

# ARCHITETTURE COMPLESSE: un rilievo integrato e multifunzionale per la mappatura completa del Palazzo dell'Emiro, Kogon (UZBEKISTAN)

L. Gorgoglione <sup>a</sup>, R. Pierdicca <sup>a</sup>, E. S. Malinverni <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Università Politecnica delle Marche, Via Brecce Bianche, 12, 60131 Ancona, Italy - (l.gorgoglione, r.pierdicca, e.s.malinverni)@staff.univpm.it

**Parole chiave:** Patrimonio Culturale, Rilievo Integrato, Scansione Laser, Ortoimmagine, Fotogrammetria.

**Key words:** Cultural Heritage, Integrated Survey, Laser Scanning, Orthoimage, Photogrammetry.

## Abstract

La documentazione dei Beni Culturali, specialmente nel contesto delle Architetture Complesse, costituisce una sfida attuale, considerando le nuove metodologie di acquisizione dati e l'ampia mole di informazioni potenzialmente ottenibile. Diviene quindi cruciale adottare un approccio multidisciplinare e sfruttare congiuntamente varie tecniche geomatiche. Il presente studio ne rappresenta un'esemplificazione, dimostrando la necessità di integrazione tra pratiche tradizionali e moderne. Il presente articolo delinea l'iter intrapreso per la ricostruzione 3D completa di una struttura architettonica complessa: il Palazzo dell'Emiro a Kogon, in Uzbekistan. Data la dimensione e gli elementi decorativi, il principale ostacolo consisteva nel mantenere una definizione accurata senza compromettere la precisione metrologica. L'approccio adottato ha coniugato la tecnologia TLS con quella UAV per realizzare la ricostruzione tridimensionale. In parallelo, si è fatto largo uso di una rete topografica estremamente precisa, che ha agevolato l'integrazione delle nuvole di punti prodotte. Un ulteriore contributo di rilievo emerso dallo studio è rappresentato dall'impiego delle immagini panoramiche derivanti dalla tecnica TLS, unitamente alle mappe di profondità. Questa combinazione ha consentito la creazione di ortofoto altamente dettagliate, funzionali alla realizzazione di disegni in scala 1:20.

Va altresì sottolineata la natura collaborativa di tale ricerca, realizzata in partnership tra il mondo accademico e le PMI. Questo lavoro si configura come un eccellente esempio, da condividere all'interno della comunità di ricerca operante nel campo della rappresentazione e ottimizzazione tridimensionale. Le metodologie innovative sviluppate si rivelano strumenti fondamentali per la produzione di rappresentazioni 3D e disegni affidabili destinati a molteplici scopi, costituendo il punto di partenza imprescindibile per ciascun tipo di progetto.

The documentation of Cultural Heritage, especially in the context of Complex Architecture, is a current challenge, considering the new data acquisition methodologies and the vast amount of information that can potentially be obtained. It therefore becomes crucial to adopt a multidisciplinary approach and to jointly exploit various geomatic techniques. This study exemplifies this, demonstrating the need for integration between traditional and modern practices. This article outlines the process undertaken for the complete reconstruction in 3D format of a complex architectural structure: the Emir's Palace in Kogon, Uzbekistan. Given its size and decorative elements, the main obstacle was to maintain accurate definition without compromising metrological accuracy. The approach adopted combined TLS technology with UAV to achieve three-dimensional reconstruction. In parallel, extensive use was made of an extremely precise topographic network, which facilitated the integration of the point clouds produced. A further major contribution that emerged from the study was the use of panoramic images from the TLS technique, in conjunction with depth maps. This combination enabled the creation of highly detailed orthophotos, which were functional to produce 1:20 scale drawings.

The collaborative nature of this research, carried out in partnership between academia and SMEs, should also be emphasised. This work stands as an example of excellence, to be shared within the research community working in the field of three-dimensional representation and optimisation. The innovative methodologies developed prove to be fundamental tools to produce reliable 3D representations and drawings for multiple purposes, constituting the essential starting point for each kind of project.

## 1. Introduzione

Il Governo della Repubblica dell'Uzbekistan (GoU) riconosce l'urgente necessità di un approccio globale alle città di medie dimensioni nel Paese. A tal fine, è stata richiesta l'assistenza della Banca Mondiale per lo sviluppo di un programma nazionale che andrà ad affrontare le sfide principali per migliorare la qualità della vita, la gestione urbana e la fornitura di servizi, utilizzando le migliori pratiche riconosciute a livello internazionale. Il "Progetto di Sviluppo Urbano Integrato delle Città di Medie Dimensioni" (MSCIUDP) mira a sostenere il Governo uzbeko nel migliorare la qualità della vita di alcune città di medie dimensioni in Uzbekistan. Il progetto prevede investimenti dimostrativi selezionati per migliorare le infrastrutture urbane, gli spazi pubblici e l'accesso ai servizi. A tal fine, sono stati identificati diversi siti del patrimonio culturale da restaurare e riutilizzare, e sono stati forniti servizi

di supervisione della costruzione per diversi beni del patrimonio culturale selezionati nella città di Kogon. Questo articolo descriverà l'intero progetto, con un'attenzione particolare al ruolo specifico del mondo accademico nella preparazione, valutazione e validazione dei complessi dati geomatici derivati dal rilievo integrato.

In particolare, l'articolo illustrerà il lavoro condotto sul Palazzo dell'Emiro di Bukhara, che rappresenta un caso di studio interessante per le sue dimensioni, la complessità e l'articolato apparato decorativo. Questa ricerca contribuirà in modo significativo al crescente corpus di conoscenze sul restauro e il riuso adattivo dei siti del patrimonio culturale, fornendo spunti preziosi sia per gli operatori che per i responsabili delle politiche. Nel dettaglio, questa ricerca aggiunge nuove esperienze sulla piena integrazione delle tecniche geomatiche, incentrando gli sforzi sulla definizione di accuratezza data da una rete topografica molto precisa. Si dimostrerà che, sebbene

le nuove tecniche di acquisizione siano in grado di automatizzare sia l'acquisizione che l'elaborazione, la realizzazione di una base metrologica molto solida fornisce una solida struttura portante alle successive fasi di intervento. Un altro importante contributo consiste nell'integrazione di pipeline sia fotogrammetriche che laser scanner, per ottenere la massima risoluzione anche in ambienti riccamente decorati.

## 2. Stato dell'arte

L'Architettura Uzbeka rappresenta le pagine di storia del suo popolo, ma i cambiamenti climatici e i disastri naturali, così come le attività umane, rappresentano un'enorme minaccia per la sopravvivenza di questo Patrimonio Culturale. Lo studio di architetture storiche complesse parte necessariamente da una rappresentazione grafica dettagliata e geometricamente accurata, che consente un'analisi e una comprensione completa del loro sviluppo planimetrico e volumetrico, delle loro caratteristiche strutturali, materiche e costruttive e del loro stato di conservazione (Carraro et al., 2019; Monego et al., 2019; Tucci et al., 2019).

L'integrazione di diverse tecniche geomatiche è sempre necessaria per condurre rilievi metrici di questo tipo di strutture architettoniche. Questi rilievi non sono condotti per il solo scopo di misurare, ma piuttosto per supportare analisi precise e la pianificazione di interventi di conservazione e restauro, nonché di interventi di gestione. Ognuna di queste azioni richiede un tipo di rilievo metrico distinto, con contenuti descrittivi e metrici diversi. La scelta di cosa, dove e quando utilizzare le diverse tecnologie dipende fortemente dai requisiti finali del modello 3D (Rinaudo & Scolamiero, 2021). In alcuni casi, parti diverse dello stesso edificio possono richiedere tipi di rilievi distinti. Pertanto, l'impiego di più tecniche di rilievo metrico rappresenta un approccio pratico ed efficace in termini di costi (Fassi, 2007; Owda et al., 2018; Previato et al., 2022). L'attuale tendenza a integrare diverse tecniche di misurazione è ulteriormente supportata dal fatto che ogni tecnica (come la fotogrammetria aerea e terrestre, la scansione laser, lo SLAM, ecc.) ha i propri limiti in termini di accuratezza raggiungibile e grado di dettaglio. Quindi, un approccio integrato tra l'uso di TLS - Terrestrial Laser Scanner e la fotogrammetria aerea o UAV - Unmanned Aerial Vehicle permette di sfruttare il potenziale di entrambe le tecniche ed ottenere la migliore completezza e qualità delle rappresentazioni risultanti (Barba et al., 2019; Hassan et al., 2019).

In generale, un TLS fornisce solitamente informazioni sulle facciate degli edifici, mentre la fotogrammetria aerea può fornire la prospettiva dei tetti degli stessi. In questo studio, un sistema UAV e un TLS sono stati utilizzati in un progetto integrato per acquisire nuvole di punti 3D e facilitare l'acquisizione di informazioni complete su un oggetto di interesse culturale (Xu et al., 2014). Quindi, gli UAV con la tecnologia di elaborazione delle immagini sono stati utilizzati per ottenere dati di nuvole di punti per superare e compensare i limiti del laser scanner, anche se il suo utilizzo è stato limitato dalla sua mancanza di precisione (Moon et al., 2019). Questo tipo di documentazione sarà molto importante non solo per il progetto in corso, ma anche come documentazione della situazione prima e dopo i lavori di restauro. L'approccio integrato apre nuove opportunità di rappresentazione e visualizzazione accurata e dettagliata di nuvole di punti e ortofoto ad alta risoluzione.

## 3. Metodologia

### 3.1 Caso Studio

Il Palazzo dell'Emiro si trova a 12 km dal lato est del quartiere storico della città di Bukhara, Patrimonio dell'Umanità. All'inizio, il nome del quartiere era "Nuova Bukhara", ma ora quest'area è conosciuta come Kogon. Lo scopo della costruzione del Palazzo dell'Emiro di Bukhara fu l'espansione dell'Impero russo in Asia centrale nella seconda metà del XIX secolo. Il palazzo fu costruito nel 1895 dall'Emiro Seid Abdulahad Khan, appartenente all'ultima dinastia regnante dell'Emirato di Bukhara, appartenente all'Impero russo. Infatti, l'architettura del Palazzo è stata realizzata dal famoso architetto russo Leonty Nikolaevich Benoaga e progettata secondo gli stili architettonici mauritano, arabo e barocco, con il supporto di maestri di Bukhara e russi. La funzione principale del Palazzo era l'accoglienza degli ospiti; pertanto, l'edificio fu progettato con tutti i servizi necessari: camere per gli ospiti, ristoranti, salotti, camere da letto, bagni e lussuose sale d'attesa. Alcune immagini del Palazzo sono riportate nella Figura 1.



Figura 1. Foto degli esterni e degli interni dell'Emir Palace.

L'edificio ha una struttura e una composizione complesse, basate sul principio dell'uguale percezione visiva da tutti i lati. La configurazione architettonica si basa su una sapiente combinazione di volumi di varie dimensioni, che presentano forme e conformazioni notevolmente eterogenee nella loro pianta (vedi Figura 2). Questa disposizione è articolata attraverso l'organizzazione di ampi spazi cerimoniali lungo l'asse longitudinale, con una sala di eccezionale rilevanza che spicca tra di esse.



Figura 2. Pianta del sito: Emir Palace e dintorni.

Nel complesso, l'edificio si caratterizza per la presenza di tre porte d'ingresso, distribuite su tre lati distinti della struttura.

L'ingresso principale conduce attraverso un arco aperto a un solo piano, dietro il quale si trova il volume del secondo piano e un padiglione leggermente voltato, che corona l'intera composizione con una caratteristica cupola decorativa. All'interno, numerose decorazioni intagliate ricoprono i pilastri e le travi. Innumerevoli colonne, grandi cupole e minareti fanno apparire il palazzo più grandioso.

La struttura edilizia presenta condizioni generali che possono essere considerate critiche. Emerge una leggera deformazione dell'edificio, attribuibile agli eventi sismici risalenti a circa 130 anni fa. Tale deformazione è associata alla presenza di fessurazioni verticali rilevate sulle pareti. Pertanto, si rende indispensabile l'adozione di interventi di rinnovamento per rimpiazzare i materiali obsoleti e garantire la stabilità e l'integrità dell'intero sistema tetto.

Oggi l'edificio è un monumento storico statale, di proprietà del governo dell'Uzbekistan, ed è noto come Palazzo della Cultura dei Ferrovieri (Pochekaev, 2018).

### 3.1 Rilievo geomatico

Considerando i requisiti specifici del progetto, la metodologia di rilievo adottata è volta a promuovere l'uso integrato di diversi sensori al fine di ottenere un modello 3D competitivo dell'edificio. Il perseguimento di una metodologia "best practice" è stato un punto focale sia nella fase iniziale che in quella operativa delle attività svolte.

È stato effettuato un accurato rilievo topografico e architettonico utilizzando le più moderne attrezzature quali laser scanner con fotocamera digitale integrata, UAV, ricevitore GNSS e stazione totale. In particolare, il rilievo richiesto sarà utilizzato come base per una chiara mappatura delle diverse tecniche costruttive e per l'identificazione dei diversi tipi di degrado, senza considerare che la documentazione prodotta sarà molto importante per tenere traccia della situazione prima e dopo i lavori di restauro.

La definizione della scala di rappresentazione comporta la progettazione della campagna di acquisizione, considerando sia i parametri che i tempi di acquisizione. I sistemi geomatici scelti per questa indagine sono i seguenti:

- drone (Fotogrammetria): DJI Phantom 4 RTK
- Laser Scanner: Faro Focus<sup>M70</sup> CAM2



Figura 3. Strumenti utilizzati per il rilievo 3D: a. DJI Phantom 4 RTK per la fotogrammetria aerea Close-range; b. Faro Focus<sup>M70</sup> CAM2.

Ogni tecnica di rilievo richiede procedure di raccolta dati diverse e ogni tecnica è caratterizzata da una diversa accuratezza e risoluzione. Pertanto, come spiegato di seguito, è stato effettuato un rilievo TLS in tutti gli spazi esterni e interni accessibili in cui era richiesta un'accuratezza in scala 1:20.

Nel frattempo, la fotogrammetria digitale automatica con immagini UAV è stata presa in considerazione per il rilievo di alcune aree inaccessibili del complesso, dove si poteva accettare un'accuratezza inferiore e una scala 1:50/1:100, come i tetti e

alcune parti alte delle facciate dell'edificio principale. I dati raccolti sono riportati nella Tabella 1 e descritti in dettaglio qui di seguito.

SISTEMA	SENSORE	DATASET
UAV	DJI Phantom 4 RTK	1468 immagini
TLS	Faro Focus <sup>M70</sup> CAM2	146 singole scansioni

Tabella 1. Panoramica generale del sensore impiegato e dei dati acquisiti.

#### 3.1.1 Acquisizione dei dati

Le operazioni di rilievo sono state effettuate utilizzando il laser scanner Faro Focus<sup>M70</sup> (Tabella 2). Si tratta di uno scanner laser ad alta precisione con una telecamera HDR integrata che acquisisce immagini a colori ad alta risoluzione durante il processo di scansione. La fotocamera può anche catturare immagini panoramiche, che in questo caso erano essenziali per l'ulteriore elaborazione. Sono stati posizionati numerosi marker ad alto contrasto sulla maggior parte delle superfici verticali (pareti delle stanze, cortili, ove possibile, e facciate), con l'obiettivo di avere almeno due marker visibili da ogni posizione di scansione. Parallelamente, tutti i marcatori sono stati rilevati con una stazione totale (Leica TS-02), in modo da creare una rete poligonale all'interno di un sistema di riferimento locale (Figura 5).

Faro Focus <sup>M70</sup> CAM2 - Scheda tecnica	
Laser scanner	
<i>Classe del Laser</i>	Classe 1
<i>Range</i>	fino a 70 m
<i>Accuratezza della misurazione</i>	±1mm
<i>Velocità di misurazione</i>	fino a 976,000 punti al secondo
<i>Campo visivo</i>	360° x 305°
Camera	
<i>Risoluzione della fotocamera HDR integrata</i>	165 megapixel
<i>Range della fotocamera HDR integrata</i>	fino a 135 m

Tabella 2. Faro Focus<sup>M70</sup> CAM2 Scheda tecnica: caratteristiche principali.

Il laser Faro Focus<sup>M70</sup> è stato utilizzato per creare la nuvola di punti 3D del Palazzo. Tutte le stanze del primo e del secondo piano, come anche le facciate esterne, sono state scansionate posizionando diversi target. In totale il palazzo è stato scansionato da 146 posizioni (Figura 4). Il numero di stazioni TLS e la loro posizione concreta dipendono dalla topografia, dal rapporto tra altezza dell'edificio e larghezza della strada, dalla presenza di veicoli e persone, ecc. Pertanto, per registrare tutte le nuvole di punti è stato utilizzato un metodo di registrazione basato sui target. Per misurare le coordinate di ciascun target, sono stati stabiliti dei punti di controllo all'esterno e all'interno del palazzo, al primo e al secondo piano. In totale, sono stati contattati 34 punti di controllo all'interno della rete topografica. La rete è stata unita anche al secondo piano dell'edificio, mentre in questo documento sono riportate solo le registrazioni del primo. Il metodo dei minimi quadrati è stato utilizzato per regolare questi punti di controllo utilizzando il software STARNET. La deviazione standard della propagazione dell'errore è stata stimata al massimo in 1 sm (Tabella 3). Quindi, a partire da questi punti di controllo, sono state stimate le coordinate di ciascun punto bersaglio utilizzando la stazione totale Leica TS-02.



Figura 4. Vista dall'alto delle posizioni delle scansioni TLS.

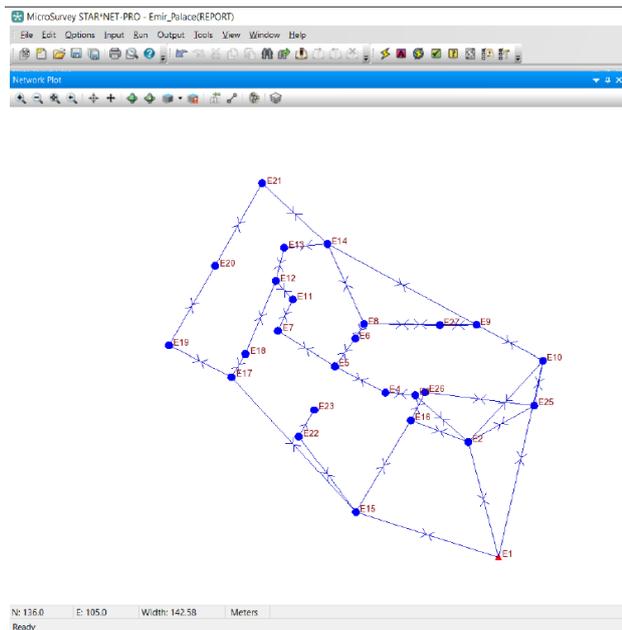


Figura 5. Poligonale chiusa con stazione totale e rete di punti di controllo. Esempio del primo piano.

Stazione	X	Y	Z
E1	0.000000	0.000000	0.000000
E2	0.000555	0.002114	0.002222
E10	0.001734	0.002796	0.002428
E15	0.002568	0.001851	0.002596
E3	0.002853	0.003180	0.002617
E16	0.002292	0.002129	0.002410
E25	0.001481	0.002588	0.002435
E4	0.003994	0.003207	0.002652
E9	0.003604	0.003113	0.002714
E5	0.003411	0.003335	0.002709
E6	0.003833	0.004024	0.002730
E7	0.004224	0.004132	0.002924
E8	0.003684	0.003360	0.002732
E14	0.004371	0.003684	0.002948
E27	0.004652	0.003110	0.002781
E11	0.004432	0.004616	0.002938
E12	0.004204	0.004318	0.002935

E13	0.004517	0.004012	0.002958
E18	0.003844	0.004747	0.003177
E21	0.005493	0.004588	0.003437
E17	0.003453	0.004112	0.003185
E22	0.003810	0.004321	0.003455
E26	0.002745	0.002575	0.002486
E20	0.004934	0.005216	0.003609
E19	0.004441	0.005013	0.003444
E23	0.005003	0.006830	0.003679
Deviazione standard			<1sm

Tabella 3. Deviazioni standard delle coordinate della stazione (metri).

Phantom 4 RTK – Scheda tecnica	
<b>Drone</b>	
<i>Peso al decollo</i>	1391 g
<i>Altitudine massima sul livello del mare</i>	6000 m
<i>Autonomia di volo</i>	circa 30 minuti
<b>Camera</b>	
<i>Sensore</i>	1" CMOS; Pixel effettivi: 20M
<i>Ottica</i>	Campo visivo (FOV) 84°; 8.8mm/24mm (35mm equivalente al formato) f/2.8 - f/11 autofocus 1m - ∞
<i>ISO range</i>	100 - 3200 (automatico) 100- 12800 (manuale)
<i>Dimensione massima dell'immagine</i>	4864×3648 (4:3) 5472×3648 (3:2)

Tabella 4. DJI Phantom 4 RTK Scheda tecnica: caratteristiche principali.

L'acquisizione delle immagini tramite UAV è stata effettuata con un drone DJI Phantom 4 RTK. Per ottenere un'acquisizione più appropriata, sono stati effettuati tre voli per raccogliere dati dall'area esterna in modalità manuale e per evitare la mancanza di connessione GNSS dovuta alla complessità urbana intorno al complesso. I set di dati sono stati acquisiti con una configurazione di camera nadir e obliqua e poi integrati in un unico progetto fotogrammetrico per ottenere un modello aereo completo dell'area (Figura 6).

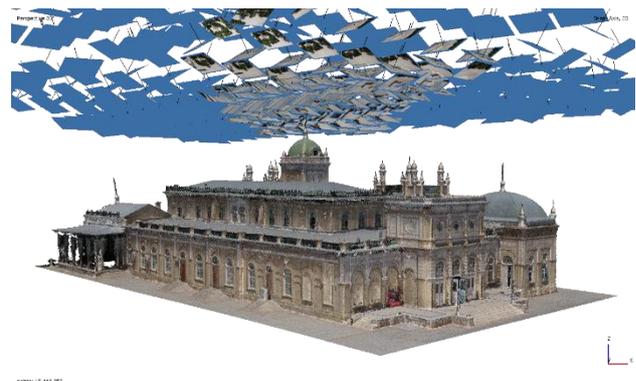


Figura 6. Nuvola di punti fotogrammetrica UAV.

### 3.1.2 Elaborazione dei dati

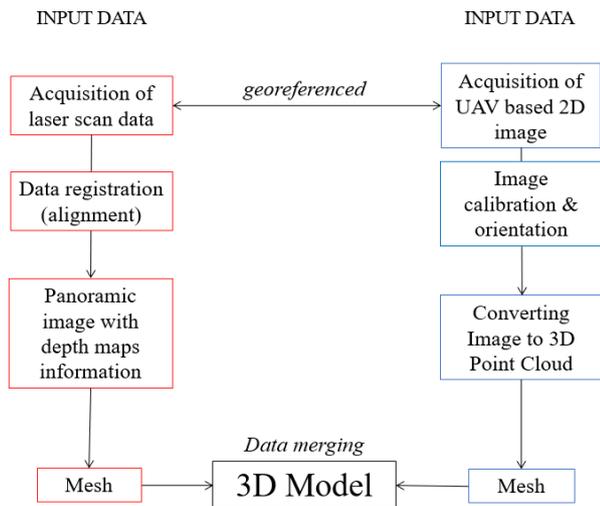


Figura 7. Metodologia - Workflow.

Per generare il modello 3D, le nuvole di punti ottenute dal laser e dall'immagine panoramica sono state elaborate con il software Metashape Agisoft®, che ha registrato tutti i set di dati utilizzando un sistema di riferimento comune (coordinate locali), con origine nel punto in cui si trovava ogni stazione. Ma prima è stato necessario eseguire i seguenti passaggi (illustrati anche nella Figura 7):

- elaborazione delle immagini per convertire le immagini bidimensionali acquisite dall'UAV in dati di nuvole di punti 3D;
- esportazione delle immagini panoramiche e delle mappe di profondità acquisite dal laser scanner (Figura 8);
- trasformazione in scala e coordinate dei dati fotogrammetrici per la fusione con i dati di scansione laser;
- ottimizzazione dei dati per facilitare l'interoperabilità e la gestione dei dati.

Per ottenere una chiara mappatura delle diverse tecniche costruttive e per identificare i diversi tipi di degrado presenti, non è stato fatto un lavoro diretto sulle nuvole di punti, sebbene fossero molto dense. Ma il flusso di lavoro SfM - Structure from Motion si è basato sulle foto panoramiche acquisite da TLS per generare un modello di superficie.

ACQUISIZIONE DATI		ELABORAZIONE DATI	
SENSORI	IMMAGINI	PRODOTTI E FUNZIONAMENTO	SOFTWARE
Fotogrammetria terrestre Close - range	Sferiche	Nuvola di punti Approccio SfM	Agisoft ® Metashape
Fotogrammetria aerea Close - range	Frame		

Tabella 5. Acquisizione ed elaborazione dati

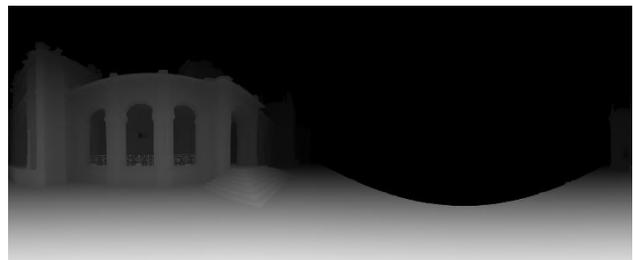
Dopo aver caricato tutte le immagini e i dati della scansione laser nel progetto Metashape, non è stato eseguito il tradizionale flusso di lavoro di costruzione del modello, ma è stato utilizzato uno speciale script per poter allineare le panoramiche sferiche. L'allineamento viene quindi eseguito utilizzando i punti corrispondenti tra le scansioni, che vengono utilizzati per

triangolare le posizioni delle telecamere nello stesso spazio durante il rilievo. Al termine dell'allineamento, la mesh viene generata sulla base di mappe di profondità, che utilizzano correttamente i dati di profondità della scansione laser e incorporano queste informazioni nel processo di ricostruzione delle mappe di profondità dell'immagine digitale.

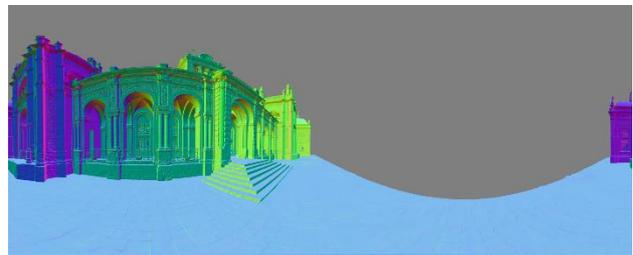
Questa procedura è stata eseguita sia per l'elaborazione degli interni che degli esterni del Palazzo dell'Emiro, ma separatamente, poiché erano richieste scale di dettaglio differenti.



a.



b.



c.

Figura 8. Esempio di immagini panoramiche da scanner laser: a. diffusa; b. mappe di profondità; c. normale.

Per ottenere una mesh completa dell'esterno dell'edificio, è stato necessario integrare alla mesh ottenuta attraverso l'elaborazione delle scansioni da TLS la mesh prodotta dalla nuvola di punti ricostruita con immagini UAV. Se le scansioni TLS sono essenziali per migliorare i dettagli della superficie, le scansioni UAV forniscono informazioni generali sulla geometria della scena. L'accuratezza limitata di queste ultime a livello di immagine è considerata sufficiente per rivelare la forma e la struttura della superficie.

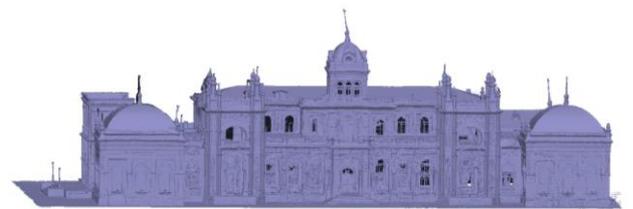


Figura 9. Unione delle Mesh.



Figura 11. Ortofoto ad alta risoluzione in scala 1:50. Esempio della facciata principale.

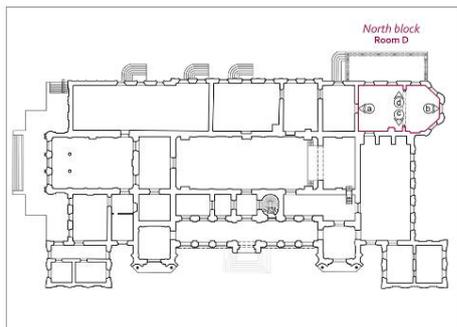


Figura 10. Ortofoto ad alta risoluzione in scala 1:20. Esempio della Sala D: mesh e ortofoto

L'integrazione delle due superfici migliora la completezza della copertura, consentendo la modellazione di dettagli e oggetti complessi del patrimonio. La mesh globale del Palazzo risulta avere un livello di dettaglio leggermente inferiore a causa della differenza di risoluzione tra le immagini sferiche e quelle fotogrammetriche, pur mantenendo un livello di dettaglio in scala 1:50.

Mentre, per ogni spazio interno rilevato, circa 30 stanze, è stato realizzato un progetto individuale per raggiungere il livello di dettaglio richiesto in scala 1:20.

Le informazioni sul colore ottenute dalla fotocamera dello scanner sono state poi utilizzate per generare le varie ortofoto necessarie per il progetto di restauro. Infatti, le ortofoto generate da mesh si ottengono elaborando un modello 3D basato su una mesh, ottenendo una proiezione ortogonale dell'oggetto fotografato (Xu et al., 2014). L'uso di ortofoto generate in tal modo è importante poiché fornisce un'immagine precisa e dettagliata dell'architettura in questione, consentendo l'identificazione precisa dei dettagli della struttura e la pianificazione di interventi di restauro mirati. In particolare, questo tipo di immagini può essere utilizzato per individuare lesioni, crepe e altri problemi strutturali che potrebbero essere difficili da rilevare con altre tecniche (Cera et al., 2017; Okada et al., 2016). Con la stessa procedura sono state ottenute le ortofoto dei prospetti esterni, delle sezioni longitudinali e delle piante del Palazzo e delle sue stanze, compresi i pavimenti e le ipografie (Figure 10 - 12).



Figura 12. Ortofoto ad alta risoluzione per la rappresentazione in scala 1:20. Dettaglio: ipografia.

#### 4. Risultati

Utilizzando un approccio basato sull'indagine in loco, sono stati generati modelli tridimensionali dell'edificio oggetto di studio e di quelle parti destinate all'analisi e al restauro. Sono state ottenute ortofoto rappresentanti le piante, le sezioni e i prospetti, accompagnate da disegni metrici di rilievo corrispondenti. Questa tipologia di documentazione si rivelerà cruciale non solo per il contesto del progetto in corso, ma altresì per la documentazione pre e post restauro.

Parallelamente, è stata effettuata un'ampia raccolta di dati e una ricerca storica al fine di approfondire la comprensione dell'evoluzione degli edifici e del loro contesto circostante, oltre ad acquisire altre informazioni rilevanti per il progetto, quali simili tipologie edilizie, legislazioni e norme applicabili, nonché localizzazione e proprietà dei servizi pubblici. Attraverso l'impiego delle metodologie precedentemente delineate, diversi stakeholder ed esperti hanno potuto condurre una varietà di analisi. Un risultato primario dell'attività svolta è stato la creazione di un'eshaustiva documentazione, flessibile e adattabile a diverse finalità. In particolare, il modello tridimensionale sviluppato si è dimostrato interattivo e interrogabile, consentendo la decomposizione dell'intero edificio secondo esigenze specifiche. Particolare attenzione è stata dedicata alla produzione di varie mappe di degrado e materiali, poiché tali rappresentazioni si rivelano strumenti essenziali all'interno di un progetto di restauro relativo a un edificio storico. Nel contesto del restauro di edifici storici, si è proceduto alla realizzazione di una mappa del degrado che illustra visivamente le attuali condizioni dell'edificio. Tale mappa ha lo scopo di evidenziare le aree soggette a degrado o deterioramento, rilevando tali problematiche sia nelle strutture portanti che nelle superfici e negli elementi ornamentali. Questa rappresentazione cartografica si è rivelata un elemento cruciale nell'individuazione delle priorità di intervento e nella definizione delle misure necessarie per il recupero dell'edificio nelle sue condizioni originarie. Inoltre, la mappa del degrado ha consentito di identificare i fattori esterni responsabili del deterioramento dell'edificio, quali inquinamento atmosferico, piogge acide e umidità. Un esempio di questo output è riportato nella Figura 13b. In modo analogo, è stata elaborata una mappa dei materiali, che graficamente illustra le diverse tipologie di materiali impiegate nella costruzione dell'edificio storico, quali pietra, mattoni, legno, ferro, vetro e altri ancora. Questa mappa ha dimostrato la sua utilità nell'identificare i materiali originali utilizzati nella costruzione dell'edificio, orientando così la scelta degli interventi di restauro più idonei per ciascun tipo di materiale coinvolto. Ad esempio, la mappa dei materiali può

mettere in evidenza l'utilizzo di pietre particolari, potenzialmente difficili da reperire, le quali richiedono un'attenzione e una cura speciali durante il processo di restauro (Figura 13a).

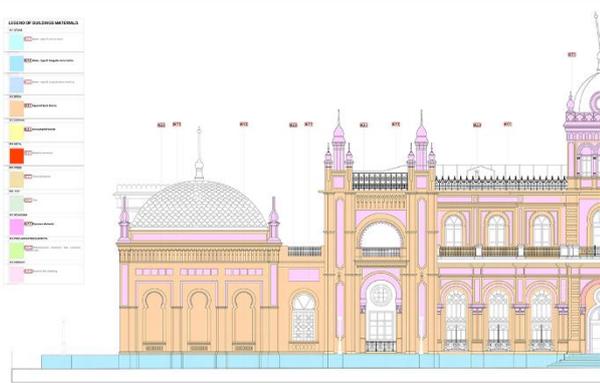
Sia la mappa del degrado che quella dei materiali risultano elementi fondamentali per la buona riuscita di un progetto di restauro. Questi strumenti agevolano l'individuazione degli interventi più appropriati per la salvaguardia e la conservazione dell'edificio storico, garantendo al contempo che il processo di restauro sia condotto secondo criteri scientificamente validi.

Diversi articoli scientifici hanno discusso l'importanza di questi strumenti nei progetti di restauro dei Beni Culturali. Ad esempio, uno studio di Franco et al. (2017) ha evidenziato l'importanza della mappatura del degrado nel restauro di edifici storici, dimostrando come questo strumento possa aiutare a identificare le cause del degrado e a guidare la selezione di interventi di restauro appropriati. Analogamente, uno studio di Ferreira et al. (2020) ha sottolineato l'importanza della mappatura dei materiali nel restauro dei beni culturali, discutendo l'importanza di identificare e caratterizzare i materiali originali utilizzati negli edifici storici per garantirne la corretta conservazione e preservazione.

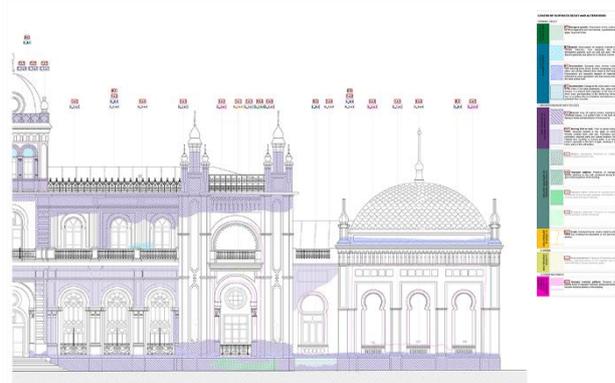
Il contributo del lavoro proposto va in questa direzione, sviluppando una strategia che consente a diversi esperti di cooperare all'interno dello stesso modello accurato, con un elevato grado di precisione. Infatti, una volta registrata la nuvola di punti 3D in Recap, il vantaggio di importarla in un software fotogrammetrico e di gestirla completamente al suo interno risiede nella possibilità di estrarre dati con il livello di dettaglio richiesto, scomponendo l'edificio in sotto elementi ed elaborando i diversi dati "on-demand".

#### 5. Conclusioni

In questo lavoro è stata proposta una combinazione di tecniche geomatiche per documentare un edificio complesso. Il lavoro, oltre ad adottare procedure consolidate, conferma l'importanza di sfruttare la rete topografica per la registrazione delle nuvole di punti TLS, con una precisione millimetrica per l'intero edificio. La rete poligonale è stata essenziale anche per la fusione dei dati fotogrammetrici e per la validazione dei successivi "sottoprodotti" dell'elaborazione. In conclusione, l'uso delle tecnologie della fotogrammetria e del laser scanner fornisce approcci diversi al rilievo di un Bene Culturale, ciascuno con i propri punti di forza e di debolezza. L'approccio fotogrammetrico è economicamente vantaggioso, ma il suo software per applicazioni a distanza ravvicinata è ancora limitato nella generazione automatica di modelli di superficie densi. L'approccio laser scanner, invece, è costoso ma è



a.



b.

Figura 13. Disegni di progetto: a. Mappatura dei materiali; b. Mappatura del degrado.

indispensabile per ottenere modelli accurati in casi complessi. Entrambe le metodologie richiedono un rilievo topografico per i test di qualità e procedure di georeferenziazione precise, e l'aspetto della modellazione diventa sempre più importante. Tuttavia, l'integrazione di questi due sistemi ha dimostrato di garantire un rilievo 3D rapido ed efficiente per architetture storiche complesse. Vale la pena sottolineare che, in casi come questo in cui non sono disponibili software commerciali per l'elaborazione dei dati TLS, l'integrazione della mappa di profondità dalle immagini panoramiche TLS può essere una valida alternativa per ottenere il massimo risultato possibile sia in termini di accuratezza che di qualità delle immagini; infatti, si potrebbero stampare ortofoto con una scala di rappresentazione inferiore a 1:20. La ricerca condotta mostra come la procedura di integrazione tra i due sistemi garantisca un rilievo 3D rapido ed efficiente per architetture storiche complesse, come il Palazzo dell'Emiro. Il lavoro, svolto in grazie ad una solida collaborazione tra mondo accademico e PMI, è un ottimo esempio (utile da condividere all'interno della comunità di ricerca che si occupa di rappresentazione e ottimizzazione 3D) di metodologie innovative sviluppate per produrre disegni e rappresentazioni 3D affidabili per diversi scopi, essendo il punto di partenza per ogni tipo di progetto.

### Ringraziamenti

Questo lavoro è stato in parte realizzato nell'ambito del progetto "Servizi di consulenza per la preparazione del progetto dettagliato, dei documenti di gara e della supervisione della costruzione per il restauro e il riutilizzo adattivo del palazzo dell'emiro e di alcuni beni culturali selezionati a Kogon" dal Ministero degli investimenti e del commercio estero della Repubblica dell'Uzbekistan. Gli autori desiderano ringraziare pertanto lo Studio Planarch s.r.l. di Roma e il Prof. Fulvio Rinaudo, Vicerettore dell'Università di Taschkent per l'opportunità di partecipare al progetto.

### Bibliografia

Barba, S., di Filippo, A., Limongiello, M., & Messina, B. (2019). Integration of active sensors for geometric analysis of the chapel of the Holy Shroud. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 149-156.

Carraro, F., Monego, M., Callegaro, C., Mazzariol, A., Perticarini, M., Menin, A., ... & Giordano, A. (2019). The 3d survey of the roman bridge of San Lorenzo in Padova (Italy): a comparison between sfm and tls methodologies applied to the arch structure. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.

Cera, M., Fiorini, L., & Chiabrando, F. (2017). UAV-based photogrammetric techniques for monitoring the structural health of large-scale heritage architecture. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42(2), 129-136.

Fassi, F. (2007). 3D modeling of complex architecture integrating different techniques—a critical overview. *3D-ARCH 2007 Proceedings: 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, ETH Zurich, *International Archives*

*of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 5.

Ferreira, V., Fernandes, I., Dias, A., & Pinto, A. (2020). Cultural heritage materials mapping: An overview of methodologies and techniques. *Journal of Cultural Heritage*, 43, 149-163.

Franco, R., Martín, J. F., & García-Gutiérrez, J. (2017). Mapping of decay in historic buildings: methodology and application to a case study. *Heritage Science*, 5(1), 1-16.

Hassan, A. T., & Fritsch, D. (2019). Integration of Laser Scanning and Photogrammetry in 3D/4D Cultural Heritage Preservation—A Review. *International Journal of Applied*, 9(4).

Monego, M., Previato, C., Bernardi, L., Menin, A., & Achilli, V. (2019). Investigating Pompeii: Application of 3D geomatic techniques for the study of the Sarno Baths. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 24, 445-462.

Moon, D., Chung, S., Kwon, S., Seo, J., & Shin, J. (2019). Comparison and utilization of point cloud generated from photogrammetry and laser scanning: 3D world model for smart heavy equipment planning. *Automation in Construction*, 98, 322-331.

Okada, Y., Ben-Dor, E., Shimizu, K., & Kushibiki, T. (2016). Photogrammetric and spatial 3D modeling for documentation and preservation of cultural heritage sites: Case study of the Tower of David, Jerusalem. *Journal of Cultural Heritage*, 17, 44-53.

Owda, A., Balsa-Barreiro, J., & Fritsch, D. (2018). Methodology for digital preservation of the cultural and patrimonial heritage: Generation of a 3D model of the Church St. Peter and Paul (Calw, Germany) by using laser scanning and digital photogrammetry. *Sensor Review*.

Pochekaev, R. (2018). New Bukhara: An Island of Russia in Central Asia. *Higher School of Economics Research Paper No. WP BRP*, 86.

Previato, C., Monego, M., Menin, A., & Achilli, V. (2022). A multi-scalar approach for the study of ancient architecture: Structure for Motion, laser scanning and direct survey of the Roman theatre of Nora (Cagliari, Sardinia). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 43, 103440.

Rinaudo, F., & Scolamiero, V. (2021). Comparison of multi-source data, integrated survey for complex architecture documentation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 46, 625-631.

Tucci, G., Rihal, S., Betti, M., Conti, A., Fiorini, L., Kovacevic, V. C., & Bartoli, G. (2019). Ground based 3d modelling (photogrammetry and tls)-survey, documentation and structural assessment of xx century cultural heritage in india—a case study of the masonry vaults in dehradun. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.

Xu, Z., Wu, L., Shen, Y., Li, F., Wang, Q., & Wang, R. (2014). Tridimensional reconstruction applied to cultural heritage with the use of camera-equipped UAV and terrestrial laser scanner. *Remote sensing*, 6(11), 10413-10434.