dell'Autore.



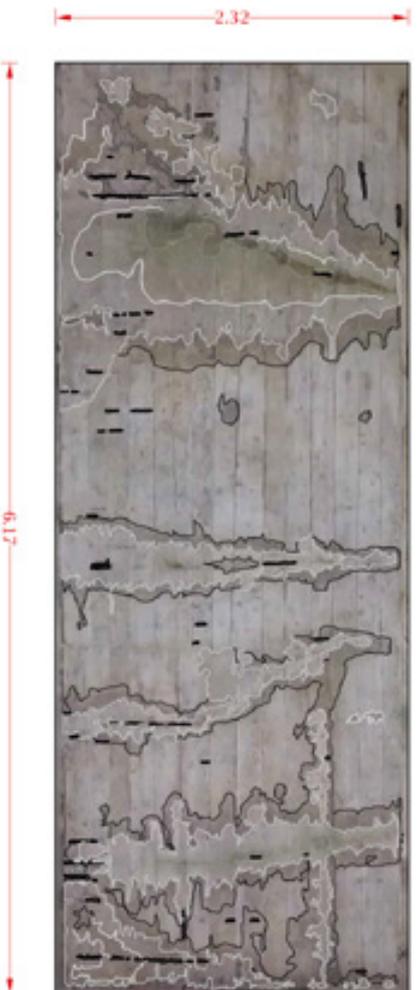
Riconoscimento radiometrico automatico. Riassegnazione cromatica ai pixel appartenenti al degrado specifico. Fonte: Elaborazione dell'Autore.



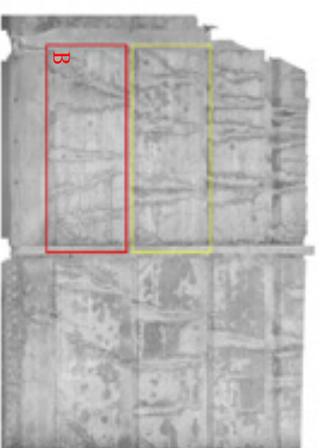
Sovrapposizione ortofoto originale e degradi analizzati. Fonte: Elaborazione dell'Autore.

# Analisi dei degradi di due differenti aree dell'intradosso della volta del Paraboloido di Casale Monferrato con differenti metodi

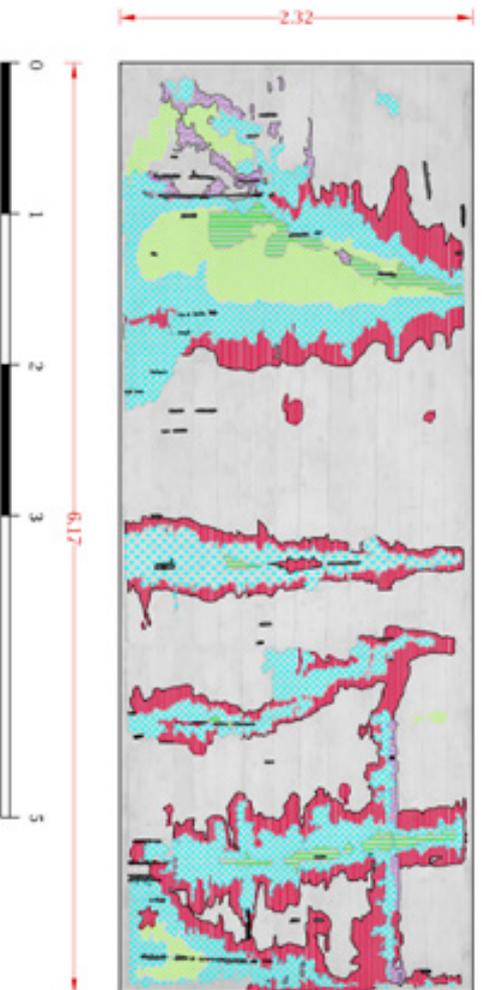
Prospetto architettonico con immagine ortoproiettata. Riquadro B



- LEGENDA**
- Ferri scoperti
  - Colatura
  - Efflorescenza
  - Patina biologica
  - Traccia di patina biologica
  - Distacchi



Prospetto architettonico con identificazione manuale dei degradi



- LEGENDA**
- ▒ Ferri scoperti
  - Colatura
  - Efflorescenza da colatura
  - Patina biologica
  - Traccia di patina biologica
  - Distacchi



**POLITECNICO DI TORINO**  
Dipartimento di Architettura e Design

**RILIEVO METRICO INTEGRATO E  
RESTITUZIONE GRAFICA DEL  
PARABOLOIDE DI CASALE  
MONFERRATO (AL.)**

Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali

Oggetto elaborato  
**SEZIONI / scala 1:50**

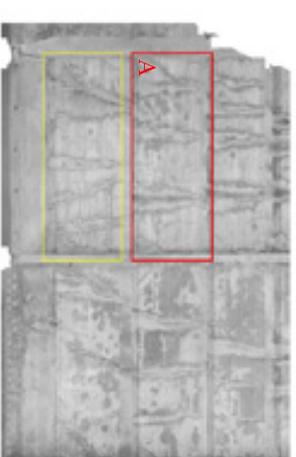
Identificazione file  
Prospetto B

Data acquisizioni  
Luglio 2017

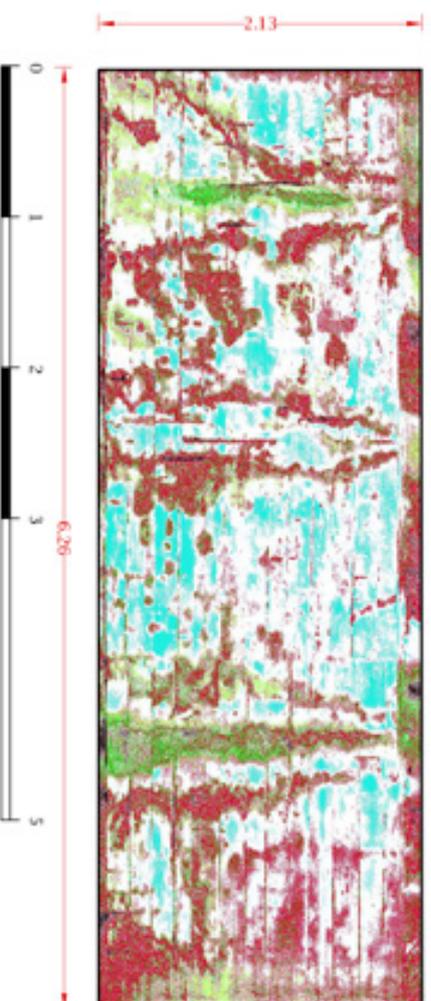
TAVOLA  
**20**

# Analisi dei degradi di due differenti aree dell'intradosso della volta del Paraboloido di Casale Monferrato con differenti metodi

Immagine Ortoproiettata. Riquadro A



Prospetto architettonico con identificazione dei degradi tramite riconoscimento radiometrico automatico



## LEGENDA

- Ferri scoperti
- Colatura
- Effiorescenza da colatura
- Patina biologica
- Traccia di patina biologica



**POLITECNICO DI TORINO**  
Dipartimento di Architettura e Design

**RILIEVO METRICO INTEGRATO E  
RESTITUZIONE GRAFICA DEL  
PARABOLOIDE DI CASALE  
MONFERRATO (AL.)**

Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali

Oggetto elaborato  
**SEZIONI / scala 1:50**

Identificazione file  
Prospetto A

Data acquisizioni  
Luglio 2017

TAVOLA  
**21**

### 3.3.6 Riscontri e valutazioni critiche dei risultati

Con lo studio del Paraboloide di Casale Monferrato è stato possibile effettuare un doppio confronto di due distinte metodi applicativi e di analisi.

La possibilità nel primo confronto, di poter far relazionare dataset LIDAR e UAV appartenenti a momenti di indagine differenti e provenienti da due metodi distinti tra loro, ha permesso di riscontrare la vantaggiosa flessibilità dei processi di sviluppo del lavoro di indagine. La capacità di ottimizzare i dati di cui si dispone con supporti tematici ottenuti in altri momenti, permette inoltre di poter mantenere aggiornati i dati dei rilievi e degli interventi precedenti, migliorando la capacità di analisi critica dell'operatore, per quanto riguarda la *time line* della vita del manufatto.

Il secondo confronto, che ha visto l'approfondimento dell'analisi dei degradi del Paraboloide, ha permesso di poter identificare il processo più efficiente ed esaustivo in termini di tempi di applicazione e risultati qualitativi ottenuti.

Queste due procedure hanno consentito di effettuare un confronto tra due differenti metodi; entrambi mirano all'ottenimento del medesimo risultato (mappatura dei degradi), ma con una considerevole differenza in termini di tempi di applicazione e di qualità del risultato. Infatti, lo studio dei degradi, con l'utilizzo di tecniche tradizionali di disegno tecnico e con l'intervento diretto dell'operatore nel riconoscimento e nella rappresentazione delle consistenze, pone dei limiti di risultato in quanto le capacità di identificazione sull'immagine sono condizionate dall'operatore stesso e necessitano di tempi maggiori.

L'utilizzo di software che operano in ambiente GIS, invece, permettono l'attribuzione di un valore numerico in bande di colore al pixel dell'immagine raster, associando a questo valore numerico, un valore RGB che indica uno specifico degrado, ovviamente sempre sotto il controllo e la supervisione dell'operatore, ma, permettendo di ottenere risultati molto più esaustivi e completi, in tempi di esecuzione nettamente più ridotti.

Questo metodo può essere visto come ulteriore miglioria e semplificazione ai processi di elaborazione, al fine di ottimizzare i tempi di presenza dell'operatore alle procedure di laboratorio, senza però perdere mai di vista il controllo del lavoro svolto.

Infine, l'utilizzo dei droni *indoor*, utili alla produzione di materiale grafico di partenza ai processi fotogrammetrici e di indagine, ha permesso di approfondire il tema del risparmio di risorse umane, economiche e di tempo, raggiungendo punti difficilmente avvicinabili se non con l'impiego massiccio di personale, impalcature, macchinari<sup>41</sup> e sistemi di sicurezza alle persone, facendo lievitare tempi e costi del rilievo. L'uso di questa vantaggiosa innovazione nel campo delle indagini e del monitoraggio dei Beni Culturali, sta prendendo sempre più piede e si sta consolidando negli scenari di studio ed analisi ordinaria dei beni, ed in situazioni di emergenza e post-disastro, dove si salvaguarda la sicurezza degli attori sul campo e si impiega un quantitativo di tempo assai ridotto rispetto ad altri metodi assodato.

---

41 Come è accaduto per il rilievo LIDAR dell'estradosso della volta del Paraboloide nel 2012, dove è stato impiegato un elevatore per portare in posizione elevata il laser scanner.

## Conclusioni

Con lo svolgimento di queste tre sperimentazioni, legate ad altrettanti casi studio appartenenti a scenari distanti e che hanno condotto a differenti analisi dello stato di fatto e conservazione dei beni, sono state mostrate le tecniche di cui al giorno d'oggi si fa più ricorso nell'ambito della Geomantica per i Beni Culturali.

I risultati ottenuti permettono ora e permetteranno in un prossimo futuro di soddisfare l'ingente domanda di documentazione e conoscenza per trasmettere l'eredità culturale, adempiendo anche alla richiesta proposta dalle normative e dalle leggi sulla documentazione e la tutela.

Questi metodi divengono sempre più utilizzati e diffusi grazie alla flessibilità di utilizzo, l'ampio spettro di fruizione, discipline e attori che possono prendere parte al processo di conoscenza e all'analisi dei risultati.

Un ulteriore vantaggio nell'impiego e nello sviluppo di questi metodi è l'aggiornabilità dei dati nel tempo grazie soprattutto al sistema di riferimento unico fornito dalla topografia, la possibilità di poter reintegrare e reinterpretare informazioni archiviate, ma conservanti le medesime caratteristiche metriche acquisite in origine, su cui poter costruire nuovi processi di studio ed analisi, generando un continuum conoscitivo di informazioni.

Oltre a questo marcato valore tecnico, questi approcci si riferiscono alla natura geometrica reale dello specifico bene nel determinato momento, a differenza del passato, interrogabile, allo scopo di comprendere e valorizzare un oggetto, anche al fine di incuriosire e spronare le coscienze alla sensibilizzazione verso il patrimonio culturale.



## Ringraziamenti

Un pensiero in particolare va alla mia terra e alla mia famiglia, capace di aver creato i presupposti giusti per farmi diventare chi sono oggi. Ai miei genitori, pazienti guide di questo lungo percorso;

A Federico, anima guerriera, che sa sempre tenermi ritto sulla strada;

Al nostro gruppo, i compagni e dottorandi del Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali, in particolare alla Prof.ssa Spanò e al Prof. Chiabrando, per la loro capacità di averci trasmesso molto in questi anni e per averci tenuto sotto la propria ala;

Al Politecnico, nostra casa, nostro nido, nostra culla di sogni;

A Diego, mio caro amico, persona lontanissima da me, ma sempre vicinissima a me;

A Paolo Cerutti, per non aver mai dubitato di me, e per aver tirato fuori il coraggio da questo timido ragazzo.

A Paola, irrotta nella mia vita prepotentemente, per cui non ne sarò mai abbastanza grato;

A Giacomo Patrucco, per l'aiuto e per il sostegno durante questi duri mesi;

L'elenco delle persone da ringraziare è davvero troppo lungo e mi perdoneranno coloro i quali non sono stati citati, ma ci tengo comunque a ricordare e a portare con me chi ha contribuito a farmi continuare e resistere lungo questo ripido cammino.

## Bibliografia

- A Cura del Centro Studi "Agostino Trapè". *La Basilica di San Nicola a Tolentino, Guida all'arte e alla storia*, Biblioteca Egidiana, convento San Nicola, 2008;
- Daniele Amadio, Metodi di rilievo metrico 3D integrati per l'analisi del patrimonio industriale dismesso, *Il caso del Paraboloide di Casale Monferrato*, tesi di laurea Magistrale in Architettura - Restauro e Valorizzazione, Politecnico di Torino, a.a. 2016-2017, rel. Prof.ssa Antonia Teresa Spanò, Prof. Filiberto Chiabrandò;
- S. Bertocci, M. Bini, *Manuale di Rilievo Architettonico e Urbano*, Città Studi Edizioni, de Agostini Scuola Spa, Novara, 2012;
- C. Bertolini, F. Chiabrandò, A.T. Spanò', *La Geomatica per il progetto di recupero e valorizzazione del Paraboloide di Casale*, in M. Ramello (a cura di ), *La riconversione del patrimonio industriale, il caso del territorio casalese nella prospettiva italiana ed europea*, 2013, Alinea, pp. 148-157;
- C. Bertolini Cestari, A. Spanò, T. Marzi, S. Invernizzi, F. Chiabrandò, *The thin concrete vault of the "Paraboloide of Casale (Italy)": Innovative methodologies for the survey, structural assesment and conservation interventions*, In: *Structural Faults & Repair*, 2014, ISBN: 094764475X;
- M. Boskovits, *La nascita di un ciclo di affreschi del Trecento. La decorazione del Cappellone di San Nicola a Tolentino*, in *Arte Cristiana*, 1989, n. 730, pp. 3-26;
- D. Brocchini, F. Chiabrandò, E. Colucci, G. Sammartano, A. Spanò, L. Teppati Losè, & A. Villa, *The Geomatics Contribution fore the Valorization Project in the Rocca of San Silvestro Landscape Site*, ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2017, XLII-5/W1(5W1), 495-502. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-495-2017>;

- P. A. Burrough, *Principles of Geographic Information Systems for Land Resource Assessment. Monographs on Soil and Resources Survey*, No. 12, Oxford Science Publications, New York 1986;
- A. Calantropio, G. Patrucco, G. Sammartano, L. Teppati Losè, *Low- cost sensors for rapid mapping of cultural heritage: first tests using a COTS Steadicamera*, *Applied Geomatics*, 2017, pp. 32-45;
- Carta di Venezia: Carta internazionale sulla conservazione e il restauro di monumenti e insiemi architettonici 1964;
- F.Chiabrandò, E.Costamagna, A.T. Spanò, *La correlazione di immagini per la generazione di modelli 3D per il patrimonio costruito*, *Territorio Italia*, vol 1, 2013, pp. 53-67;
- F.Chiabrandò, A.T. Spanò, G.Sammartano, L. Teppati Losè, *UAV oblique photogrammetry and LIDAR data acquisition for 3D documentation o the Hercules*, in *Virtual Archaeology Review*, 2017, pp. 83-96;
- F.Chiabrandò, A.Lingua, P.Maschio, L. Teppati Losè, *The influence of flight planning and camera orientation in UAVs Photogrammetry. A test in the area of Rocca San Silvestro (LI), Tuscany*, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017 ,pp.163-170;
- G. Chirici, *Appunti di geomatica per le scienze dell'ambiente e del territorio*, Laboratorio di Geomatica Dipartimento di Scienze e Tecnologie Ambientali Forestali, Università degli Studi di Firenze, 2005;
- A.Cina, L. Luzietti, A. Mazzoni, L.Pinto, A. Stoppini, *Applicazioni catastali delle reti geodetiche GNSS, Lo sviluppo delle tecnologie per le reti geodetiche*, 2009;
- A. Cina, *Dal GPS al GNSS (Global Navigation Satellite System) per la Geomatica*, Celid, Torino, 2014;

- Elisabetta Colucci, Architettura e Natura di paesaggi archeologici. *Analisi spaziali integrate in ambiente WEB GIS per la conservazione e la comunicazione della memoria storica: Il Parco Archeominerario di San Silvestro*, tesi di laurea Magistrale in Architettura per il progetto sostenibile, Politecnico di Torino, a.a. 2016-2017, rel. Prof.ssa Antonia Teresa Spanò;
- D. Costanzo, F. Chiabrando, R. Lancellotta, A. Lingua; A. Quattrone, D. Sabia, A. Spanò, *Rilievo 3D e monitoraggio strutturale per l'analisi post-sisma del complesso di S. Nicola a Tolentino (MC)*, conferenza naz. ASITA 2017;
- M. Degli Azzi Vitelleschi, *La basilica di S. Nicola in Tolentino*, in Italia sacra, Torino, 1934;
- Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42: Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 Legge 6 luglio 2002, n. 137;
- M. A. Gomarasca, *Elementi di Geomatica*, Associazione Italiana di Rilevamento (AIT), Milano, 2004;
- S. Guideri, *Rocca San Silvestro, percorso didattico*, Editore Parchi Val di Cornia SPA, Piombino, 2005;
- G. Guidi, M. Russo, J.A. Beraldin, *Acquisizione 3D e Modellazione poligonale*, McGraw-Hill Companies srl. Publishing Group Italia, Milano, 2010;
- K. Kraus, *Fotogrammetria*, Vol. 1-Teoria e Applicazioni, Libreria Universitaria Levrotto & Bella Editrice, Torino, 1994;
- T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, J. Boehm, *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*, Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, 2014;
- M. Peripimeno, *Sperimentazione di tecniche 3D laser scanning per l'analisi e la conservazione del patrimonio archeologico e storico-monumentale*.

*Definizione di procedure e campi di utilizzo*, in «Atti del Convegno nazionale Sifet-Integrazione tra le tecniche innovative del rilievo del territorio e dei beni culturali», Palermo, 29-31 giugno 2005;

- F. Rinaudo, *Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione*, in F. Sacerdote, G. Tucci a cura di, *Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio*, Alinea Editrice, Firenze, 2007;

- S. Romano, D. Benati, *Il Cappellone di San Nicola a Tolentino*, a cura del Centro studi "Agostino Trapè", Milano, 1992;

- B. Rossi, G. M. Rossino, *Appunti di storia dell'industria dei leganti nel Monferrato*, Associazione "Il Cemento" Casale Monferrato, 2010;

- Marta Saccocci, *Il Paraboloido di Casale Monferrato, Una proposta progettuale di rifunzionalizzazione, tesi di laurea in Architettura - Restauro e Valorizzazione*, Politecnico di Torino, a.a. 2011-2012, rel. Prof.ssa Clara Bertolini Cestari;

- G. Sammartano, A.T. Spanò (2018), *Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: Accuracy and geometric contents validation in multi-sensor survey and stand-alone acquisition*, Applied Geomatics, 2018, pp. 1-23;

- A. Semplici, *Guida al Parco archeominerario di San Silvestro*, Editore Parchi Val di Cornia SPA, Piombino, 2011;

- A.T. Spanò, Dispense, "Celerimensura / Polari cartesiane", a.a. 2014/2015;

- A.T. Spanò, Dispense Workshop, "Fotogrammetria digitale e scansioni 3D per il rilievo di Beni Culturali", a.a. 2015/2016;

- A.T. Spanò, Dispense, "Fotogrammetria digitale e scansioni 3D", a.a. 2016/2017;

- A.T. Spanò, Dispense, “Fotogrammetria digitale e scansioni 3D”, a.a. 2017/2018;
  
- A. Spanò, G. Sammartano, *High scale 3D Modelling and ortophoto of curved masonries for a multipurpose representation, analysis and assesment*, in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, pp 245-252;
  
- A. Spanò, E. Donadio, F. Chiabrando, *Modelli 3D densi tra esperienze didattiche e ricerche di soluzioni fruibili*, in, “SCAVI AD AQUILEIA III. Aquileia, l’insula tra Foro e porto fluviale Lo scavo dell’Università degli Studi di Trieste 1. La strada”, Trieste, EUT Edizioni Università di Trieste, 2017, pp. 37-56;
  
- A. Spanò, E. Donadio, F. Chiabrando, *Modelli 3D densi tra esperienze didattiche e ricerche di soluzioni fruibili*, in, “SCAVI AD AQUILEIA III. Aquileia, l’insula tra Foro e porto fluviale Lo scavo dell’Università degli Studi di Trieste 1. La strada”, Trieste, EUT Edizioni Università di Trieste, 2017, pp. 79-100;
  
- E. Stylianidis, A. Georgopoulus, F. Remondino, *Basics of image-based modelling techbques in cultural heritage 3D Recording*, in *3D Recording, documentation and management of cultural heritage*, edited by Efstratios Stylianidis and Fabio Remondino, 2016, pp. 253-304;
  
- L. Surace, *La Georeferenziazione delle informazioni territoriali*, in *GeoforUS, Geography & Technology Network*, 2010;
  
- G. P. Vassena, M. Sgrenzaroli, *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner*, Starrylink Editrice, Brescia, 2007;

## **Indice degli Acronimi**

**UAV:** Unmanned Aerial Vehicle

**LIDAR:** Light Detection and Ranging

**ICOMOS:** International Council of Monuments and Sites

**SfM:** Structure from Motion

**GNSS:** Global Navigation Satellite System

**GPS:** Global Position System

**RTK:** Real Time Kinematic

**ABM:** Area Based Matching

**FBM:** Feature Based Matching

**RM:** Relational Matching

**N,E,Q:** Coordinate Nord, Est, Quota

**ATP:** Automatic Tie Points

**GCP:** Ground Control Points

**CP:** Control Points

**DEM:** Digital Elevation Model

**DTM:** Digital Terrain Model

**ICP:** Iterative Closest Point

**GIS:** Geographic Information System

**sqm:** Scarto Quadratico Medio

**GSD:** Ground Sample Distance

**DIRECT:** Disaste Recovery Team

**DAD:** Dipartimento di Architettura e Design

**DIATI:** Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

**DISEG:** Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica

**SLAM** Simultaneous Localization and Mapping

**UTM:** Universal Tranverse of Mercatore

**WGS84:** World Geodetic System1984

**GIS:** Geographic Information System

## **Sitografia**

- <https://gisgeography.com/dem-dsm-dtm-differences/>
- [https://didattica.polito.it/team\\_studenteschi.html](https://didattica.polito.it/team_studenteschi.html)
  - [https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_satellitare\\_globale\\_di\\_navigazione](https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema_satellitare_globale_di_navigazione)
  - [https://it.wikipedia.org/wiki/Proiezione\\_universale\\_trasversa\\_di\\_Mercatore](https://it.wikipedia.org/wiki/Proiezione_universale_trasversa_di_Mercatore)
- <http://www.sannicoladatolentino.it/vicende-storiche-e-costruttive.html>
  - <http://www.sannicoladatolentino.it/2.3-cappella-ss-sacramento.html>,2008.
- <http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/cartoteca.html>
- <http://www.patrimoniopubblicoitalia.it/it-it/Immibile/Dettaglio/635>.

## **Software utilizzati**

Agisoft Photoscan  
Autodesk AutoCAD  
Adobe Indesign  
Adobe Illustrator  
Adobe Photoshop  
PointCAB  
3D Reashaper  
Cloud Compare  
FARO Scene  
QGIS 2.18