**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

FACOLTA' DI **INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea magistrale in **INGEGNERIA EDILE - ARCHITETTURA**

# TECNOLOGIE GEOMATICHE INTEGRATE PER L'ACQUISIZIONE E MODELLAZIONE DI ANTICHI MULINI DEL PICENO

# INTEGRATED GEOMATIC TECHNOLOGIES FOR THE ACQUISITION AND MODELLING OF ANCIENT MILLS IN THE PICENO REGION


Relatore: Chiar.ma

Prof.ssa Arch. **Eva Savina Malinverni**

Correlatore:

Ing. PhD **Francesco Di Stefano**

Tesi di Laurea di:

**Antonio Casamassa**


A.A. **2021 / 2022**

## ABSTRACT

*Italiano*

L'obiettivo principale del rilievo, è quello di studiare e documentare i manufatti presi in oggetto, come ad esempio quelli riconducibili al patrimonio costruito. I mulini ad acqua possono rappresentare un vero e proprio bene culturale se si considera la loro funzione socio-economica, spesso punti di riferimento di un territorio rurale, ma anche la fonte di divulgazione di un antico sapere e conoscenza.

Per tali motivi, questi edifici meritano valorizzazione sia come evidenza architettonica, sia sotto il profilo della ricerca storica, sia come attrattiva turistica e in funzione didattica. Sono stati una risorsa fondamentale in passato e possono continuare ad esserlo anche oggi sotto diverse forme.

La ricerca nel campo dei beni culturali, si sta spingendo sempre più verso una comunicazione digitale e i nuovi metodi di fruizione del patrimonio. Si ricorre all'impiego di strumenti e tecniche sempre più innovative che permettono di ridurre i tempi delle operazioni di rilievo sul campo e delle successive elaborazioni in laboratorio.

Lo scopo finale di questa tesi, dopo aver fatto un'analisi accurata delle diverse strumentazioni che permettono lo svolgimento del rilievo metrico, esaminandone caratteristiche, potenzialità e problematiche di ciascuna di esse, è quello di restituire un modello tridimensionale dei manufatti. Sono quindi indagate le diverse tecniche di rilievo, quello diretto, quello strumentale (in particolare l'utilizzo del laser scanner come strumento avanzato di rilevamento), e quello fotogrammetrico, che si serve della fotografia come base di misura.

*English*

The main objective of the survey, is to study and document the artifacts taken into consideration, such as those attributable to the built heritage. Water mills can represent a real cultural asset if we consider their socio-economic function, often landmarks of a rural area, but also the source of dissemination of ancient knowledge and know-how.

For these reasons, these buildings deserve valorization both as architectural evidence, from the point of view of historical research, and as a tourist attraction and in educational purpose. They have been a key resource in the past and can continue to be so today in various forms.

Research in the field of cultural heritage, is increasingly moving toward digital communication and new methods of heritage use. Increasingly innovative tools and techniques are being used to reduce the time of field survey operations and subsequent laboratory processing.

The final aim of this thesis, after making a thorough analysis of the different instrumentations that allow the performance of metric surveying, examining the characteristics, potential and problems of each of them, is to return a three-dimensional model of the artifacts. The different surveying techniques, the direct survey, the instrumental survey (particularly the use of the laser scanner as an advanced surveying tool), and the photogrammetric survey, which uses photography as the basis of measurement, are then investigated.

## INDICE

ABSTRACT

INDICE

1. INTRODUZIONE……..……..1

1.1 *Obiettivo della* tesi ……..……..……..1

1.2 *Metodologia di lavoro* ……..…..4

1.3 *Organizzazione della tesi*……..……5

2. STATO DELL'ARTE …….....7

2.1 *Dal patrimonio culturale ed artistico al patrimonio digitale* ……..…..7

2.2 *La Geomatica e i campi di applicazione* ……..…..8

3. CASO STUDIO ...…….……11

3.1 *I mulini idraulici*……..……11

3.2 *Il caso particolare dei mulini del Fluvione* ……..……..12

3.3 *Il censimento dei mulini idraulici nella regione Marche* ……..……..14

4. ACQUISIZIONE DEI DATI ……19

4.1 *Strumenti utilizzati* ……19

4.1.1 *Rilevatore GNSS Topcon Hiper HR* ……20

4.1.2 *Drone DJI Mavic Mini* ……..……21

4.1.3 *Fotocamera Sony Alpha 77* ……..…..23

4.1.4 *Laser scanner mobile GeoSLAM ZEB Horizon* ……25

4.2 *Esecuzione dei rilievi* ……27

5. PROCESSAMENTO DEI DATI ……..37

5.1 *Elaborazione dati della fotogrammetria* ……..37

5.2 *Registrazione dati da MLS (mobile laser scanner)* ……49

5.3 *Analisi delle nuvole di punti (C2C)*……..…..52

6. RISULTATI ……..61

*Allegati: Tav. 1 – Planimetria mulino "Pignoloni" scala 1:500*

*Tav. 2 – Prospetti mulino "Pignoloni" scala 1:200*

*Tav. 3 – Planimetria mulino "Santa Maria in Lapide" scala 1:500*

*Tav. 4 – Prospetto est mulino "Santa Maria in Lapide" scala 1:200*

*Tav. 5 – Prospetti sud e nord mulino "Santa Maria in Lapide" scala 1:200*

7. CONCLUSIONI ……...68

BIBLIOGRAFIA …….73

SITOGRAFIA ……..75

# 1. INTRODUZIONE

## *1.1 Obiettivo della tesi*

L'obiettivo principale della tesi è quello di documentare due mulini idraulici della Regione Marche, al fine di ottenere un modello complesso del bene architettonico, su cui poter elaborare in futuro un sistema informativo o un progetto di restauro. Tutto passa dal fornire un modello metricamente corretto dei beni architettonici e delle zone che ne sono sprovviste, attraverso un rilievo eseguito con diverse tecnologie da integrare tra di loro. La presente tesi vuole essere anche un mezzo tramite cui poter dare un contributo alla rinascita culturale, artistica e turistica di questi manufatti. Negli ultimi anni, a causa della pandemia mondiale dovuta al Covid-19, la popolazione è alla ricerca di luoghi da visitare in ambienti all'aperto. Questo potrebbe spingere ad investire sempre maggiormente nella rivalutazione di queste strutture, che in alcuni casi già sono stati trasformati in centri benessere, sauna, ma anche come strutture ricettive o ristoranti. A Montefortino (FM) uno di questi è stato trasformato in un agriturismo con possibilità di potervi trascorrere anche la notte.

**Fig. 1.1 e 1.2 Mulino idraulico di Montefortino (FM) trasformato in agriturismo e struttura ricettiva**

Sempre nelle Marche, in provincia di Pesaro, nel comune di Frontino, un vecchio mulino idraulico è stato oggetto di restauro. Alcuni dei locali interni sono diventati un vero e proprio museo dove vengono mostrate le antiche tecniche della macinazione del grano, mantenendo sempre la sua funzione originale, quella dell'attività molitoria.

**Fig. 1.3 Mulino idraulico di Frontino (PU) trasformato in un museo**

Il mulino di Muccia (MC) è stato invece coinvolto in un progetto transfrontaliero, finanziato dal programma di cooperazione tra Italia e Croazia; sono state attivate cinque azioni pilota in cinque aree italiane e croate. Le Marche in particolare hanno presentato il progetto per Muccia "One stop information center": nell'antico mulino di Muccia, nuovamente agibile dopo il sisma del 2016, è stato allestito un centro turistico informativo, dotato di strumenti e tecnologie innovative, per la promozione e l'accesso al sistema dei beni naturali e culturali dei comuni

**Fig. 1.4 Mulino idraulico di Muccia (MC)**

delle aree interne. Progetto che mira ad attenuare e frenare, attraverso la creazione di nuove attività, un dato sempre allarmante per le aree interne della Regione Marche. Progetto che vuole connettere digitalmente i borghi marchigiani delle aree interne con il resto del mondo.

Diversi sono gli utilizzi che si possono fare, dal recupero pieno della propria funzionalità molitoria (idraulica o idraulica-elettrica) alla creazione di una struttura didattico/museale. Per una programmazione più a lungo termine sono da seguire alcune linee strategiche propedeutiche agli interventi di valorizzazione che vanno dalla costruzione di scenari predittivi e analisi dei sistemi territoriali, nonché indagini diagnostiche per orientare le azioni di messa in sicurezza, consolidamento, riabilitazione strutturale, recupero e manutenzione degli edifici selezionati all'individuazione di nuovi percorsi di mobilità dolce (ciclabile, pedonale, trekking, segway, monopattini, etc.) di connessione tra i mulini selezionati e le reti di offerta turistica, culturale e naturalistica, con particolare riferimento ai passaggi dell'acqua. L'azione di tramandare il patrimonio culturale e paesaggistico presente alle nuove generazioni è imprescindibile dalla fase delle "conservazione". Proprio a tal fine, si devono creare le possibilità di ricostruire in maniera precisa, affidabile e certa una serie di dati, documenti e immagini in quanto saranno proprio questi, attraverso la loro elaborazione, a fornirci tutte le informazioni necessarie al conseguimento della loro conservazione nel tempo. Negli ultimi anni sono state individuate tante tipologie di edifici (anche di piccole dimensioni) come beni architettonici e paesaggistici rurali da salvaguardare, tutelare e valorizzare. Tra di essi vi sono edifici rurali, destinati non solo ad uso abitativo, ma anche destinati ad attività funzionali all'agricoltura come, ad esempio, i mulini ad acqua o a vento, i frantoi, i caseifici, etc.

Nella Regione delle Marche, è possibile incontrare parecchi edifici che un tempo, (alcuni lo sono tuttora) erano adibiti all'attività molitoria. Grazie alla presenza di parecchi corsi d'acqua, i mulini sono ben distribuiti in tutta la Regione. Per consentire la loro salvaguardia, la loro conservazione, e in alcuni casi anche la loro rinascita, sono state commissionate alcune ricerche per censire tutti i manufatti. In alcuni casi si tratta di piccoli o medi edifici, che grazie anche al loro paesaggio circostante, possono essere (magari con un ruolo diverso da quello per cui erano nati) punti strategici per le imprese artigianali e turistiche del luogo. Alcuni di loro purtroppo sono circondati da un silenzio sempre più assoluto, dopo che per secoli hanno rappresentato un elemento fondamentale della vita quotidiana. A volte si fa fatica a distinguerli da altre costruzioni, a sapere dove si trovano o come si possono raggiungere.

### *1.2 Metodologia di lavoro*

L'iter scelto per svolgere il lavoro è stato diviso in 3 fasi:

- acquisire una prima documentazione dei due mulini oggetto di studio e di analisi, attraverso l'impiego di diverse tecnologie al servizio del patrimonio culturale come: fotogrammetria UAV (Unmanned Aerial Vehicle) e laser scanner mobile con tecnologia SLAM (Simultanously Localization and Mapping);
- elaborare i dati proveniente dal rilievo fotogrammetrico e da laser scanner, attraverso l'utilizzo di software appositi per creare, strutturare e riorganizzare le informazioni;
- creare risultati in formato digitale, come modello tridimensionale, planimetria e prospetti;

Il lavoro rappresenta una base, utile per ulteriori approfondimenti, alla conoscenza esaustiva del bene architettonico e ne delinea una metodologia che, sfruttando le moderne tecnologie della Geomatica per il rilievo dei beni culturali, risulti applicabile anche in altri contesti. Inoltre, si vuole fornire tutti gli elementi possibili affinché si riesca, con l'utilizzo di tecnologie e software a costo relativamente basso, in tempi abbastanza rapidi, ad ottenere un modello tridimensionale in formato digitale. Questo permette una relativa facilità di divulgazione delle informazioni (metricamente precise) e dei documenti su piattaforme online, tramite tecniche di cloud computing, strumenti multimediali che le rendono facilmente reperibili e consultabili in modo semplice e rapido, coinvolgendo un pubblico sempre più vasto.

### *1.3 Organizzazione della tesi*

Il procedimento adottato per redigere questo lavoro, si base fondamentalmente sull'ordine cronologico delle varie fasi lavorative:

- Stato dell'arte: applicazioni delle tecniche e tecnologie geomatiche in ambito del patrimonio culturale,
- Caso studio: inquadramento storico e geografico dei due mulini idraulici analizzati;
- Acquisizione dei dati: strumentazione tecnica usata, descrizione della fase del rilievo e dati a supporto del rilievo;
- Processamento dei dati: software utilizzati, elaborazione dei dati, creazione della nuvola di punti, del modello tridimensionale;
- Risultati: elaborati digitali ottenuti;

È stato fatto largo utilizzo delle immagini, per una comunicazione visiva più diretta dei concetti e dei metodi attivati, offrendo una maggiore comprensione dei temi affrontati.

## 2. STATO DELL'ARTE

### *2.1 Dal patrimonio culturale ed artistico al patrimonio digitale*

Il patrimonio culturale ed artistico italiano è costituito, per la maggior parte, da un edificato storico ed artistico di elevata bellezza ed originalità e rappresenta un'importante risorsa per il Paese, non soltanto da un punto di vista culturale e attrattivo, ma anche economico. Preservare questa grande eredità del passato è un dovere morale prima ancora che strategico. Per raggiungere l'obiettivo strategico di una buona conservazione del Bene Culturale è necessaria una programmazione che sia attenta e coinvolga tutti gli attori che dovranno interagire nella fornitura dei dati utili per la gestione e valorizzazione del Bene Culturale a medio e lungo termine.

Lo sviluppo tecnologico degli ultimi anni ha prodotto strumenti nuovi ed innovativi a supporto della manutenzione e della conservazione del patrimonio storico. La Geomatica, complesso delle discipline e delle tecnologie dirette all'acquisizione, elaborazione, archiviazione, rappresentazione e distribuzione di dati ed informazioni geografiche, ha un ruolo molto importante ai fini della conservazione e della valorizzazione dei Beni Culturali.

A causa dei rischi oggettivi (terremoti, catastrofi, vandalismi, invecchiamento, sviluppo delle città e condizioni ambientali sfavorevoli) a cui è esposto il patrimonio culturale, prende sempre più piede l'idea di digitalizzare e produrre modelli 3D non solo di semplici manufatti, ma di interi edifici o addirittura di intere città (Tucci, 2016). Un vero e proprio processo di digitalizzazione su ampia scala; basti pensare a interi musei (ad esempio il museo degli Uffizi a Firenze), che hanno avviato progetti di digitalizzazione 3D dell'intero patrimonio archeologico, con l'intento di rendere fruibili a studenti di tutto il mondo i vari modelli 3D, ma anche come strumento di catalogazione e tutela nell'evenienza di disastri e perdite per cause diverse. Altre esperienze e progetti hanno coinvolto intere città con i loro punti o edifici più significativi coinvolti, come ad esempio il caso di Mosul in Iraq o di alcune città in Siria (oggetto di distruzione a cause delle diverse guerre che le hanno coinvolte) oppure in Nepal (dopo il terremoto). Rilievi digitali fatti per documentare lo stato di fatto attuale, anche in ottica di risalire alle forme di un tempo.

Si va verso un vero e proprio "Patrimonio Digitale" nella quale la Geomatica si occupa dalla "produzione" di dati digitali, al loro "uso" e "riuso". Riconosciuta l'importanza del dato digitale, la "Carta sulla Conservazione del Patrimonio Digitale" adottata dall'UNESCO nel 2003, considera i beni digitali, oltre che strumento di analisi e comunicazione, meritevoli essi stessi di tutela.

### *2.2 La Geomatica e i campi di applicazione*

Con la realizzazione di un modello tridimensionale di un bene culturale, attraverso gli strumenti della Geomatica, si possono realizzare molteplici obiettivi:

- ricostruzioni 3D, documentazioni, database per restauri, interventi e attività di conservazione;
- creazione di superfici e mesh;
- gestione ed analisi spaziale attraverso il sistema informativo del modello tridimensionale ottenuto;
- modelli geometrici per ulteriori applicazioni (HBIM o 3DGIS);
- scheda dettagliata, analisi sullo stato di fatto e monitoraggio strutturale in caso di cambiamenti dovuti a qualsiasi forma di degrado o a danneggiamenti causati dalle condizioni antropologiche e naturali;
- inventari digitali e condivisione, con scopi educativi, di ricerca o anche semplicemente per fini turistici, migliorandone l'accessibilità, le conoscenze e la comprensione (Di Stefano et al., 2021).

Tra i vari tipi di rilievi che vengono eseguiti, ci sono quelli fotogrammetrici; tutte le procedure che utilizzano immagini fotografiche di un qualsiasi oggetto per ricavarne le dimensioni e quindi eseguirne il rilievo, vanno sotto il nome di "fotogrammetria". È una scienza che consente di ottenere informazioni metriche di oggetti attraverso operazioni di misura, di registrazione e interpretazione di immagine fotografiche, conferendo loro una collocazione spaziale in un sistema di riferimento tridimensionale. La fotogrammetria terrestre o aerea, necessita di dispositivi specifici. Per la più comune fotogrammetria terrestre ci si affida alle classiche fotocamere, non necessariamente complesse mentre per la fotogrammetria aerea sempre più spesso sono utilizzati i dispositivi della tecnologia UAV (Unmanned Aerial Veicles), o più semplicemente chiamati droni. Entrambe le fotogrammetrie sono basate sull'"overlapping", ovvero sulla cattura delle immagini di un oggetto da due o più punti successivi. Poiché è obbiettivo rilevare anche gli alzati, i droni oltre a fare un rilievo nadirale, compiono anche un rilievo circolare con la fotocamera inclinata di 45° verso l'oggetto.

Per ottenere un rilievo in scala e georeferenziato, vengono usati dei rilevatori satellitari in grado di dire con precisione la posizioni di alcuni punti fissati nel luogo del rilievo. Questo permetterà la rototraslazione dei modelli ottenuti, ovvero la messa in scala e l'assegnazione ad ogni punto delle rispettive coordinate Nord, Est e Altitudine.

I laser scanning rappresentano un'innovazione tecnologica molto efficiente per la digitalizzazione e la modellazione di oggetti, beni o parti di territori di qualsiasi forma o dimensione.

La conoscenza e l'uso delle nuvole di punti, ha stravolto il campo dei beni culturali; architetti, restauratori, archeologi hanno preso sempre più dimestichezza con i laser scanner mobili. Nonostante una precisione millimetrica del rilievo, gli scanner laser fissi molto spesso non riescono a garantire velocità e completezza del rilievo, risultando così non sempre efficienti, soprattutto in aree critiche o di difficile accesso. È qui che entra in gioco l'utilizzo dei laser scanner mobili, molto più dinamici e facili da usare. I dispositivi mobili vengono utilizzati in modalità differenti a seconda del tipo di contesto, del tipo di risultato o del grado di accuratezza e di dettaglio che si vuole conseguire. Grazie alla loro manovrabilità e alla loro versatilità è possibile eseguire rilievi in tempi rapidi in qualsiasi ambiente, che sia in ambito urbano o rurale, interno o esterno. Tutte le varie strumentazioni sono in grado di generare dei dati che poi possono essere combinati tra loro. Non tutte le nuvole di punti hanno un livello di precisione uguale. I laser scanner fissi hanno un valore di precisione millimetrico, mentre quelli mobili hanno un valore medio fino a un centimetro. Eseguendo un'operazione "cloud -to-cloud" tra le nuvole di punti del laser scanner mobile e quelli di un laser scanner fisso, si ottiene un valore di accuratezza medio del laser mobile, inferiore ai 10 centimetri.

L'utilizzo di questi sistemi di mappatura mobile MMS (Mobile Mapping System) può avvenire in diversi ambiti: in ambienti urbani, nell'ambito dei beni culturali, monitoraggio ambientale, mappatura e modellazione, solo per citarne alcuni. Pertanto, la combinazione di diverse tecniche di rilievo è ora una pratica comunemente usata nella Geomatica. Tra i vari ambiti di intervento oltre a quello dei beni culturali e dell'archeologia, e a quello più frequente di ambienti urbani, può capitare di imbattersi in rilievi in ambito sotterraneo (gallerie, grotte), o anche in ambienti agricoli e forestali. Proprio in questo ambito, (Di Stefano et al., 2021) cresce sempre più l'utilizzo della tecnologia di ultima generazione grazie alla velocità di esecuzione del rilievo. Migliora la qualità dei dati raccolti con l'utilizzo del laser scanner mobili, anche se risentono di alcune limitazioni dovute alla copertura arborea che non permette una copertura continua (per via del segnale GNSS troppo scarso) e ad una nuvola di punti non perfettamente corrispondente, generando una riduzione della precisione dello strumento. Quando le chiome degli alberi ostacolano il segnale satellitare, l'errore di posizionamento cresce continuamente fino a decine di centimetri o addirittura metri. Può capitare che uno stesso albero venga riportato più volte all'interno della nuvola. Comunque se il segnale GNSS è buono, la precisione riportata per i dati del laser scanner mobile è nell'ordine dei 2-4 centimetri. Tali limitazioni possono

essere superate grazie all'algoritmo della tecnologia SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).

Anche per quanto riguarda gli ambienti sotterranei, l'utilizzo di laser scanner mobili ha portato i suoi benefici, innanzitutto in termini di tempistiche rispetto ai rilievi più tradizionali, ma anche in termini di risultati. Le soluzioni di mappatura mobile hanno il potenziale per ottenere copertura e mappatura in modo più accurato e completo. I contesti sotterranei sono in genere ambienti difficili per la mappatura 3D, in quanto sono scuri, bagnati, polverosi ed hanno una visibilità limitata. Nonostante questo, confrontando con altre tecnologie col metodo cloud-to-cloud, il livello di accuratezza è sempre nell'ordine dei millimetri.

## 3. CASO STUDIO

### *3.1 I mulini idraulici*

L'oggetto di studio del rilievo, sono due mulini idraulici, situati nel Piceno (Marche), precisamente nell'alta Valle del Tronto.
La proliferazione di tutte queste strutture è in parte dovuta allo sviluppo dell'agricoltura. In un territorio dove le industrie, come anche le metropoli, non hanno avuto modo di svilupparsi, a farla da padrone è stata proprio l'attività agricola sotto le sue diverse forme, e in parte anche le attività artigianali. Le Marche per questo vedono come luoghi più rappresentativi del lavoro proprio strutture come mulini per la macinazione, frantoi, concerie e gualchiere lungo i principali corsi d'acqua; ma anche fornaci, essiccatoi, caciaie, carbonaie, i forni nei piccoli borghi rurali, le fontane e i lavatoi pubblici, i piccoli cantieri navali e i mercatali per le fiere del bestiame e le "piazze delle erbe". Strutture che a volte necessitavano di una dimensione abbastanza ridotta, mai monumentali e ben inseriti nei paesaggi agrari; attività che si fondavano nella simbiosi tra «fabbrica» e territorio, ieri come ancora oggi dipendendo dalle contigue fonti di energia come dalla localizzazione delle materie prime stesse.

Il numero cospicuo di mulini idraulici nel territorio marchigiano è dovuto al suo stretto rapporto con l'estesa rete dei piccoli e medi borghi, alla presenza a tappeto della mezzadria e alla produzione intensa delle colture cerealicole, che nel Novecento è stata spinta oltre i mille metri di altitudine. Pertanto il mulino rappresenta nelle aree collinari e montane delle Marche un servizio fondamentale per le popolazioni. La deperibilità dell'edificio e la continua manutenzione alla quale deve essere sottoposto hanno portato alla scomparsa dei complessi molitori risalenti al periodo medievale, fatta eccezione per certi mulini a torre. Le parti più assoggettate all'azione dell'acqua e delle continue modificazioni degli argini sono quelle che prima di tutte le altre sono andate perdute, soprattutto se erano di legno. Nel XVII e XVIII secolo queste strutture smettono di crescere in maniera organica, con successivi aggiustamenti e crescite attorno al nucleo originario, e iniziano a nascere su pianta regolare, rettangolare o quadrata.
Con l'introduzione di nuove fonti d'energia, la struttura architettonica del mulino viene completamente modificata. L'impianto molitorio prevale sull'abitazione e l'architettura dell'edificio perde ogni riferimento alla struttura della casa colonica. Sono pochi i mulini superstiti, funzionanti con la sola energia idrica, «rilanciata» dalla lavorazione delle farine integrali. Ma anche essi sono destinati a scomparire presto; anche se l'ENEL progetta il riuso

di diverse strutture abbandonate non sembra probabile che la ruota (ma saranno le turbine) torni a girare come in passato.

### *3.2 Il caso particolare dei mulini del Fluvione*

Ai piedi del versante orientale del Monte Vettore, nel comune di Montegallo, dall'unione di alcuni rami sorgentizi, nasce il torrente Fluvione. Dopo aver attraversato il comune di Montegallo, il Fluvione entra nel comune di Roccafluvione per poi andare a confluire nelle acque del fiume Tronto.

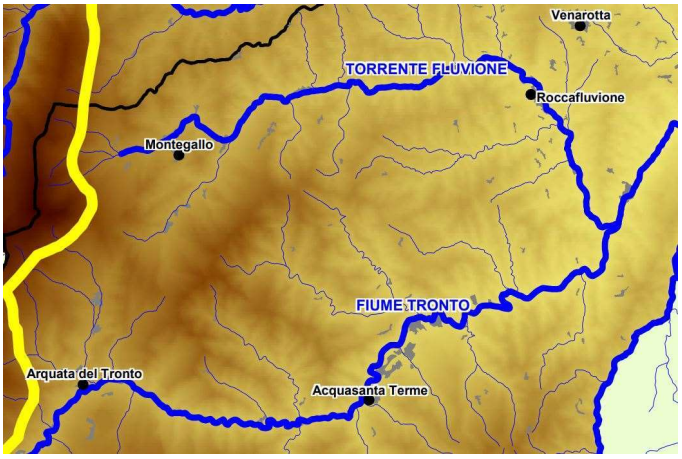



**Fig. 3.1 Bacino del torrente Fluvione**

La valle del Fluvione è un'area di particolare interesse paesaggistico; lungo il torrente, circondato per tutto il suo corso da ampie zone boschive, districati tra cascate e canyon, si può notare la presenza di alcuni mulini idraulici; questi grazie alla forza delle acque del Fluvione hanno rappresentato una risorsa importante per l'economia di tutta la valle.
Tra di essi, posto in una posizione altamente suggestiva, a strapiombo sulla cascata Arena, si trova il mulino "Pignoloni", risalente al 1629.

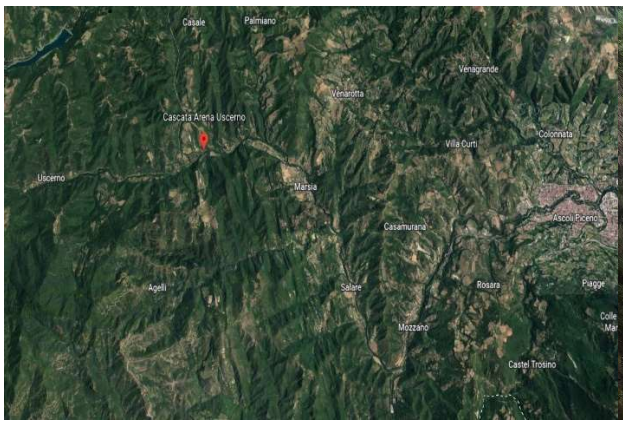



**Fig. 3.2 Vista aerea della località Arena**

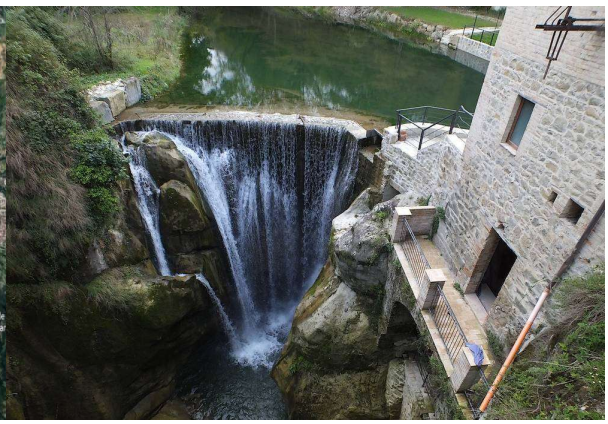


**Fig. 3.3 Mulino "Pignoloni" sulla cascata Arena**

Ammirandolo dal ponte sul torrente, si possono notare le sue caratteristiche irripetibili, che ne fanno un vero e proprio gioiello. Il manufatto, col passare degli anni, è stato oggetto di ampliamenti (1835) e di diversi lavori di restauro. Nel 2014 è stata costruita una centrale elettrica nelle sue pertinenze.

Alimentato attraverso un piccolo lago artificiale ricavato innalzando il ciglio della cascata, le bocche di presa storiche hanno subito modifiche durante le ultime trasformazioni; è visibile una chiusa moderna inserita in una vecchia sede. Fino a poco tempo fa era ancora presente parte del meccanismo che permetteva di trasferire il moto delle pale, fino ai piani alti del mulino, non quello originale ma quantomeno uno degli ultimi sistemi utilizzati. La ruota con le pale era montata in basso, nello scasso ricavato nella roccia alla destra della cascata, dove si vedono ancora dei pioli murati usati per ispezionare i meccanismi. Da qui veniva messo in moto un lungo braccio che attraversava la balconata sovrastante, e tramite uno snodo proseguiva all'interno della struttura all'altezza del piano stradale.

**Fig. 3.4 Vista dei locali adibiti all'azione molitoria**

**Fig. 3.5 Vista interna delle attrezzature della macchina molitoria**

Risalendo la Valle del Fluvione, arrivati nel comune di Montegallo, nella frazione di Forca, presso la località "Santa Maria in Lapide" si trova un altro mulino.

Nascosto tra la vegetazione, il mulino si rispecchia nel piccolo laghetto che lambisce i piedi dell'edificio; edificato nel 1881 ha continuato a macinare fino al 1983.Lasciato in uno stato di abbandono, la struttura in muratura riesce a mantenersi ancora in buono stato; non si può dire lo stesso degli elementi meccanici del mulino, in quanto gli elementi della ruota idraulica sono andati perduti, mentre gli elementi per la presa dell'acqua appaiono logore.

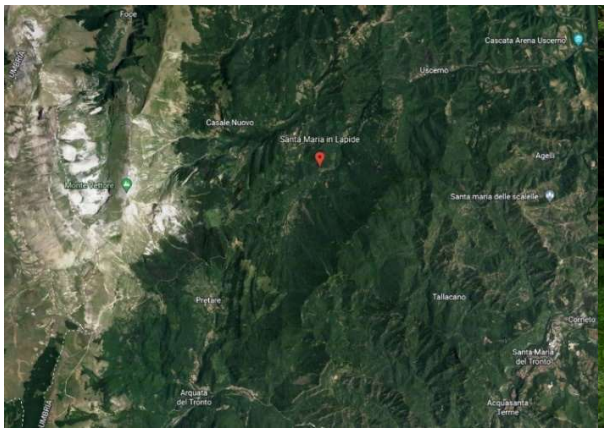


**Fig. 3.6 Vista aerea della località "Santa Maria in Lapide"** **Fig. 3.7 Mulino di Santa Maria in Lapide**

**Fig. 3.8 Vista del ritrecine della macchina molitoria**

### *3.3 Il censimento dei mulini idraulici nella regione Marche*

In seguito al DGR n.667 del 03/06/2020 in attuazione della L.R. n.4/2019 è stato predisposto un piano per il censimento/catalogazione dei Mulini storici ad acqua delle Marche ante 1900. Il lavoro ha visto la creazione e l'organizzazione di un Geodatabase multidisciplinare, utilizzato per comporre e gestire un censimento complessivo, uniforme, omogeneo e speditivo dei Mulini storici ad acqua distribuiti sul territorio della Regione Marche. Durante la fase di censimento, sono stati individuati mulini con diversi gradi di accuratezza; di essi sono state fornite tutte le

specificazioni riconducibili a varie fonti cartografiche, documentali e temporali e la loro mappatura/geolocalizzazione. Attraverso il sito dei beni culturali della Regione Marche sono state estrapolate diverse informazioni quali la provincia, il tipo di mulino, la localizzazione. Anche se presenti nelle mappe catastali, non sempre i loro dati erano attendibili; alcuni erano presenti sottoforma di ruderi, mentre altri erano del tutto assenti. Per alcuni mulini è stato possibile fare ulteriori approfondimenti descrittivi, come la data di costruzione o la data di dismissione. Sono stati inseriti anche mulini che sono vincolati o che sono localizzati in zone particolari, come zone a rischio terremoto, a rischio frana o a rischio di esondazioni e valanghe. L'opera di catalogazione ha previsto per questi mulini un valore di pericolosità. A seconda della vastità di informazioni si è attribuito a ciascun mulino un livello, dove per livello 0 si intendono i mulini che sono solo censiti, mentre col crescere di informazioni correlate, i mulini sono stati catalogati come livello 1 oppure come livello 2 (il massimo delle informazioni disponibili). Complessivamente si possono contare 953 mulini a livello 0, 160 a livello 1, e 106 a livello 2.

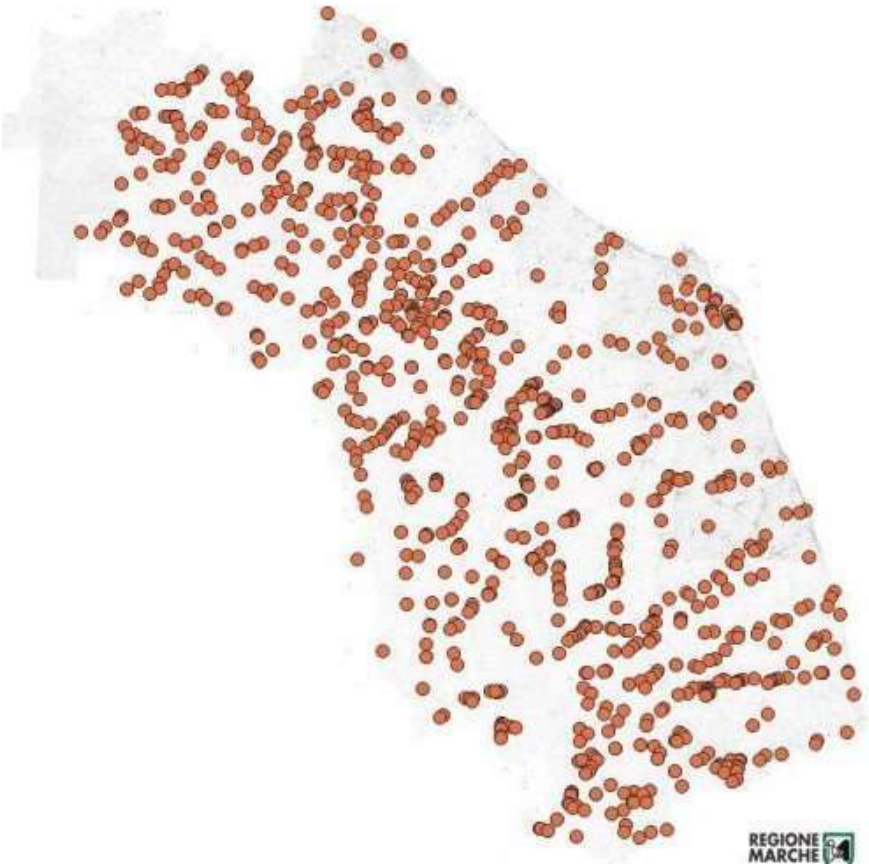



**Fig. 3.9 Rappresentazione dei mulini di livello 0**

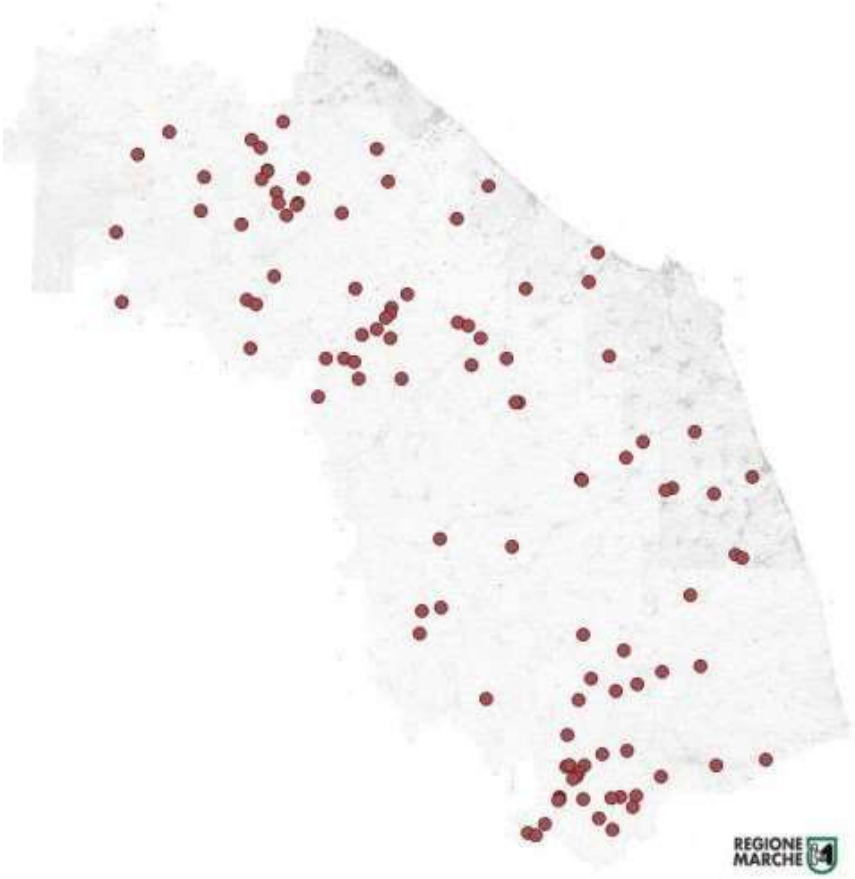



**Fig. 3.10 Rappresentazione dei mulini di livello 2 nelle Marche**

Tra i mulini di livello 2 si possono trovare anche i due mulini oggetto della presente tesi; nella tabella in cui sono riportati i mulini di livello 2, è quindi possibile trovare i mulini che andremo a studiare, con tutte le voci e i parametri che sono stati utilizzati ai fini della catalogazione.

| G | H | I | J | K | L | M | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Altra denominazione certa o ipotizzata (?) | PVCP Provincia | PVCC Comune | PVCF Frazione | PVCL Località | PVCB bacino idrografico | Asta | ID Codice GIS | LIR | NCTR Codice Regione | NCTN Numero catalogo generale | NCTS Suffisso numero catalogo generale | OGTN Denominazione | Altra denominazione certa o ipotizzata (?) | PVCP Provincia | PVCC Comune | PVCF Frazione |
| M. Santa Maria | AP | Montegallo | Forca | Santa Maria in Lapide | Tronto | f. del Lago | AP 162 | 2 | 11 | 219216 | | Mulino di S. Maria in Lapide | M. Santa Maria | AP | Montegallo | Forca |
| Arena; M. Pignoloni | AP | Roccafluvione | | Arena | Tronto | T. Fluvione | AP 156 | 2 | 11 | 109891 | | Mulino Pignoloni | Arena; M. Pignoloni | AP | Roccafluvione | |

**Fig. 3.11 Parte iniziale delle tabelle dei mulini di livello 2**

Sul sito della Regione Marche, nella sezione dedicata ai beni culturali presenti nella Regione, è possibile pertanto trovare alcune informazioni sui manufatti, posizioni geografiche, cenni storici, stato di conservazione sia degli edifici sia della struttura molitoria.

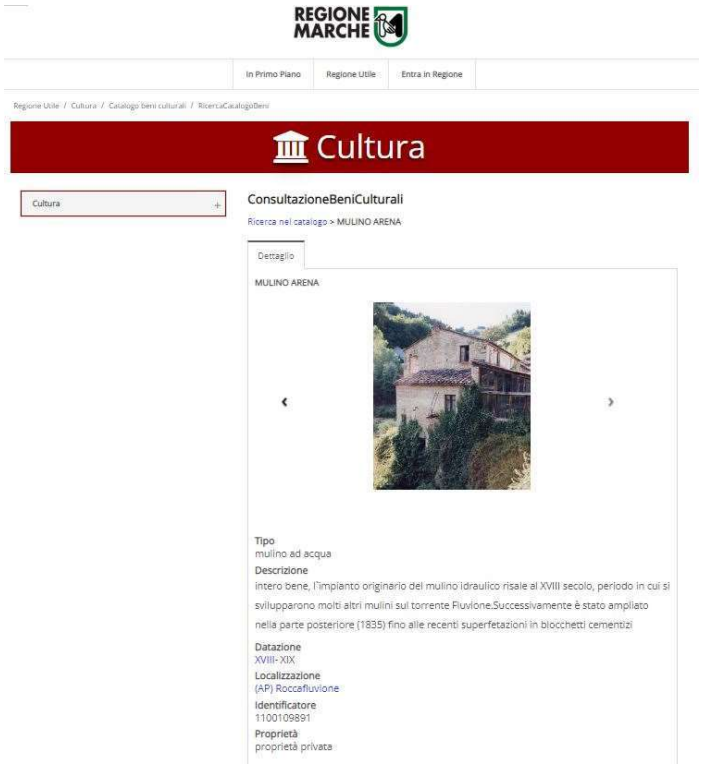



**Fig. 3.12 Pagina web dedicata dalla Regione Marche al mulino Arena o "Pignoloni"**

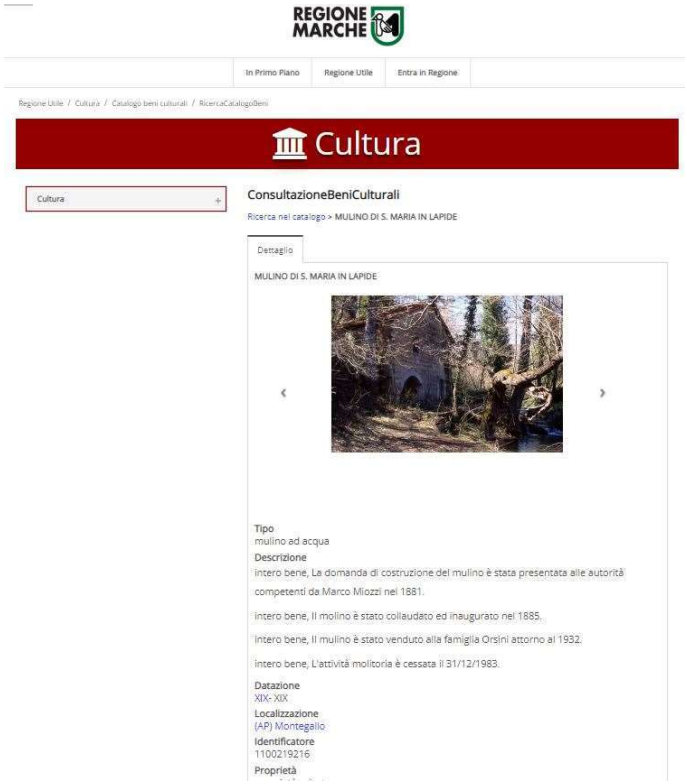



**Fig. 3.13 Pagina web dedicata dalla Regione Marche al mulino di Santa Maria in Lapide**

# 4. ACQUISIZIONE DEI DATI

La finalità del rilievo è quella di generare un modello 3D digitale identico all'originale, metricamente corretto e fotorealistico dei due mulini, attraverso l'utilizzo di strumenti e software della geomatica in grado di ottimizzare i procedimenti di elaborazione dei dati ottenuti.
Il rilievo architettonico è uno strumento atto a capire e comprendere il manufatto nella sua globalità. È importante, non solo saper vedere l'architettura, quanto saperla leggere.
Eseguire un rilievo significa comprendere l'architettura nei suoi aspetti geometrici, metrici, storici, fino ad arrivare ad una sua lettura critica.
La prima fase di questo processo è il rilievo metrico con lo scopo di ottenere un modello tridimensionale tramite la posizione dei suoi punti più significativi.
A seconda del tipo di dati e di informazioni che si vogliono ottenere attraverso il rilievo, si sceglie un metodo di rilievo rispetto ad un altro. In alcuni casi si ricorre ad integrare tra di loro queste metodologie.
Tra i vari metodi di rilievo metrico, quelli più comunemente usati sono:
- Il "rilievo diretto", eseguito da uno o più operatori, con semplici strumenti di misura (metro, filo a piombo, aste metriche, etc.) indispensabile per rilevare piante e sezioni.
- Il "rilievo fotogrammetrico", eseguito con camere fotografiche pio o meno complesse, basato sulla collimazione visiva dei punti, è usato per fare rilievi di precisione, soprattutto per facciate piane e fronti urbani.
- Il "rilievo strumentale", eseguito con strumenti topografici (stazione totale, laser scanner, etc.), permette di estrarre direttamente un modello geometrico dell'oggetto di studio. È un metodo complementare agli altri rilievi, soprattutto per rilevamenti di precisione nel caso di punti da misurare inaccessibili.
Per la fase del rilievo sul campo dei due mulini in oggetto, al fine di ottenere un modello più preciso e dettagliato, sono stati effettuati i seguenti tipi di rilievo: "fotogrammetrico" (aereo e terrestre) e "strumentale" attraverso l'utilizzo di un laser scanner mobile.

## 4.1 Strumenti utilizzati

Una volta decise le tecniche di rilievo da utilizzare, si è deciso quali fossero gli strumenti più efficaci da utilizzare. Sono stati usati:
- Rilevatore GNSS Topcon Hiper HR;
- Drone DJI Mavic Mini;
- Fotocamera Sony Alpha 77;

- Laser scanner mobile GeoSLAM ZEB Horizon;

### 4.1.1 Rilevatore GNSS Topcon Hiper HR

Il "Sistema Satellitare Globale di Navigazione" (il cui acronimo è GNSS), è un sistema di geolocalizzazione e di navigazione terrestre, aerea o marittima, che si appoggia su una rete di satelliti artificiali in orbita. Tale sistema permette a piccoli ed appositi ricevitori elettronici di determinare le loro coordinate geografiche (latitudine, longitudine ed altitudine) su un qualsiasi punto della superficie terrestre, con un margine di errore di pochi metri. Di questi sistemi satellitari, tra i più noti e più all'avanguardia, ci sono il sistema statunitense NAVSTAR-GPS, il russo GLONASS, quello europeo GALILEO, il cinese COMPASS e l'indiano IRNSS.
Il sistema GPS è legato a 24 satelliti (18 operativi e 6 di riserva) orbitanti attorno alla Terra. Si basa sull'analisi del tempo impiegato dalle onde elettromagnetiche ad arrivare dal satellite al ricevitore, il quale fornisce le coordinate basate sulle quote ellissoidiche, che sono quelle del sistema di riferimento WGS84. Per una corretta misurazione è necessaria la ricezione da almeno quattro satelliti. Il modello di ricevitore usato è il Topcon Hiper HR, uno dei più piccoli e leggeri, basato sulla tecnologia GNSS più avanzata, e in grado di resistere alle condizioni ambientali più avverse.

**Fig. 4.1 Ricevitore GNSS Topcon Hiper HR**

L'Hiper HR, composto da un robusto alloggiamento in lega di magnesio è in grado di lavorare con 452 canali e di tracciare automaticamente ogni segnale satellitare disponibile, sia presenti e sia quelli che verranno inseriti in futur**o.** Il ricevitore Topcon Hiper HR è inoltre dotato di una

piattaforma inerziale (IMU) a 9 e una bussola elettronica ultracompatta (eCompass) a 3 assi. Questo sistema consente di compensare le misurazioni fuori piombo fino a 15°, e permette di effettuare misurazioni su punti più difficili da raggiungere, grazie al sitema integrato TILT.

Fig. 4.2 Sistema TILT Topcon

| Tracciamento GNSS | |
|---|---|
| Numero di canali | 452 con la tecnologia brevettata Universal Tracking Channel |
| GPS<br>GLONASS<br>Galileo<br>BeiDou<br>IRNSS<br>SBAS<br>QZSS<br>Banda L | L1 C/A, L1C, L1P(Y), L2P(Y), L2C, L5<br>L1 C/A, L1P, L2 C/A, L2P, L3C<br>E1, E5a, E5b, E5AltBOC, E6<br>B1, B2, B3 con disponibilità ICD<br>SPS-L5<br>WAAS/EGNOS/MSAS L1 C/A, L1C, L2C, L5, LEX<br>1525-1560 MHz |
| Satelliti tracciati | All in view |
| **Prestazioni** | |
| Statico/Statico-rapido | H: 3,0 mm + 0,3 ppm V: 5,0 mm + 0,5 ppm |
| Precisione Statico* | H: 3,0 mm + 0,1 ppm V: 3,5 mm + 0,4 ppm |
| RTK | H: 5,0 mm + 0,5 ppm V: 10,0 mm + 0,8 ppm |
| RTK, Compensazione TILT** | H: 1,3 mm/°Tilt; Tilt ≤ 10°<br>V: 1,8 mm/°Tilt; Tilt > 10°<br>L'angolo massimo consigliato per la compensazione TILT è di 15° |
| Data Update / Output Rate | Standard 1 Hz<br>Opzionale 10, 20 Hz |

| Comunicazione | |
|---|---|
| Tipo radio opzionale | UHF (410-470 MHz) SS (915 MHz) |
| Portata radio UHF | 5-7 km tipica; 15 km in condizioni ottimali*** |
| Cellulare | Integrato HSPA+/CDMA |
| Comunicazioni supplementari | Modem cellulare interno, Wi-Fi, Bluetooth®, LongLink™ |
| **Dati e memoria** | |
| Output dati in tempo reale | TPS, RTCM SC104 v2.x, 3.x, CMR/CMR+ |
| Output NMEA 0183 | Versione 2.x, 3.x e 4.x |
| Memoria interna | 8 GB |
| **Alimentazione** | |
| Fonte di alimentazione | Alimentazione esterna da 6 a 28 VCC<br>1 batteria interna (3,7 V, 5200 mAh)<br>1 batteria rimovibile (7,2 V, 2900 mAh) |
| Autonomia | Fino a 9 ore con batterie incluse |
| **Ambientali e fisiche** | |
| Dimensioni (l x h) | 115 x 132 mm |
| Temp. di esercizio | Da -40 °C a 65 °C |
| Protezione Polvere/ Acqua | IP67 |
| Caduta e ribaltamento | Caduta dall'asta da 2 metri |
| Peso | 1.172 g (incluse batteria interna e batteria esterna sostituibile a caldo) |

Fig. 4.3 Specifiche tecniche Hiper HR

### 4.1.2 Drone DJI Mavic Mini

Per eseguire il rilievo fotogrammetrico aereo è stato utilizzato il drone DJI Mavic Mini, il quale grazie al suo peso contenuto (249 grammi) e alle sue piccole dimensioni è in grado di stare nel palmo di una mano (con bracci chiusi).

Questo mini UAV (Unmanned Aerial Vehicle) è un drone multi-rotore con quattro eliche ed è dotato di una buona qualità costruttiva. Il corpo centrale e le cerniere dei quattro bracci con motore ripiegabili sono robusti e solidi. Le dimensioni effettive sono di 40x82x57 millimetri se chiuso, mentre sono di 245x290x55 millimetri se aperto.

Fig. 4.4 DJI Mavic Mini chiuso

Fig. 4.5 DJI Mavic Mini in fase di volo

È dotato di una fotocamera che supporta foto aeree da 12 megapixel e video con una risoluzione fino a 2,7k. La fotocamera, affiancata da un ricevitore GNSS, è dotata di tre assi di stabilizzazione motorizzati che garantiscono la possibilità di librarsi in un punto stabilmente senza muoversi. Il DJI Mavic Mini ha in dotazione un radiocomando compatto in grado di raggiungere una portata di trasmissione massima di 2 km; ha inoltre un indicatore led che indica lo stato della batteria, la quale è ha una capacità di 2400 mAh. È possibile collegarlo tramite

un'applicazione ad un qualsiasi smartphone, e da questa accedere a tutte le sue funzionalità avanzate.

Fig. 4.6 Radiocomando DJI Mavic Mini

### 4.1.3 Fotocamera Sony Alpha 77

La parte del rilievo fotogrammetrico da terra è stata realizzata utilizzando una fotocamera Sony Alpha 77, una fotocamera digitale reflex professionale dotata di sensore da 24,3 megapixel APS CMOS Exmor HD a risoluzione altissima. Ha una lunghezza di 14,26 cm, una larghezza di 8,09 cm e un'altezza di 10,4 cm, per un peso complessivo di 653 grammi.

Fig. 4.7 Sony Alpha 77 vista frontale e laterale

Costruita interamente in magnesio, il corpo è anche sigillato e quindi non teme polvere e umidità. La presa è comoda e salda anche grazie all'impugnatura completamente gommata. La

posizione, la forma e la dimensione dei bottoni sono tali che almeno i più importanti sono riconoscibili al tatto senza allontanare l'occhio dal mirino. Gran parte della parte posteriore è poi dominata dall'ampio display LCD (da 3 pollici e con una risoluzione di 921.600 pixel) che

Fig. 4.8 Sony Alpha 77 vista posteriore

con un doppio snodo può essere orientato in tutte le direzioni o ribaltato per essere chiuso e protetto. Essendo dotata di specchio fisso e otturatore elettronico, è possibile arrivare ad avere 12 scatti al secondo a piena risoluzione. La Sony Alpha 77, che incorpora anche un GPS, permette anche di effettuare scatti panoramici, sia in orizzontale che in verticale, eventualmente anche in 3D.

Fig. 4.9 Sony Alpha 77 vista superiore

### 4.1.4 Laser scanner mobile GeoSLAM ZEB Horizon

La fase del rilievo "strumentale" è stata eseguita tramite un laser scanner mobile GeoSLAM. In particolare, è stato usato il modello GeoSLAM ZEB Horizon. È utilizzabile sia per ambienti interni che per ambienti esterni. Progettato per garantire risultati veloci e allo stesso tempo di qualità, ZEB Horizon, grazie alla potente tecnologia SLAM (Simultaneos Localization And Mapping) è utilizzato principalmente in aree con assenza di segnale GPS, come ad esempio negli spazi interni, oppure in ambienti fitti di vegetazione. Le scansioni con ZEB Horizon hanno una precisione di 1-3 cm ripetibile in ambiente operativo per scansioni di durata fino a 25 minuti. In un rilievo di grandi dimensioni può essere utile dividere l'acquisizione in più sessioni di lavoro.

Fig. 4.10 Laser scanner mobile ZEB Horizon

Le varie sessioni possono essere allineate con il metodo tradizionale "cloud to cloud" oppure utilizzando l'apposito accessorio "Reference Base". È sufficiente appoggiare il laser mobile su di un target o qualsiasi punto noto per 5 secondi per memorizzare automaticamente le coordinate. Il laser mobile è utilizzabile anche in ambienti privi di luce, come ad esempio grotte, pozzi, scantinati, etc. Inoltre, è possibile utilizzarlo a qualsiasi inclinazione senza degradare la precisione. La portata massima dello scanner è di 100 metri (in condizioni ottimali, ovvero al chiuso con una buona riflessività del bersaglio), quella tipica è di 60-80 metri nella maggior parte delle condizioni. È buona norma comunque mantenere una portata a meno di 50 metri ove possibile per garantire una buona densità di punti e per aiutare l'algoritmo SLAM. Tenendo una

velocità ridotta, si riesce a garantire una buona copertura e dati ad alta risoluzione. A passo lento è possibile coprire 1000-3000 metri di distanza di rilevamento. Nella maggior parte dei casi l'algoritmo SLAM è in grado di gestire oggetti in movimento nell'ambiente. Per stimare la traiettoria del sensore, l'algoritmo presuppone che gran parte dell'ambiente sia statico. In particolare, gli oggetti in movimento dovrebbero essere evitati in ambienti lunghi simili a tunnel (ad es. corridoi), spazi relativamente aperti e durante il passaggio attraverso le porte. È buona norma non avere altre persone che accompagnino da vicino l'operatore durante l'acquisizione della scansione poiché verranno scansionate su tutta la mappa lasciando strisce di dati e potenzialmente danneggiando la soluzione in ambienti poveri di funzionalità. Se è necessario che le persone seguano l'operatore, dovrebbero idealmente mantenere una distanza di 20 m o più dall'operatore.

ZEB Horizon è costituito da un sensore di raggio laser time-of-flight (LIDAR) accoppiato a un'unità di misura inerziale (IMU). Il sensore LIDAR è montato su un motore che ruota il sensore di 360 gradi per migliorare il campo 3D del sensore view. Un nuovo algoritmo di localizzazione e mappatura simultanea 3D (SLAM) viene utilizzato per combinare i dati lidar e IMU per generare nuvole di punti 3D accurate. ZEB Horizon acquisisce misure grezze della portata laser e dati inerziali. Questi dati devono essere elaborati utilizzando l'algoritmo SLAM di GeoSLAM per convertire i dati grezzi in una nuvola di punti 3D. I dati vengono elaborati utilizzando l'applicazione di elaborazione GeoSLAM Connect. L'algoritmo SLAM utilizzato per elaborare i dati di scansione grezzi in una nuvola di punti utilizza un metodo analogo alla tecnica Traverse utilizzata nella pratica del rilievo, in quanto una posizione precedentemente nota viene utilizzata per determinare la sua posizione attuale. Questo metodo può comportare la combinazione di qualsiasi errore introdotto causando una "deriva" della posizione della misura. È buona pratica di rilevamento "chiudere il ciclo" rilevando nuovamente una posizione nota in modo che l'errore combinato possa essere distribuito attorno al ciclo. In generale, è meglio fare loop circolari piuttosto che loop "andata e ritorno" in cui il percorso del rilievo raddoppia semplicemente su sé stesso. I principali componenti del laser sono lo scanner laser palmare (nella figura evidenziato dal numero 1), il registratore dati (n°2), la batteria di litio da 14,8V (n°3), il cavo principale (n°4), la base di riferimento (n°6), il dispositivo di archiviazione USB (n°7) e il portacellulare (n°10).

Fig. 4.11 Principali componenti del laser scanner

## 4.2 Esecuzione dei rilievi

Il primo mulino oggetto del rilievo è stato il mulino "Pignoloni". Arrivati sul posto, si è proceduto, attraverso un sopralluogo, ad esaminare l'intero perimetro per pianificare le modalità di esecuzione del rilievo e l'accessibilità al sito. Di conseguenza si è deciso quanti fossero i target necessari da usare per la georeferenziazione delle immagini acquisite con la strumentazione UAV (Unmanned Aerial Vehicle) per l'aerofotogrammetria e per il rilievo con laser scanner mobile.

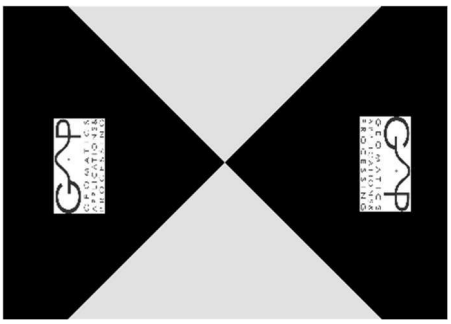


Fig. 4.12 Target usato per il rilievo GPS

I target sono stati disposti a terra, in modo da essere ben visibili e facilmente individuabili dalle foto aeree; sono stati usati 5 target dalle dimensioni di 42x30 cm. La loro posizione e il loro numero progressivo arbitrariamente attribuiti sono stati appuntati su un taccuino, in quanto in fase di elaborazione ritorneranno utili. A questi sono stati assegnati i numeri progressivi da 101 a 105 compresi; sono stati collocati ad una distanza equa l'uno dall'altro.

**Fig. 4.13 e 4.14 Esempi di target posizionati a terra**

Successivamente si è provveduto a rilevare le coordinate geodetiche dei target tramite il rilevatore GNSS Topcon Hiper HR.

Considerate le condizioni meteo del momento, con alcune nuvole che stavano per oscurare il sole e con il vento che iniziava ad alzarsi, si è deciso di procedere con il rilievo aerofotogrammetrico, utilizzando il drone DJI Mavic Mini. Per prima cosa sono stati effettuati gli scatti in direzione nadirale, tenendo conto di una traiettoria da seguire ben precisa (un tragitto a serpentina), anche se non è stato preimpostato il tragitto. Sono state eseguite 40 foto da un'altezza di circa 26,8 metri da terra.

**Fig. 4.15 Schema di presa a serpentina in direzione nadirale applicato al nostro caso studio**

**Fig. 4.16 Esempio di foto aerea in direzione nadirale**

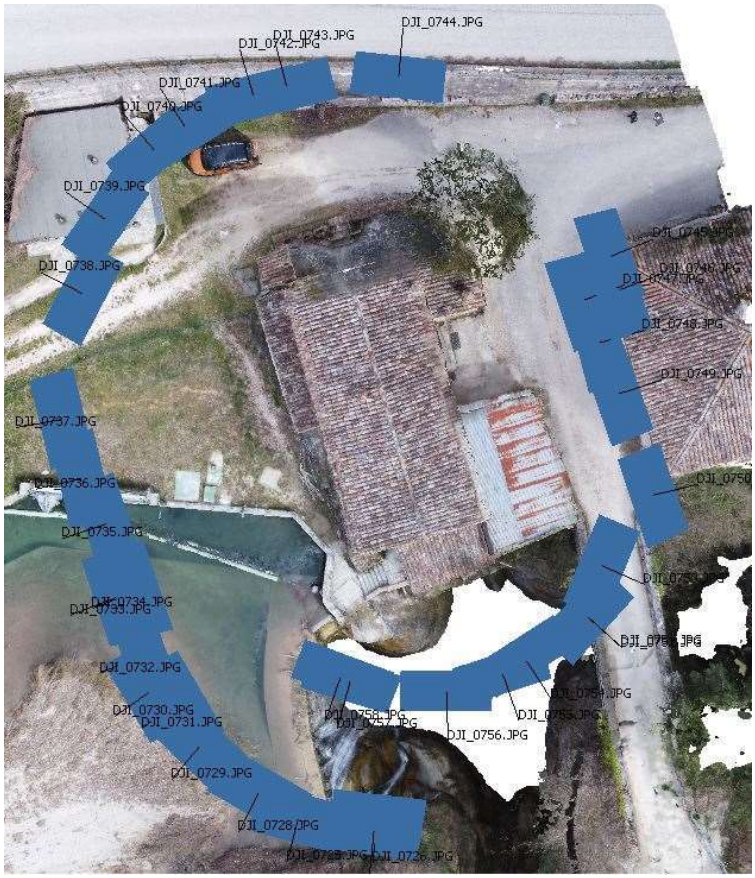



**Fig. 4.17 Schema di presa circolare in direzione obliqua applicato al nostro caso studio**

Concluso il rilievo aerofotogrammetrico in direzione nadirale, si è passati ad effettuare quello obliquo con la fotocamera del drone inclinata di 45°. È stata effettuata una traiettoria circolare lungo il perimetro del mulino, in modo che il drone potesse tornare al punto di inizio; Le foto effettuate in direzione obliqua sono state 34.
Complessivamente sono state quindi effettuate 74 foto con il drone, ottenendo così una copertura molto omogenea delle varie parti dell'edificio.

**Fig. 4.18 Esempio di foto aerea in direzione obliqua**

Conclusa la fase del rilievo aerofotogrammetrico tramite UAV si è passati al rilievo fotogrammetrico terrestre, utilizzando una fotocamera Sony Alpha 77, necessario per l'osservazione dei dettagli all'esterno del nostro caso di studio. Anche in questo caso è stata fatta attenzione nel cercare di mantenere una sovrapposizione delle immagini (overlap) che fosse intorno al 70% per cercare di collegarle in modo ottimale durante la fase di restituzione. A causa delle caratteristiche del luogo, soprattutto a causa della presenza del torrente, ma anche a causa di una recinzione nei pressi dei sensori idraulici del torrente, non è stato possibile effettuare un percorso circolare (come sarebbe opportuno fare per rilievi di edifici); inoltre, alcune immagini catturate, affinché tutto l'edificio potesse essere fotografato, sono state

eseguite da una posizione più lontana rispetto al resto delle altre immagini. Complessivamente sono state effettuate 66 foto.

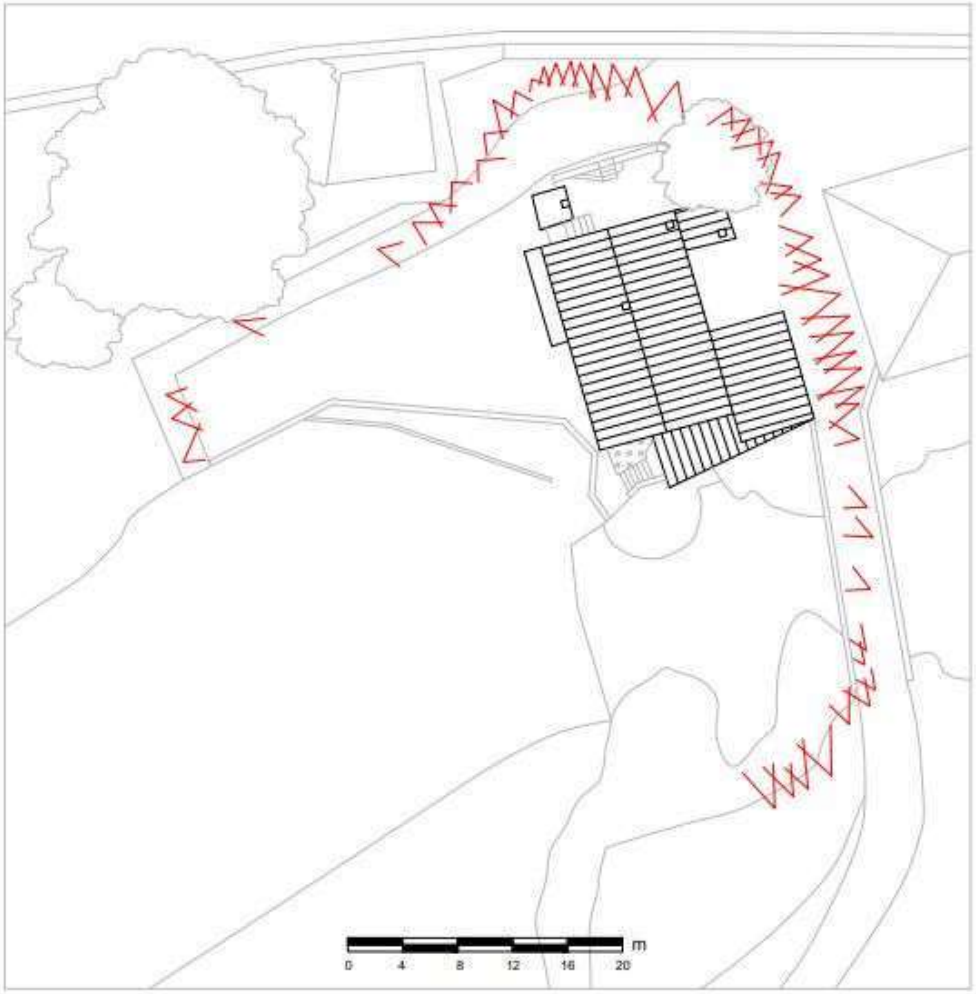



**Fig. 4.19 Schema di presa della fotogrammetria terrestre**

**Fig. 4.20 Esempio di foto fatta con rilievo da terra**

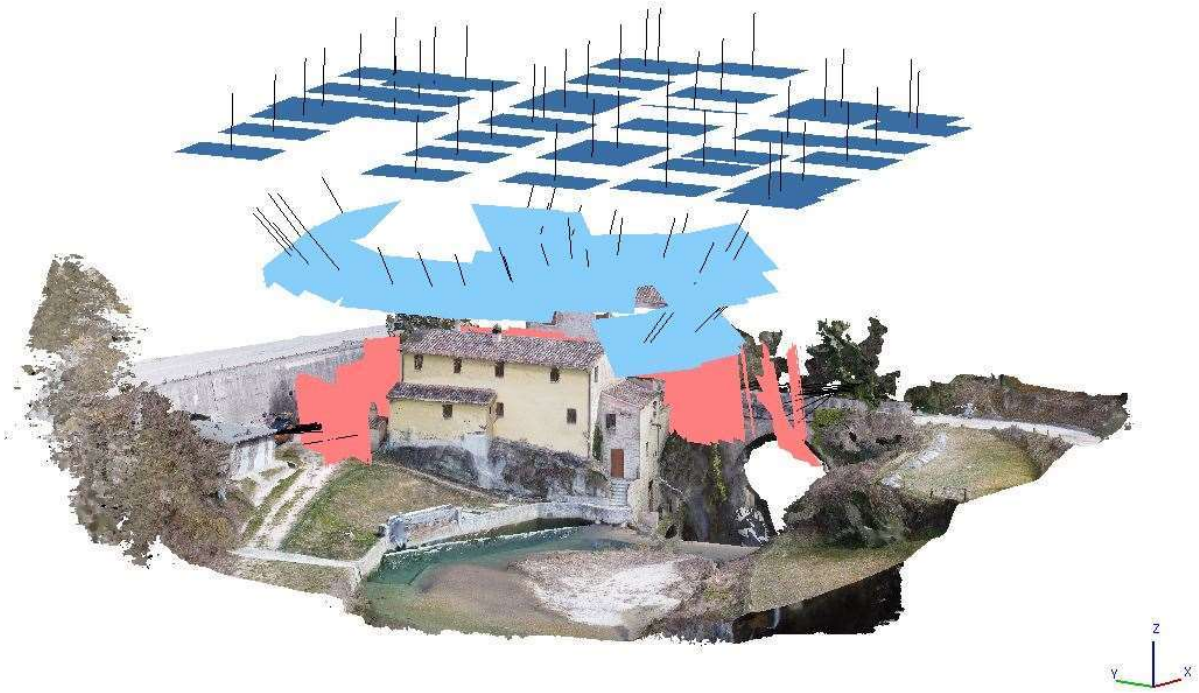



**Fig. 4.21 Schema di prese di carico della fotogrammetria (in blu foto nadirali, in celeste foto oblique, in arancio foto da terra)**

L'ultima fase del rilievo sul campo è stata quella del rilievo effettuato tramite il GeoSLAM ZEB Horizon, un laser scanner mobile terrestre dotato di tecnologia SLAM (Simultanously Localization and Mapping). Per ottenere una restituzione accurata durante questa fase, si è deciso il percorso da eseguire, facendo attenzione a non creare alcun tipo di movimento che potesse disturbare l'attrezzatura. Questa fase, conclusa nel momento in cui il laser scanner mobile è tornato al punto di inizio, è durata 5 minuti e 51secondi.

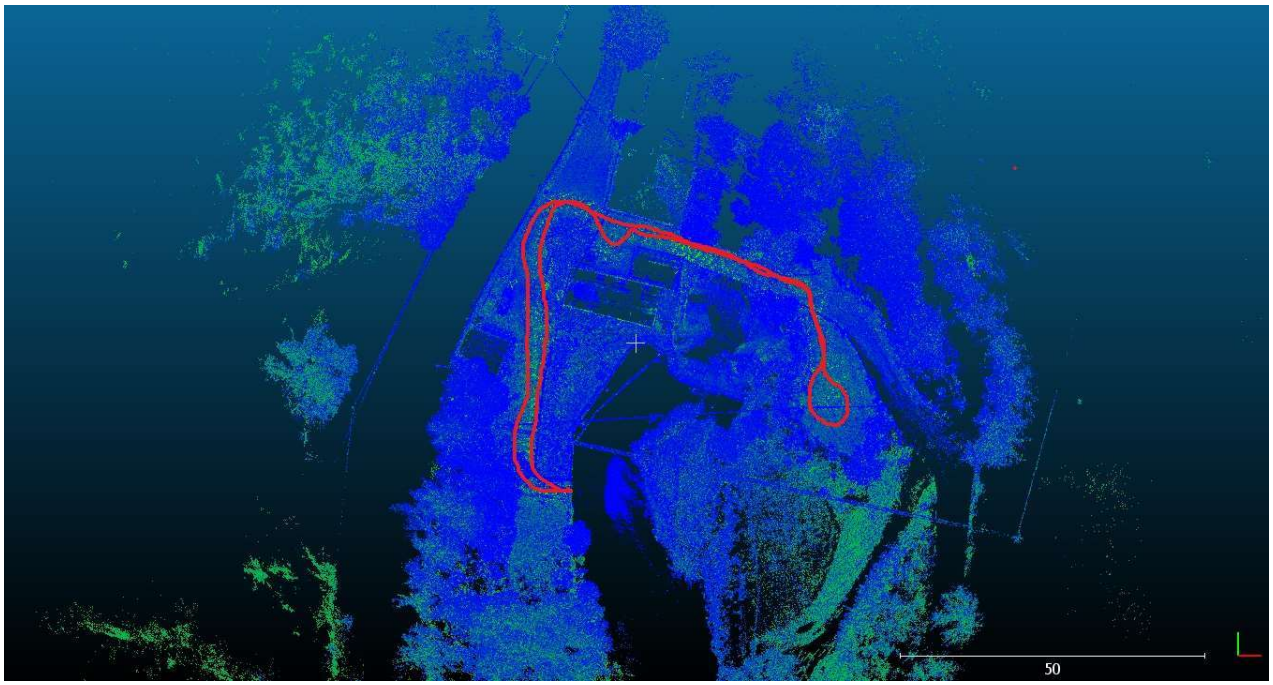



**Fig. 4.22 Tragitto eseguito con laser scanner mobile (in rosso)**

**Fig. 4.23 Rilievo effettuato con laser scanner mobile**

Successivamente ci si è spostati in direzione del mulino di “Santa Maria in Lapide”, nel comune di Montegallo. Giunti sul posto, individuare il mulino non è stato semplice, in quanto a parte un cimitero, una chiesetta, e un’abitazione, non si riusciva a scorgere altro. A lato del cimitero, nascosto nella fitta vegetazione del bosco, si è finalmente individuato il piccolo edificio che una volta era adibito all’attività molitoria.

Il manufatto edilizio, si è presentato in un discreto stato di conservazione; mentre la struttura molitoria, visibile dall’esterno, denotava subito una mancanza di manutenzione.

Da subito si è capito che la fase del rilievo non sarebbe stata semplice, in quanto gli spazi per effettuare le varie fasi del rilievo non erano ottimali. Inoltre, subito si è notato che parte del bosco circostante, ricopriva tratti delle pareti.

Posizionati i target a terra, si è presentata la prima difficoltà; a causa della mancanza del segnale GPS, non è stato possibile rilevare le coordinate geodetiche dei target a terra.

Fare un rilievo aerofotogrammetrico non è stato possibile, proprio a causa della natura del luogo. L’edificio difatti è nascosto dalla folta vegetazione delle chiome degli alberi del bosco. Maneggiare un drone in quel luogo sarebbe stato rischioso per l’incolumità dello stesso strumento.

Si è quindi proceduti ad effettuare solo la fase del rilievo fotogrammetrico terrestre. Sebbene sia stato possibile effettuare le foto, non è stato però possibile farle lungo tutto il perimetro; nella parte posteriore dell’edificio era presente una specie di “conca”, una volta adibita per la raccolta dell’acqua. Anche la parete frontale, sebbene molto più a vista delle altre, presentava poco spazio per fare delle foto efficienti, in quanto alle spalle dell’operatore vi erano alberi e arbusti o addirittura il corso dell’acqua. Questo ha impedito innanzitutto di completare il giro completo attorno all’edificio, e quindi di ottenere un numero di foto sufficiente per la fase di elaborazione delle immagini, e poi di ottenere delle immagini da una posizione sicuramente più giusta. Complessivamente sono state eseguite 32 foto.

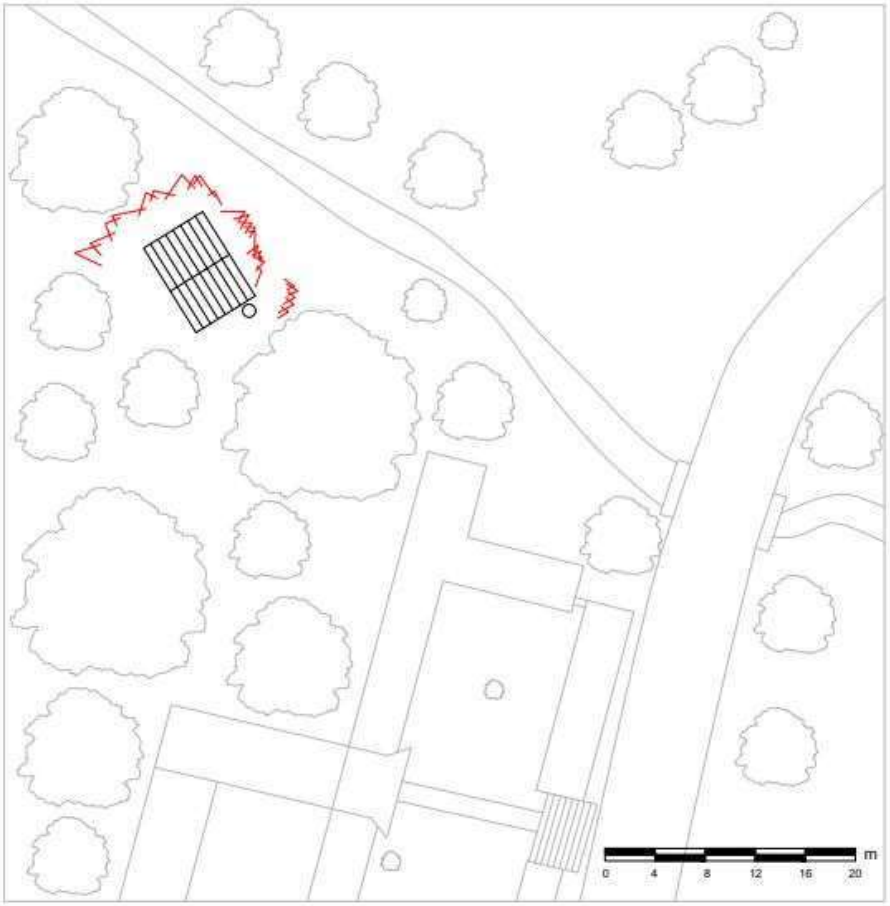



**Fig. 4.24 Schema di presa della fotogrammetria terrestre**

**Fig. 4.25 Esempio di foto fatta con rilievo da terra**

Terminato il rilievo fotogrammetrico si è passati al rilievo con il laser scanner mobile; la durata del rilievo con il laser scanner è durata circa 4 minuti e 51 secondi, anche se pure questo è stato difficoltoso da eseguire. Lo spazio per muoversi nei pressi del mulino era davvero risicato, e la presenza, in parte del corso di acqua di fronte all'edificio, e in parte del dislivello del terreno, hanno reso il tragitto molto complicato. Anche in questo caso non è stato possibile effettuare un percorso completo attorno all'edificio

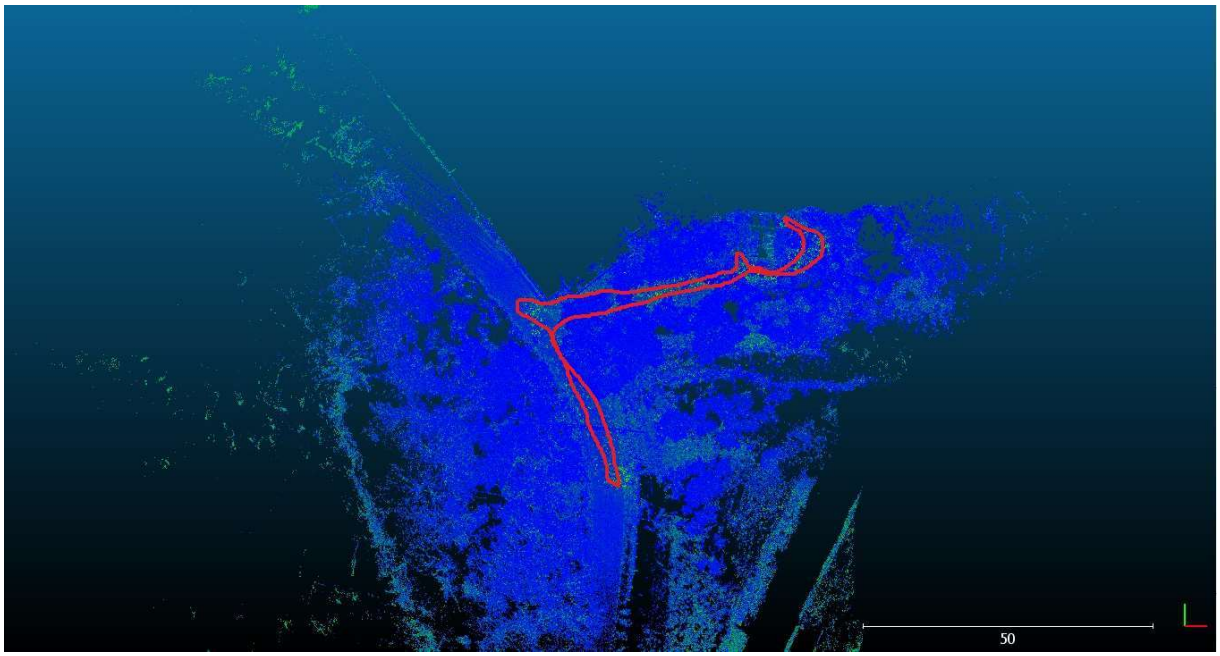



**Fig. 4.26 Tragitto eseguito con laser scanner mobile (in rosso)**

# 5. PROCESSAMENTO DEI DATI

## 5.1 Elaborazione dati della fotogrammetria

Una volta rientrati dal sito dei nostri rilievi è iniziato il lavoro di elaborazione dei dati raccolti attraverso gli strumenti della fotogrammetria. Per l'elaborazione delle immagini è stato scelto di usare il software "Metashape". Questo prodotto dalla compagnia russa Agisoft LCC, è uno strumento avanzato che permette di elaborare, partendo da fotogrammi, nuvole dense di punti, mesh e texturizzazioni. Infatti, il software consente l'individuazione automatica di punti omologhi all'interno delle immagini e li correla tra loro (allineamento), ricavando i parametri di calibrazione della fotocamera e la posizione di presa nello spazio tridimensionale per ciascun fotogramma.

Metashape è in grado di processare elevati numeri di fotogrammi, mantenendo tempistiche di elaborazione proporzionali al carico di lavoro assegnatogli. Per utilizzare correttamente il software è però necessario attenersi ad alcune regole utili per avere un risultato più veritiero possibile. La raccolta delle foto deve essere effettuata per mezzo di una camera ad alta risoluzione, impostandola alla massima risoluzione possibile, per le elaborazioni devono essere utilizzate solo foto nitide scartando quindi quelle non a fuoco, le immagini devono avere una buona sovrapposizione (overlap).

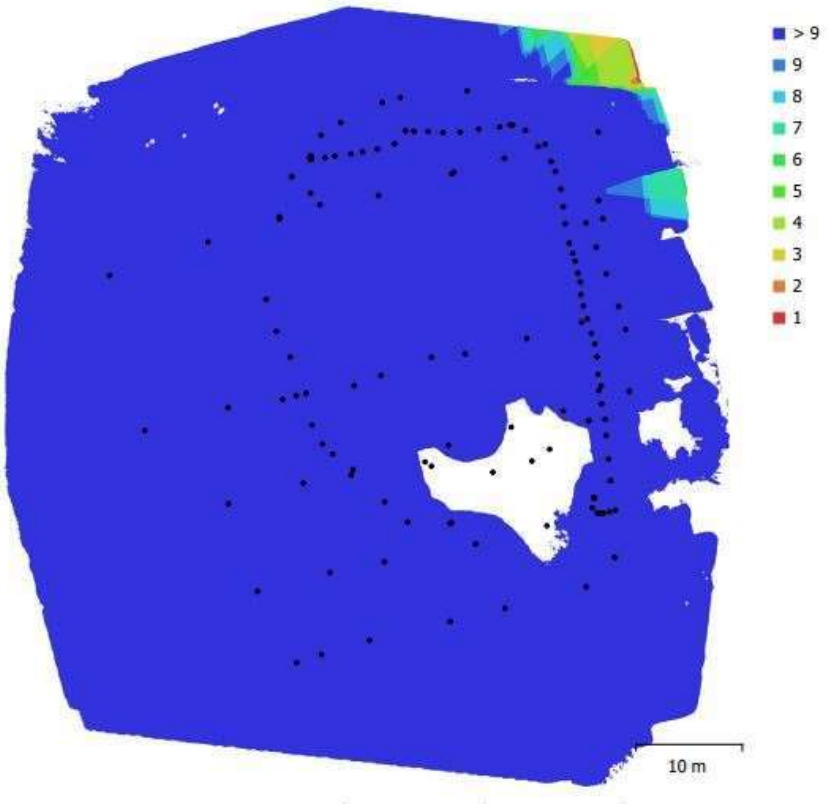



Fig. 5.1 Punti di scatto fotografico, e sovrapposizione (overlap) delle immagini

Bisogna inoltre evitare di tagliare o modificare le fotografie, l'oggetto fotografato deve occupare il massimo spazio possibile nella foto ed è fondamentale avere una buona e corretta luce in quanto è preferibile non utilizzare il flash. Ultimo punto, decisamente importante, riguarda la modalità di acquisizione delle foto, l'oggetto deve essere ripreso da più angolazioni possibile in modo da avere il minor numero di zone d'ombra, ovvero spazi senza informazioni. Prima ancora di usare Metashape si è proceduto ad un lavoro di selezione delle immagini acquisite, in primis suddividendole a seconda dell'area fotografata e in seguito effettuando una selezione delle immagini eliminando quelle con una messa a fuoco non ottimale e quelle doppie in modo da non andare ad appesantire inutilmente il modello che avremmo poi dovuto generare. Abbiamo iniziato la nostra prima elaborazione di immagini utilizzando le foto ottenute per mezzo del rilievo aerofotogrammetrico tramite drone, inserendo insieme le immagini dei voli nadirali e quelle dei voli con camera inclinata a 45° per un totale di 74 immagini. Abbiamo quindi avviato l'allineamento su Metashape. Con questo comando il software, sfruttando la tecnica SfM (Structure from Motion), calcola le posizioni delle camere al momento dello scatto analizzando i parametri di orientamento della fotocamera, e restituisce una prima nuvola di punti generata dai punti omologhi delle immagini allineate. Attraverso la nuvola creata è possibile verificare che l'allineamento sia stato eseguito correttamente e se necessario correggere le eventuali incongruenze.

È possibile, inoltre, georeferenziare le nuvole di punti che si ricavano, ma per fare questo bisogna prima attribuire al nostro modello le giuste coordinate e quindi la giusta scala di grandezza. Tramite il software "meridiana", i dati delle coordinate geodetiche, rilevate dal rilevatore GNNS Topcon Hiper HR su ogni singolo target posizionato a terra, sono stati trasformati in vere e proprie coordinate. Il software ha difatti generato un file di testo che per comodità è stato riscritto su un file Excel in modo più ordinato.

| | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|
| 1 | mulino Pignoloni (Arena) | | | |
| 2 | nome punto | NORD (y) | EST (x) | QUOTA |
| 3 | 101 | 4747319,239247 | 372449,473402 | 391,095322 |
| 4 | 102 | 4747338,735049 | 372471,837161 | 393,421307 |
| 5 | 103 | 4747344,981323 | 372491,721409 | 394,712277 |
| 6 | 104 | 4747314,165939 | 372495,929093 | 395,858946 |
| 7 | 105 | 4747289,420450 | 372486,068127 | 396,492307 |

**Fig. 5.2 In giallo le coordinate da attribuire ai singoli target**

Le coordinate ottenute (est, nord, elevazione) sono quelle di ogni singolo target e su Metashape sono state attribuite, sostituendo quelle di default, ai rispettivi markers che avevamo selezionato

per ogni singolo target. Il sistema di coordinate usato è quello WGS 84 / UTM zone 33N (EPSG::32633).

| Markers | Easting (m) | Northing (m) | Altitude (m) |
|---|---|---|---|
| 101 | 372449.473402 | 4747319.239247 | 391.095322 |
| 102 | 372471.837161 | 4747338.735049 | 393.421307 |
| 103 | 372491.721409 | 4747344.981323 | 394.712277 |
| 104 | 372495.929093 | 4747314.165939 | 395.858946 |
| 105 | 372486.068127 | 4747289.420450 | 396.492307 |

**Fig. 5.3 Nuove coordinate attribuite ai singoli target**

La fase successiva all'allineamento prevede la creazione della nuvola densa di punti. La mancanza di alcune parti dell'edificio, soprattutto quelle sottostanti le sporgenze del tetto, e la presenza di qualche linea distorta, hanno portato alla decisione di integrare questo modello con quello generato dalle immagini scattate con la fotocamera Sony Alpha 77. Si è proceduto dapprima creando un nuovo chunk per la fotogrammetria da terra; dover aver eseguito l'allineamento anche di questo ultimo chunk, si è agito ad allineare i due chunk (quello della fotogrammetria aerea con quello della fotogrammetria terrestre). Dall'unione dei due chunk ne è venuta fuori una nuvola sparsa complessiva di 60,764.

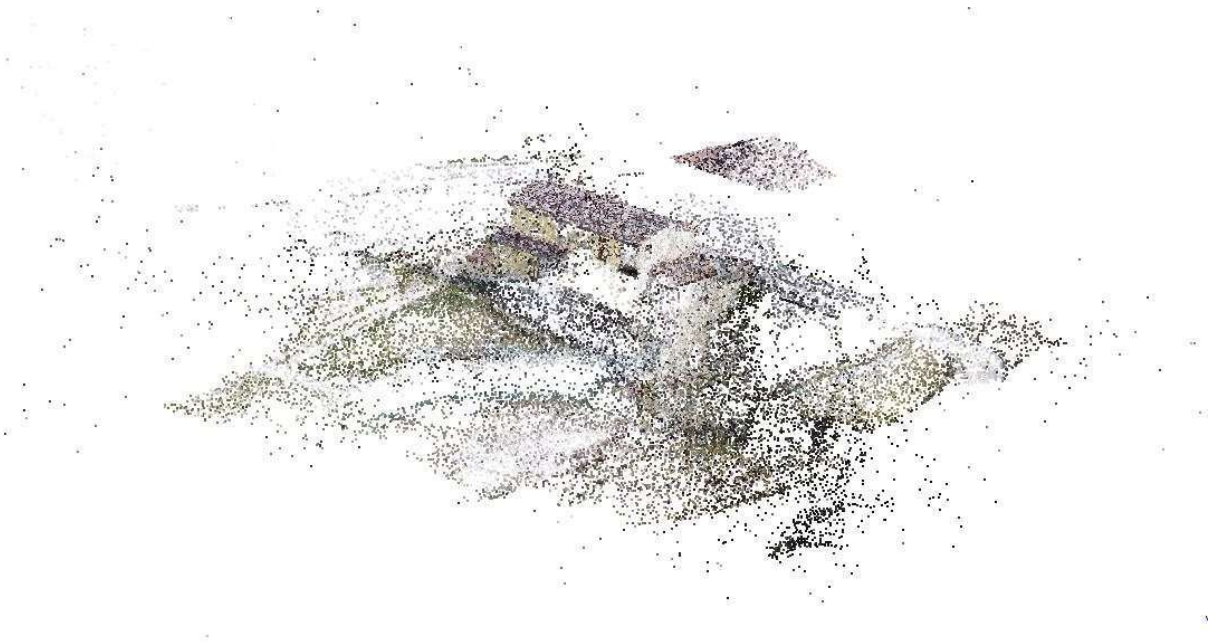
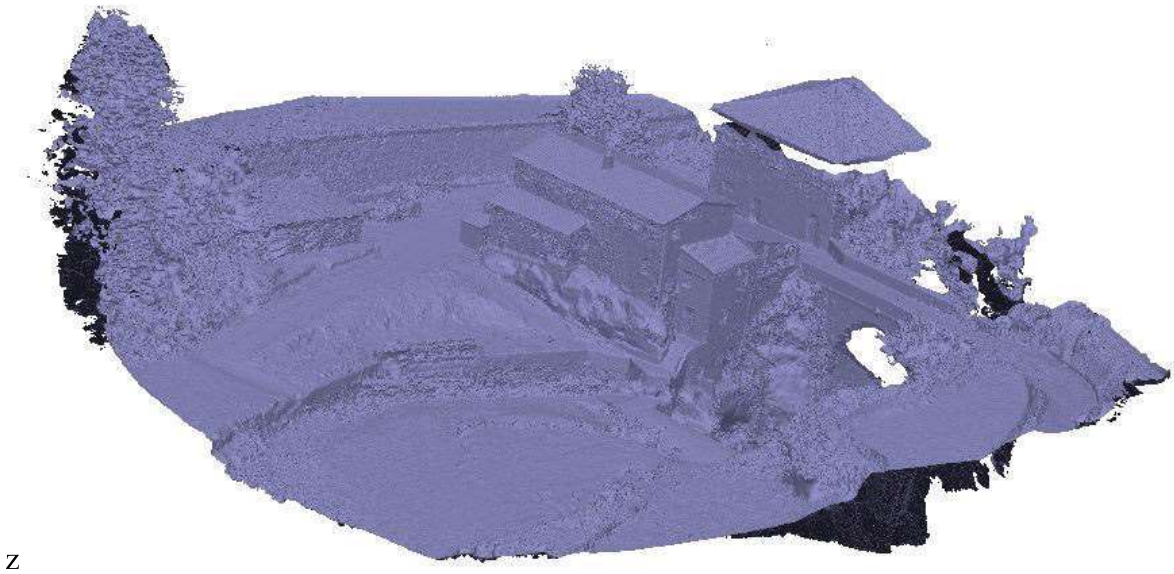


**Fig. 5.4 Nuvola di punti sparsa**

Settati i parametri della qualità (alta) e modalità di filtro di profondità (moderato), si è proceduto alla generazione della nuvola densa di punti. Sono stati necessari circa 27 minuti per ottenere la nuvola, composta da 56,132,780 punti.

**Fig. 5.5 Nuvola di punti densa**

A questo punto, dopo aver settato i parametri della qualità (anche in questo caso alta), il filtro di profondità (moderato), e attivando la funzione di interpolazione degli attributi, partendo dalla nuvola densa, è stato possibile elaborare la Mesh3D (poligonizzazione della nuvola densa), ottenendo un modello solido della superficie rilevata, e la texture, processo che consiste nella distribuzione delle informazioni cromatiche provenienti dai diversi fotogrammi alla mesh. L'intera operazione della creazione delle varie mesh è durata circa 57 minuti.



z

**Fig. 5.6 Mesh modello solido**

Fig. 5.7 Mesh modello texturizzato

Proprio partendo dalle mesh ottenute si possono estrapolare le ortofoto dei vari prospetti o delle varie viste più significative. Si ha la possibilità di selezionare sia una vista orientata lungo gli assi di riferimento x,y,z, che una vista personalizzata (inserendo degli appositi markers) a seconda delle esigenze. Poiché il mulino non presenta alcun lato coincidente con uno degli assi di riferimento cartesiano, tutte le ortofoto sono state create su viste personalizzate.

Fig. 5.8 Esempi di ortofoto, lato ovest

Fig 5.9 Esempio di ortofoto, lato sud

Tra i vari elaborati finali che Metashape è in grado di eseguire, è possibile ottenere anche un modello digitale delle varie altitudini rilevate (DEM-Digital Elevation Model), attribuendo ad ogni punto del modello una diversa colorazione, indicativa dell'altezza corrispondente.

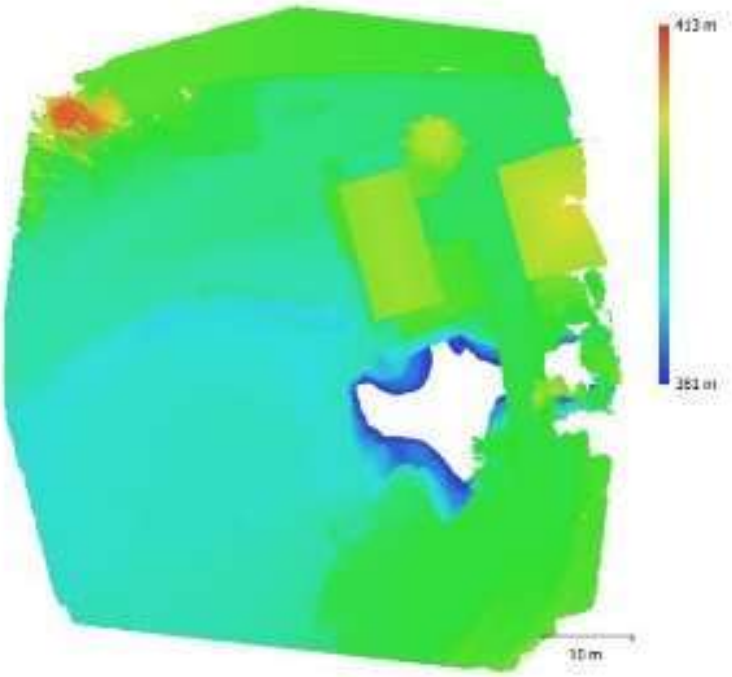



**Fig. 5.10 DEM-Digital Elevation Model**

| | |
|---|---|
| **General** | |
| Cameras | 140 |
| Aligned cameras | 134 |
| Markers | 10 |
| Coordinate system | WGS 84 / UTM zone 33N (EPSG::32633) |
| Rotation angles | Yaw, Pitch, Roll |
| **Point Cloud** | |
| Points | 60,764 of 76,280 |
| RMS reprojection error | 0.115646 (1.63035 pix) |
| Max reprojection error | 0.299987 (30.0686 pix) |
| Mean key point size | 12.5609 pix |
| Point colors | 3 bands, uint8 |
| Key points | No |
| Average tie point multiplicity | 3.23736 |
| **Alignment parameters** | |
| Accuracy | Low |
| Generic preselection | Yes |
| Key point limit | 40,000 |
| Tie point limit | 10,000 |
| Adaptive camera model fitting | Yes |
| Matching time | 20 seconds |
| Alignment time | 21 seconds |
| **Optimization parameters** | |
| Parameters | f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2 |
| Adaptive camera model fitting | Yes |
| Optimization time | 2 seconds |
| Software version | 1.5.3.8469 |
| **Dense Point Cloud** | |
| Points | 56,132,780 |
| Point colors | 3 bands, uint8 |
| **Depth maps generation parameters** | |
| Quality | High |
| Filtering mode | Moderate |
| Processing time | 12 minutes 39 seconds |
| **Dense cloud generation parameters** | |
| Processing time | 27 minutes 8 seconds |
| Software version | 1.5.3.8469 |
| **Model** | |
| Faces | 10,794,665 |
| Vertices | 5,421,475 |
| Vertex colors | 3 bands, uint8 |
| Texture | 4,096 x 4,096, 4 bands, uint8 |
| **Depth maps generation parameters** | |
| Quality | High |
| Filtering mode | Moderate |
| Processing time | 12 minutes 39 seconds |
| **Reconstruction parameters** | |
| Surface type | Arbitrary |
| Source data | Dense cloud |
| Interpolation | Enabled |
| **General** | |
| Strict volumetric masks | No |
| Processing time | 35 minutes 37 seconds |
| **Texturing parameters** | |
| Mapping mode | Adaptive orthophoto |
| Blending mode | Mosaic |
| Texture size | 4,096 |
| Enable hole filling | Yes |
| Enable ghosting filter | Yes |
| UV mapping time | 1 minutes 19 seconds |
| Blending time | 8 minutes 31 seconds |
| Software version | 1.5.3.8469 |
| **Orthomosaic** | |
| Size | 14,223 x 15,117 |
| Coordinate system | WGS 84 (EPSG::4978) |
| Colors | 3 bands, uint8 |
| **Reconstruction parameters** | |
| Blending mode | Mosaic |
| Surface | Mesh |
| Enable hole filling | Yes |
| Processing time | 5 minutes 28 seconds |
| Software version | 1.5.3.8469 |
| **Software** | |
| Version | 1.5.3 build 8469 |
| Platform | Windows 64 |

**Fig. 5.11 Parametri di processamento del modello tridimensionale del mulino Pignoloni**

La stessa procedura è stata adottata anche per l'elaborazione dei dati raccolti sul campo per il mulino di "Santa Maria in Lapide". Il software usato anche per il secondo mulino è stato sempre Agisoft Metashape. La prima fase è stata quello dello studio della fotogrammetria, che per questo mulino, a causa delle difficoltà riscontrate sul posto, ha riguardato solo le immagini fatte con la fotocamera e purtroppo non quelle che si poteva avere con la strumentazione UAV (drone).

Per prima cosa sono state visionate ed analizzate tutte le immagini raccolte. Delle 30 immagini a disposizione, due non sono state utilizzate in quante erano state fatte con il solo intento di avere un riferimento visivo e indicativo di quello che stava intorno al mulino.

Caricate le immagini scelte, si è tentato di fare l'allineamento. Il primo tentativo non è stato molto efficace perché il software a causa della presenza dell'edera sulla parete della facciata principale, non riusciva a capire come allineare le foto che stavano alla sua sinistra e quelle che stavano alla sua destra.

**Fig. 5.12 Particolare della facciata principale**

È stato quindi deciso di dividere le foto allineate (il software aveva allineato solo quelle alla sinistra dell'edera) da quelle non allineate, creando un nuovo chunk. Questa volta lanciando il comando di allineamento (che precedentemente non sono state allineate) ha portato ad avere un nuovo chunk con tutte le immagini allineate. Ciò ha permesso di non reiterare ulteriormente la creazione di nuovi chunk.

Avendo a disposizione due chunk con immagini tutte allineate tra loro, è stato lanciato il comando "merge chunk" per l'unione dei due. Ma il risultato non ha portato i suoi frutti, in quanto ancora faceva fatica a capire come le due parti potessero essere unite tra loro. Si è fatto ricorso all'utilizzo dei "markers", individuando su ogni immagine possibile, quali erano i punti in comuni tra le due parti. È stato necessario inserire diversi markers affinché l'allineamento si potesse realizzare. Settando come parametro il massimo dell'accuratezza possibile, l'allineamento è durato circa sedici minuti, generando di fatto anche una prima nuvola di punti sparsa, fatta di 191 mila punti.

**Fig. 5.13 Nuvola di punti sparsa**

A questo punto è stato possibile generare la nuvola densa di punti, che rappresenta la fase più lunga dell'operazione di elaborazione. Settati i parametri della qualità (alta) e modalità di filtro di profondità (aggressiva), è stato possibile ottenere la nuvola di punti densa composta da 50,5 milioni di punti.

**Fig. 5.14 Nuvola di punti densa**

Prima ancora di creare la mesh 3D già era visibile a occhio che mancavano delle parti, alcune per via della carenza di immagini (ad esempio la falda del tetto sul lato sinistro) e altre per la presenza dell'edera, facendo risultare un buco molto esteso sulla parete principale.
A questo punto, dopo aver settato i parametri della qualità (anche in questo caso alta), il filtro di profondità (aggressivo), e attivando la funzione di interpolazione degli attributi, partendo dalla nuvola densa, è stato possibile elaborare la Mesh3D (poligonizzazione della nuvola densa), ottenendo un modello solido della superficie rilevata, e la texture. L'intera operazione della creazione delle varie mesh ha impiegato più di un'ora di tempo.

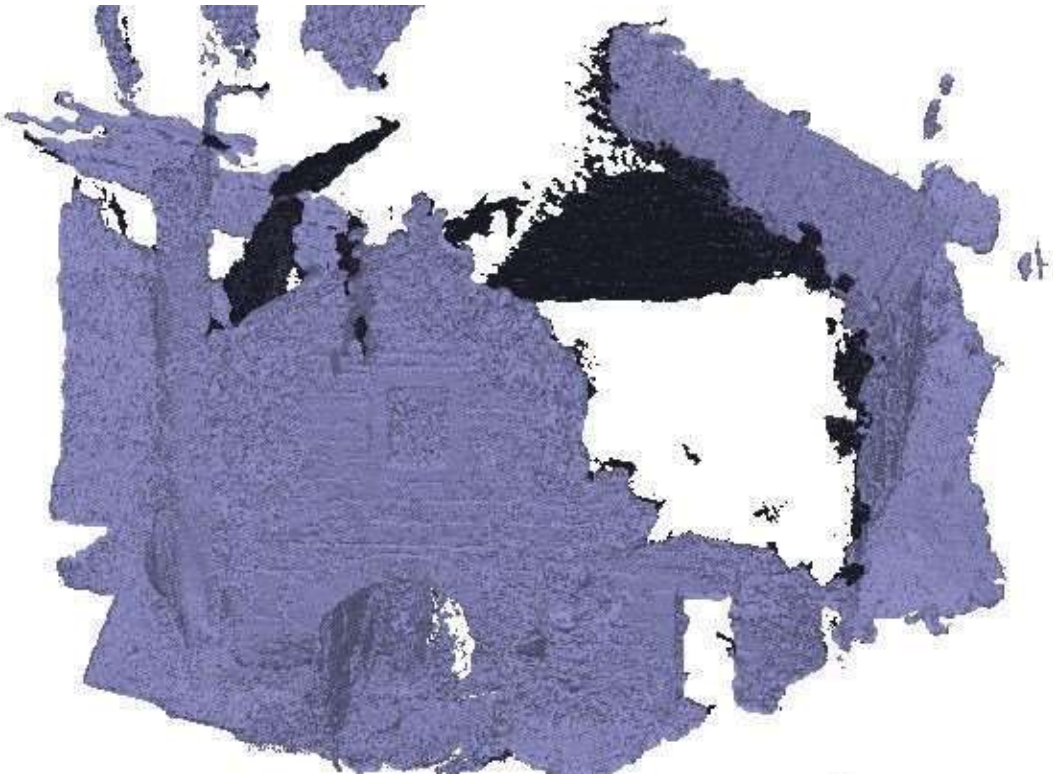


Fig. 5.15 Mesh modello solido

Fig. 5.16 Mesh modello texturizzato

Partendo dalle mesh ottenute si possono estrapolare le ortofoto dei vari prospetti o delle varie viste più significative, sebbene fosse nota la problematica delle parti di edificio mancante.

Poiché il mulino non presenta alcun lato coincidente con uno degli assi di riferimento cartesiano, tutte le ortofoto sono state create su viste personalizzate.

**Fig. 5.17 Ortofoto della facciata principale (est) del mulino**

**Fig. 5.18 Ortofoto del lato nord del mulino**

Tra i vari elaborati finali che Metashape è in grado di eseguire, è possibile ottenere il modello che mostra l'overlap delle immagini. Si nota subito che il modello è prevalentemente di colore blu, che indica come ogni punto del mulino sia stato catturato dalle immagini per almeno 10 volte. Mostra anche tutte le prese di camera di ogni immagine utilizzata, evidenziando anche quali siano state le difficoltà avvenute per la cattura delle immagini in fase di rilievo. I punti da cui sono state catturate le immagini sono tutti troppo ravvicinati al mulino non permettendo una visione più ampia delle parti dell'edificio.

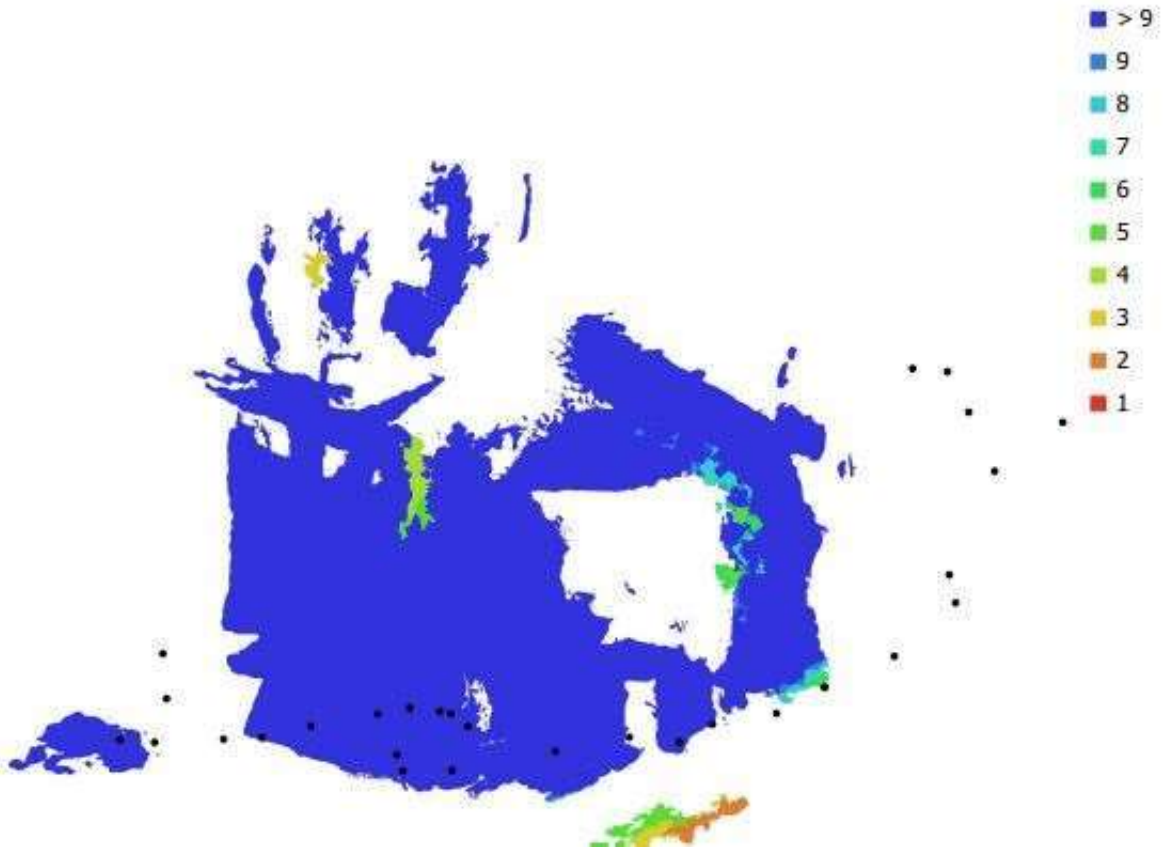



**Fig. 5.19 Punti di scatto fotografico, e sovrapposizione (overlap) delle immagini**

## 5.2 Registrazione dati da MLS (mobile laser scanner)

I laser scanner mobili grazie all'utilizzo della tecnologia SLAM sono in grado di determinare metricamente uno spazio non noto tramite l'utilizzo di un sensore laser, che costruisce il contesto man mano che lo percorre. Durante la fase di acquisizione vengono estratte delle "features" dallo spazio misurato, riosservate più volte quando il laser si muove. Questi strumenti sono in grado di raccogliere migliaia di punti al secondo. Tutti questi punti, per essere visionati nel loro complesso (nuvola di punti) devono essere caricati e processati attraverso il software del pacchetto GeoSLAM, il GeoSLAM Hub. Nel caso del primo mulino (Pignoloni) è stato possibile ottenere la nuvola densa in tempi relativamente brevi; infatti, sono stati impiegati circa 10 minuti di tempo per avere un file in formato LAS. Per visualizzare e modificare la nuvola di punti è stato usato il software "Cloud Compare", un software gratuito (licenza GNU), in grado di leggere nuvole di punti in diversi formati LAS, LAZ, PLY, BIN. Cloud Compare nasce come strumento per la comparazione di nuvole, ma poi è stato implementato in un software di elaborazione di nuvole di punti con algoritmi piuttosto avanzati.

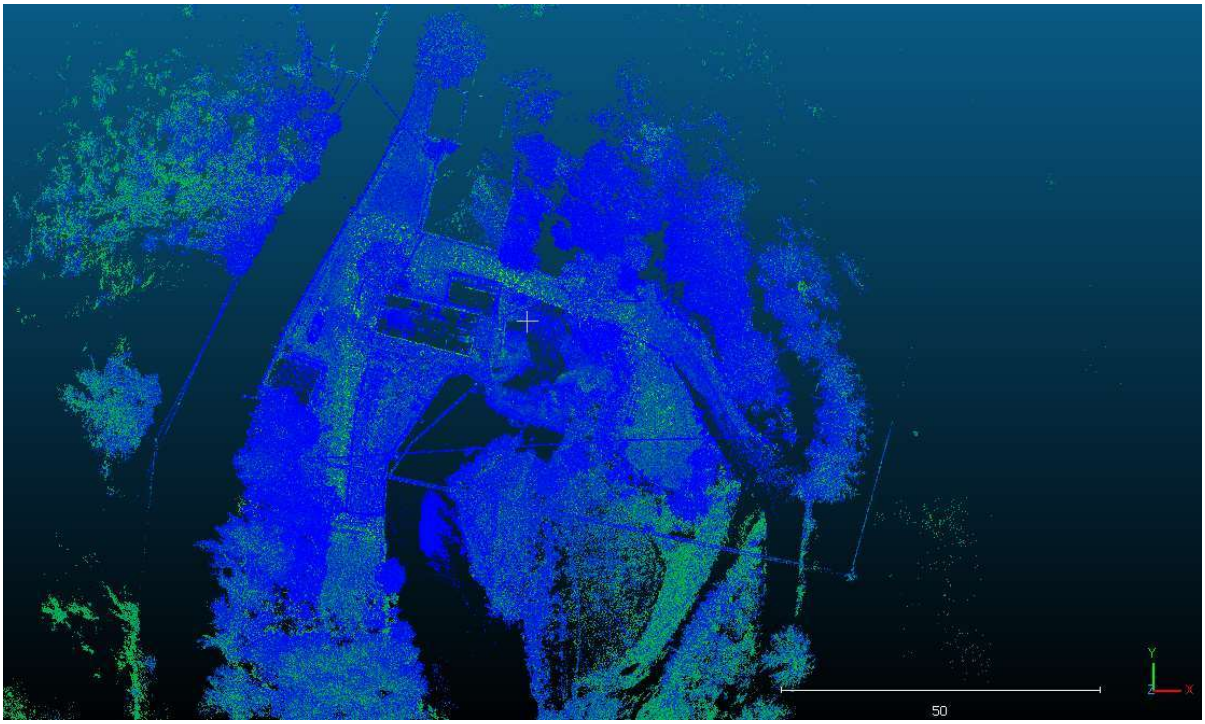



Fig. 5.20 Nuvola di punti ottenuta con laser scanner mobile

Caricata la nuvola di punti del mulino (40,9 milioni di punti) si procede ad un'operazione di ripulitura di tutte quelle parti che non servono ai fini del nostro lavoro, e che al tempo stesso appesantiscono solamente i dati del nostro modello. Eliminate tutte le parti considerate superflue si genera una nuova nuvola composta da 35 milioni di punti.

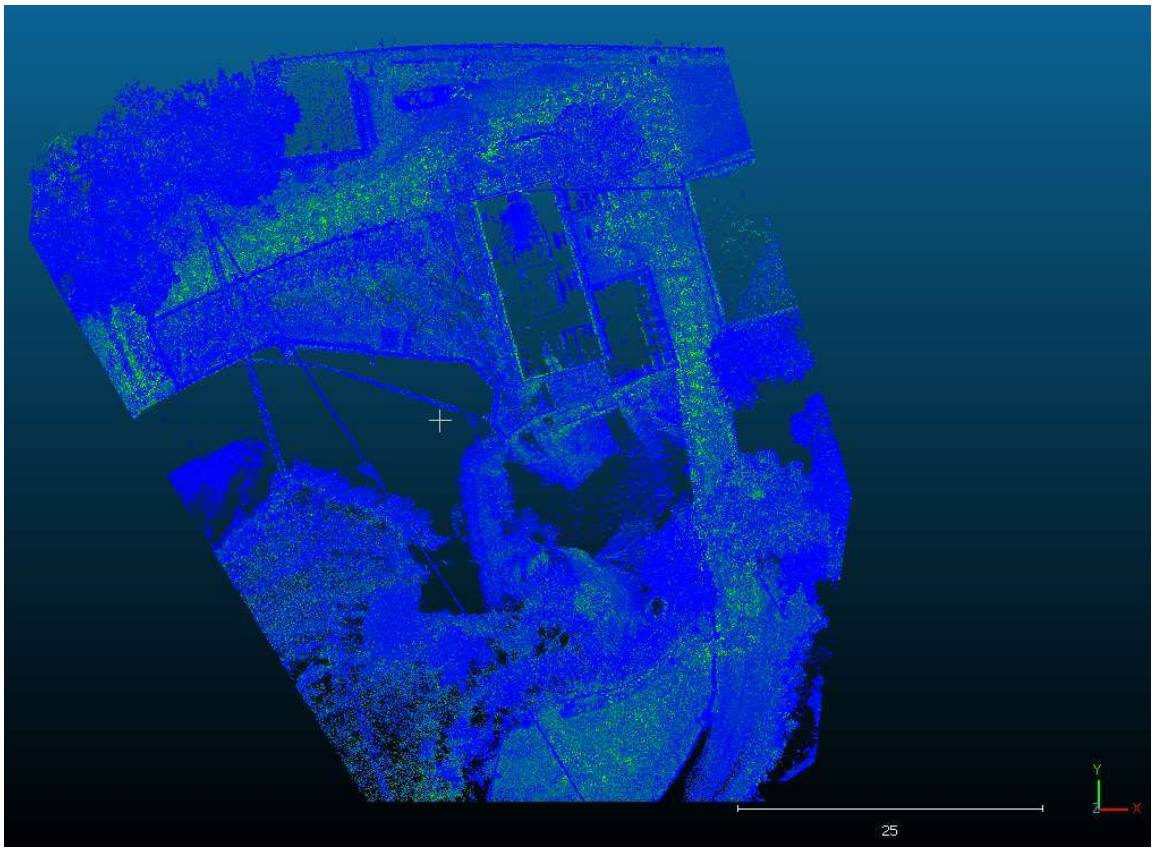



**Fig. 5.21 Nuvola di punti ripulita dalle parti superflue**

Il nostro fine in questa fase è quello di confrontare la nuvola di punti ottenuta con il laser scanner mobile con quella che abbiamo ottenuto dai dati della fotogrammetria tramite Metashape. Per fare un'operazione simile è condizione necessaria che entrambe le nuvole siano della stessa scala e quindi che abbiano le stesse coordinate. Avendo già georeferenziato la nuvola di punti della fotogrammetria, resta da fare la stessa cosa per quella del laser scanner mobile. Quindi anche in questo caso ci serviamo dei target che abbiamo posizionato a terra in fase di rilievo, in particolare delle loro coordinate. La nuvola di punti del laser scanner mobile ovviamente è in grado di rilevare la presenza a terra dei target, grazie alla rappresentazione in falsi colori sulla scala dell'intensità (valore scalare). Resta quindi da cercarli all'interno della nuvola e attribuire loro le coordinate del nostro sistema di riferimento, ricordando che il sistema di riferimento usato è quello WGS 84 / UTM zone 33N (EPSG::32633). Il software agisce con un'operazione di rototraslazione piana, andando a posizionare la nuvola di punti con le nuove coordinate e con una misura di grandezza in scala.

A questo punto si può procedere alla comparazione tra la nuvola di punti ottenuta con la fotogrammetria (su Metashape) e quella ottenuta con il laser scanner mobile (su Cloud Compare). Esportata la nuvola di punti da Metashape in formato LAS, la si può caricare su Cloud Compare. Essendo le nuvole georeferenziate, il software le fa trovare sovrapposte una volta caricati i file.

Un altro metodo per georeferenziare una nuvola di punti si pu procedere con un'operazione di allineamento di una nuvola di punti sull'altra, già precedentemente georeferenziata, e successivamente applicare un'operazione di rototraslazione. Nel caso specifico del mulino in esame, la nuvola di punti della fotogrammetria è stata già georeferenziata. Pertanto, si è proceduto a caricarla su Cloud Compare. Decidendo di tenere come sistema di riferimento la nuvola georeferenziata, sono stati allineati tutti i punti della nuvola del laser scanner su quella della fotogrammetria, usando almeno tre punti noti e particolari (ad esempio i target usati a terra) dei quali si conosce la posizione (quelli nella fotogrammetria). Il software è in grado di rivelare anche il valore dello scarto quadratico medio (RSM), ovvero confronta la differenza tra i vari punti delle due nuvole, che nel caso del mulino in oggetto si attesta nell'ordine di 1,5 centimetri.

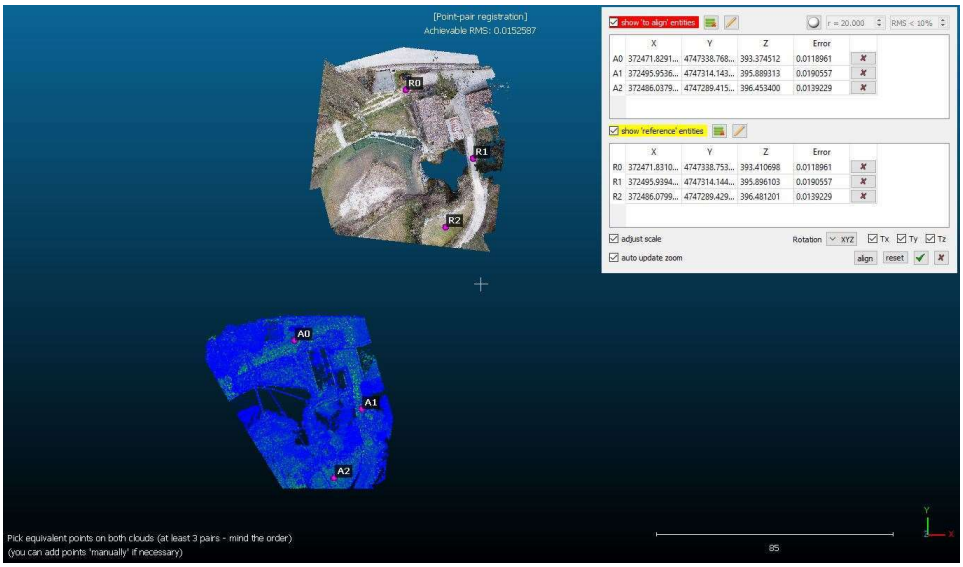



**Fig. 5.22 Fase di allineamento delle nuvole di punti**

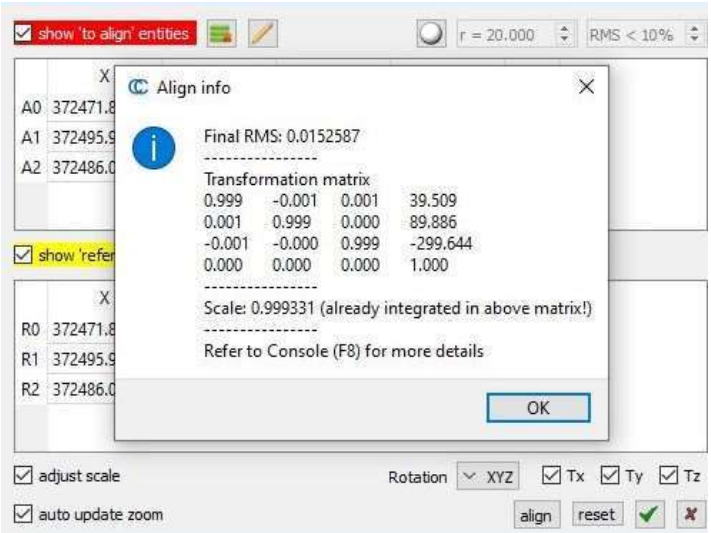



**Fig. 5.23 Valore dello scarto quadratico medio (RMS)**

## 5.3 Analisi delle nuvole di punti (C2C)

Del modello allineato, quando entrambe le nuvole sono sovrapposte, la differenza, sul valore della distanza tra nuvole di punti, tra la nuvola di riferimento della fotogrammetria e quella del laser scanner, può essere calcolata utilizzando lo strumento "Cloud-to-Cloud" che sfrutta l'algoritmo "Nearest Neighbour" per calcolare la distanza euclidea tra ogni punto della nuvola comparata e il punto più vicino della nuvola di riferimento. Ponendo la soglia della distanza tra le due nuvole di punti a 0,2 metri, si possono notare tutte le differenze tra le due nuvole. Come si può notare nell'immagine, questa nuvola di punti con una gradazione colorata, classifica ogni punto in base alla distanza dalla nuvola di riferimento; in rosso sono evidenziate tutti quei punti che, nel confronto tra le due nuvole, mostrano una lontananza intorno ai 20 centimetri. Man mano che si passa al giallo, quindi al verde e per finire al blu, ci sono quei punti delle nuvole che nel confronto C2C si avvicinano tra di loro fino a coincidere. La maggior parte dei punti in rosso sono presenti soprattutto nelle parti di vegetazione delle nuvole di punti, questo è dovuto alla difficile elaborazione, tramite dati della fotogrammetria, in particolare delle chiome degli alberi.

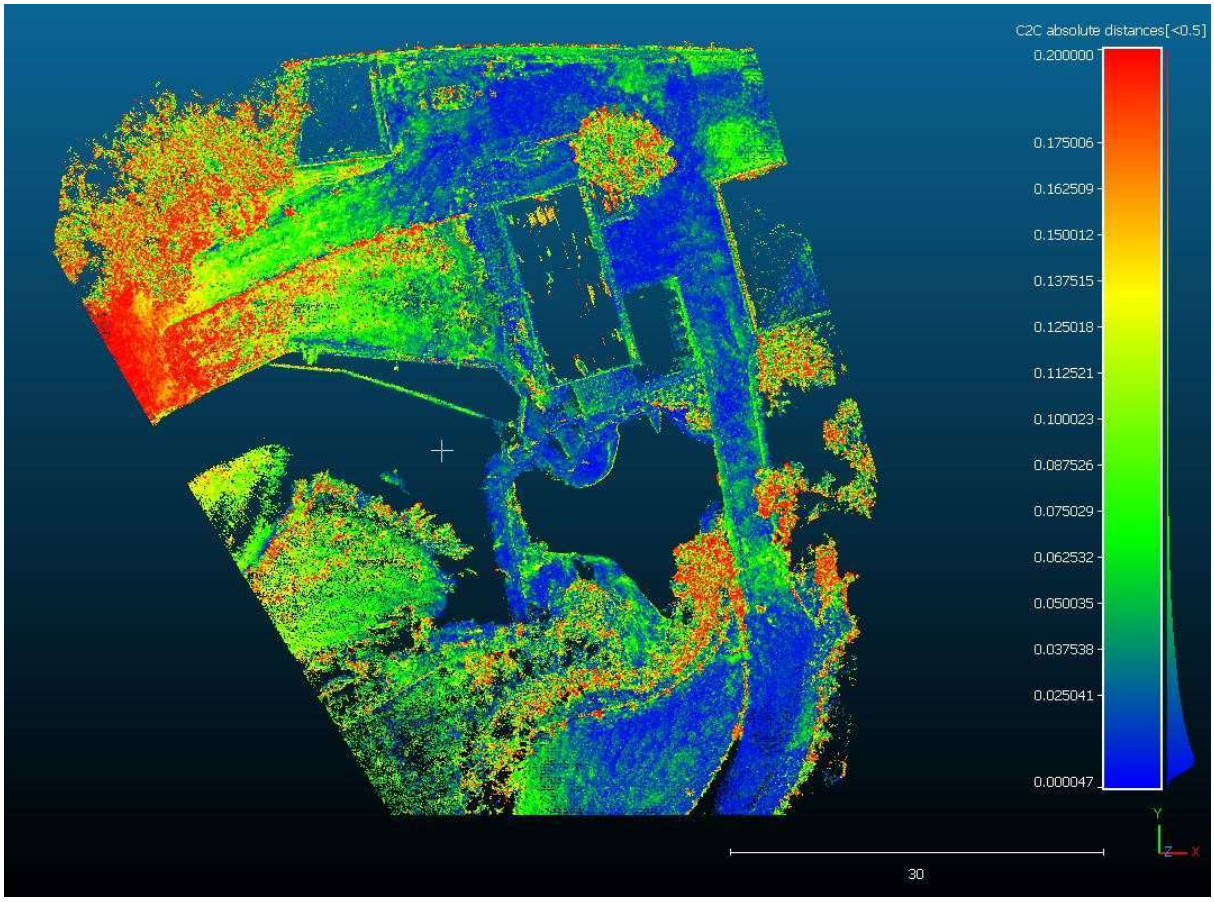



Fig. 5.24 Analisi Cloud-to-Cloud (C2C)

Dall'istogramma a lato si può capire che la maggior parte dei punti delle nuvole sono molto vicini tra di loro quasi a coincidere del tutto. Nel dettaglio, guardando i grafici a seguire, si capisce che circa il 73% dei punti della nuvola di punti del laser scanner mobile coincidono o arrivano a differire fino a 5 centimetri rispetto a quella della fotogrammetria, l'87% si mantiene sotto i 10 centimetri di distanza e il 94% rientra nei 15 centimetri.

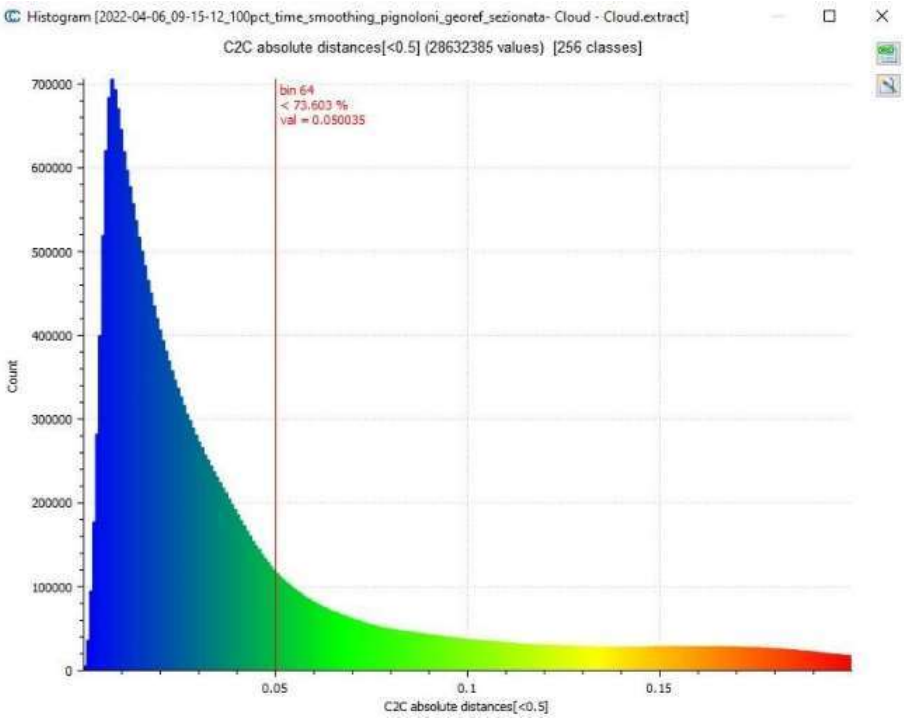



**Fig. 5.25 Istogramma della distribuzione gaussiana dei valori di distanza C2C con indicazione dei punti alla soglia di 5 cm**

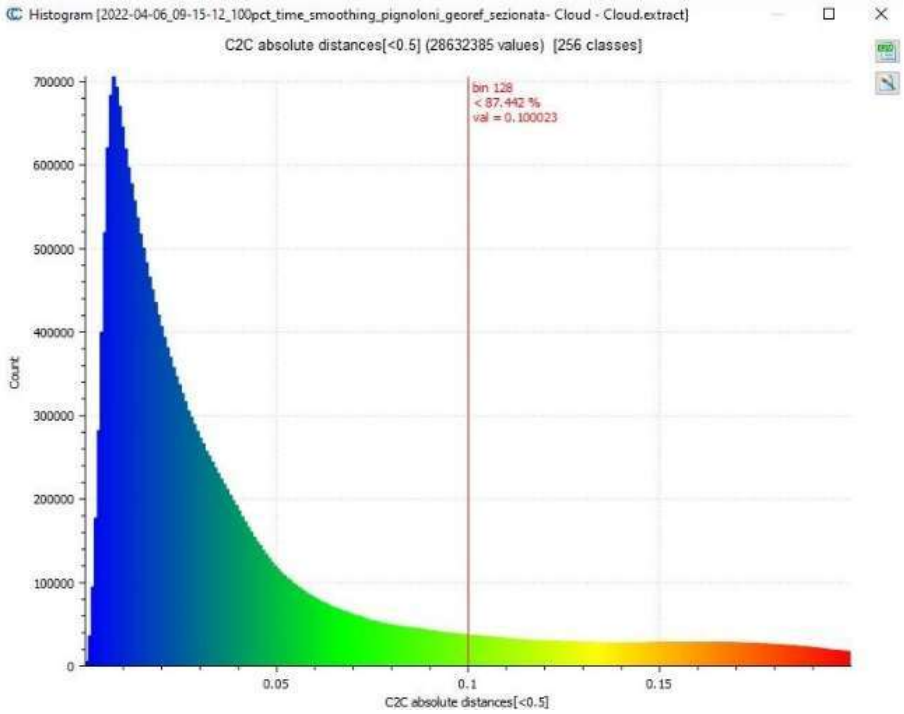



**Fig. 5.26 Istogramma della distribuzione gaussiana dei valori di distanza C2C con indicazione dei punti alla soglia di 10 cm**

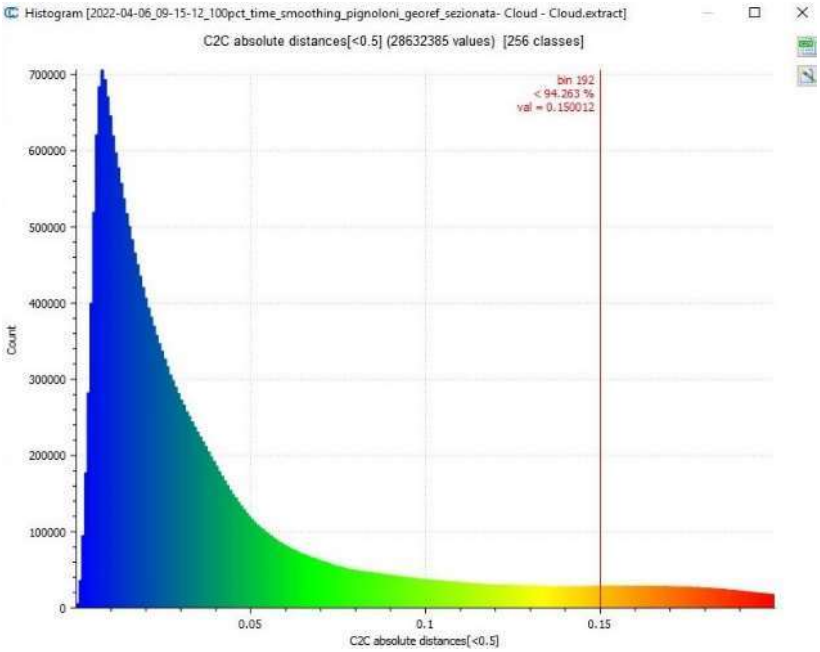



**Fig. 5.27 Istogramma della distribuzione gaussiana dei valori di distanza C2C con indicazione dei punti alla soglia di 15 cm**

Passando al secondo mulino, per elaborare i dati del laser scanner mobile tramite la piattaforma GeoSLAM Hub, sono stati necessari circa undici minuti. La nuvola di punti ottenuta con la tecnologia SLAM è formata da circa 43,5 milioni di punti. Di questi punti molti sono rappresentativi del paesaggio boschivo che accerchiano il mulino.

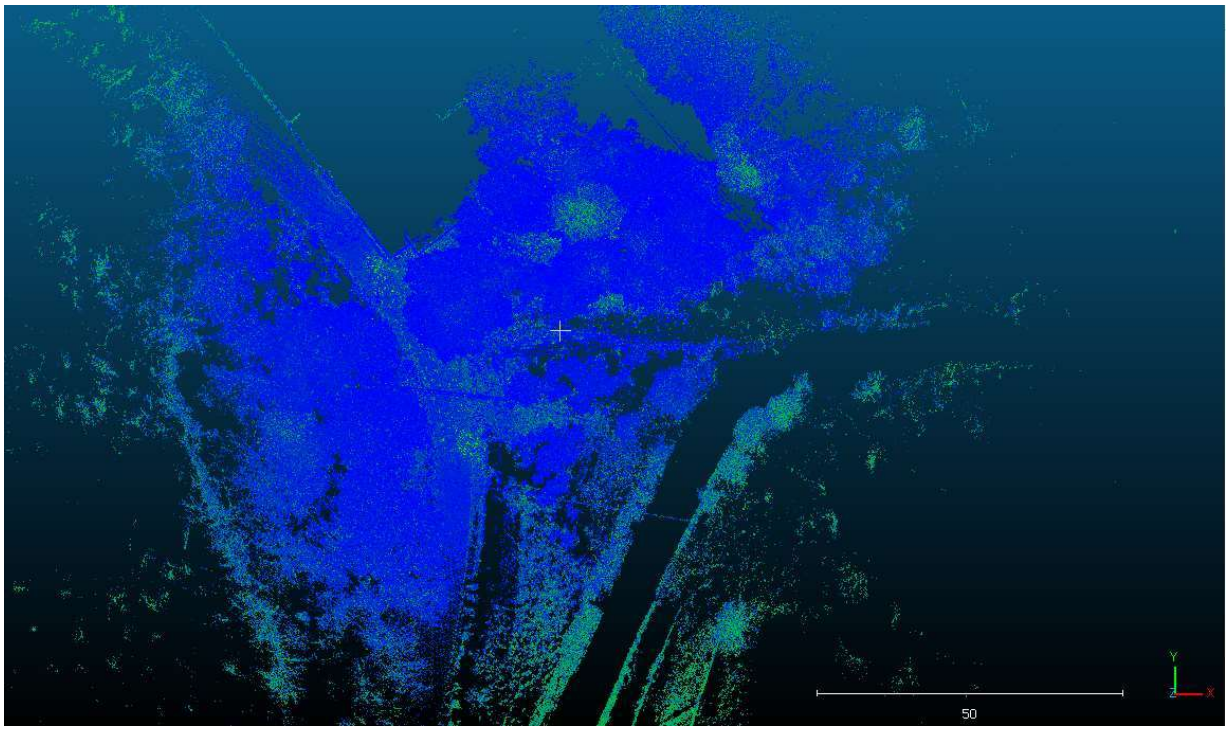



**Fig. 5.28 Nuvola di punti ottenuta con laser scanner mobile**

Dalla nuvola di punti, a primo impatto si fa fatica a capire dove si trova il mulino; le chiome degli alberi lo coprono interamente e di fatto lo nascondono alla vista. Ripulendo la nuvola da tutto quello che circonda il mulino, il numero dei punti della nuvola si riduce a 3,1 milioni di punti.

A differenza dell'altro mulino, in questo caso non è stato possibile georeferenziare la nuvola di punti. Le condizioni difficili incontrati sul luogo del rilievo non hanno permesso di usare il rilevatore GNSS. Per cui i risultati ottenuti con la nuvola di punti del laser scanner e della fotogrammetria permetteranno di avere un modello tridimensionale metricamente corretto, ma senza che questo possa avere delle coordinate esatte in un sistema di riferimento globale.

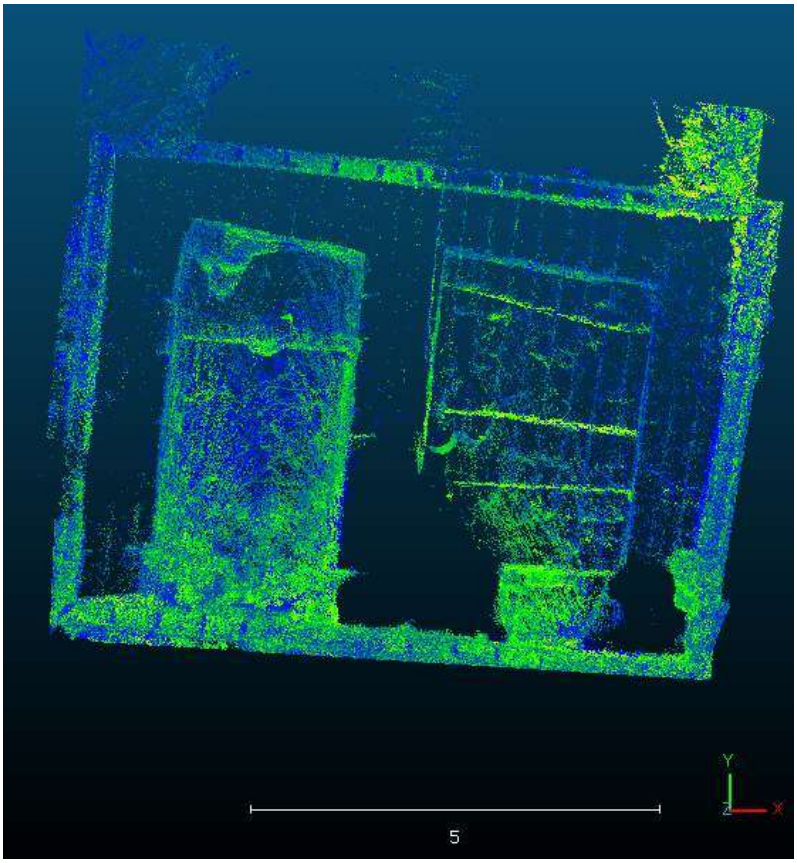



**Fig. 5.29 Nuvola di punti vista dall'alto del solo mulino ottenuta con laser scanner mobile**

La fase successiva è stata quella di allineare le due nuvole di punti su Cloud Compare. Si è preso come riferimento la nuvola di punti del GeoSLAM, essendo metricamente corretta in scala. Non potendo usare i target questa volta sono stati scelti almeno 3 punti chiari e definiti su entrambe le nuvole.

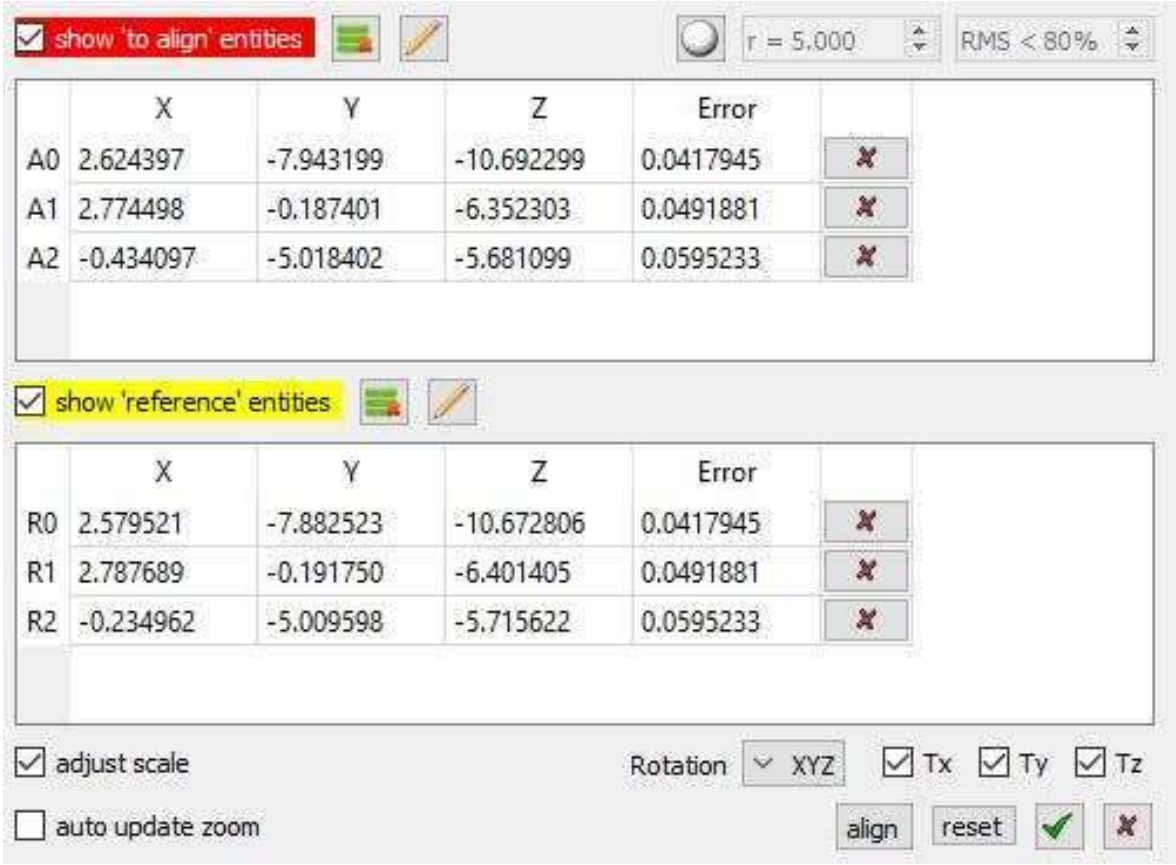



Fig. 5.30 Fase di allineamento delle nuvole di punti

La nuova nuvola di punti presenta un valore di scarto quadratico medio RSM pari a 5 centimetri, valore più che accettabile ai fini di un rilievo tridimensionale preciso.

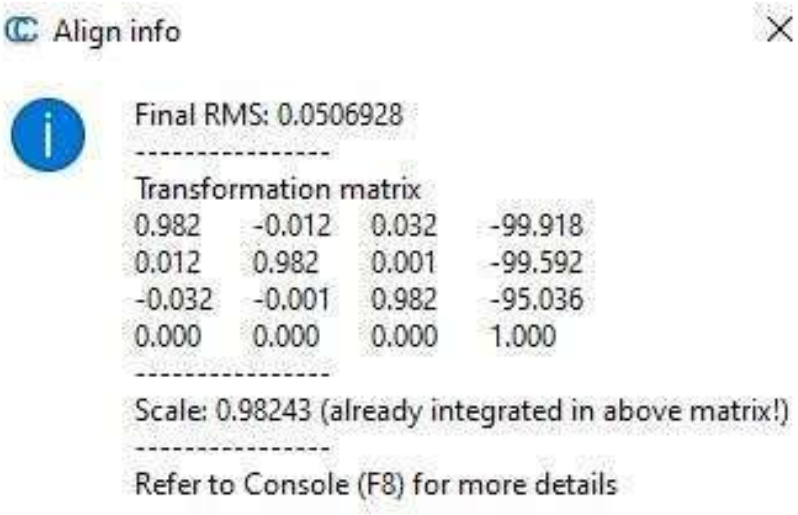



Fig. 5.31 Valore dello scarto quadratico medio (RMS)

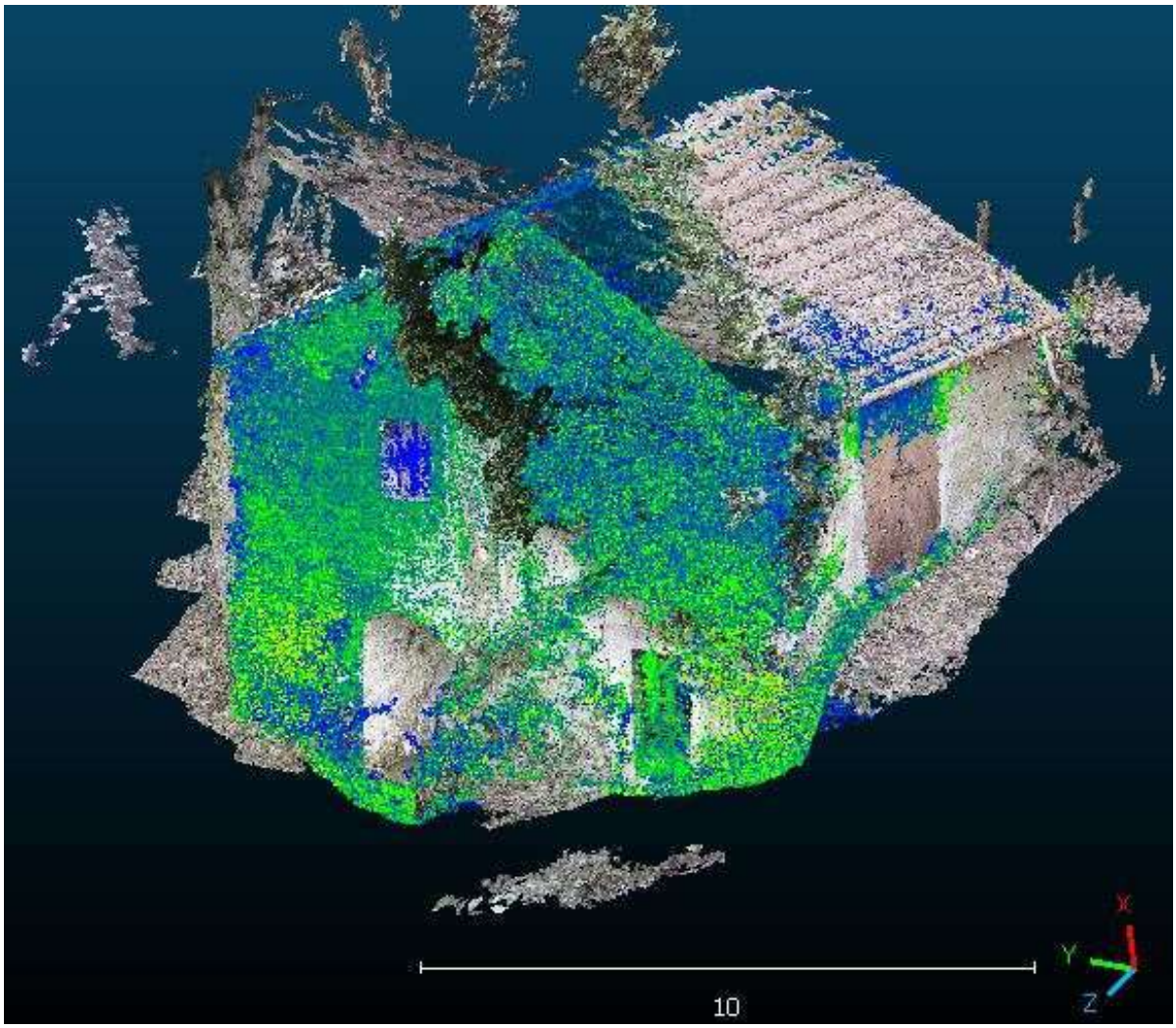



**Fig. 5.32 Nuvola di punti della fotogrammetria (in scala RGB) allineata a quella del laser scanner mobile (in scala di intensità)**

Del modello allineato, quando entrambe le nuvole risultano sovrapposte, la differenza sulla base del calcolo della distanza di punti tra la nuvola di punti di riferimento (laser scanner) e quella della fotogrammetria può essere calcolata utilizzando lo strumento "Cloud-to-Cloud". Utilizzando lo "scalar field" e impostando il fattore di planarità con l'identificazione del raggio locale a 0,2 metri, si possono notare tutte le differenze tra le due nuvole. Come si può notare nell'immagine, questa nuvola di punti con una gradazione colorata, classifica ogni punto in base alla distanza dalla nuvola di riferimento; in rosso sono evidenziate tutti quei punti che, nel confronto tra le due nuvole, mostrano una lontananza vicino ai 20 centimetri. Man mano che si passa al giallo, quindi al verde e per finire al blu, ci sono quei punti delle nuvole che nel confronto C2C si avvicinano tra di loro fino a coincidere. La presenza massiccia del colore rosso è dovuto (anche aspettato come risultato) a quelle parti di nuvola di punto totalmente assenti nella fotogrammetria.

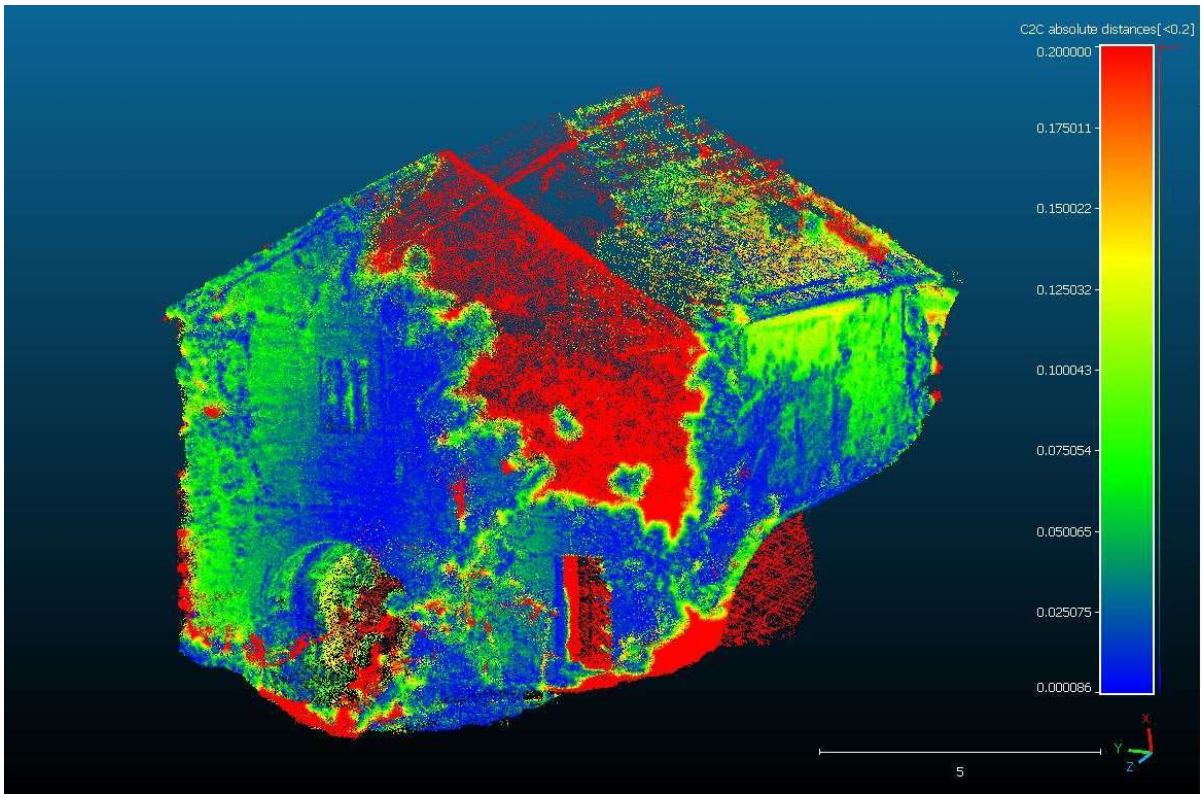



**Fig. 5.33 Analisi Cloud-to-Cloud (C2C)**

Come si evince dalla foto una parte della facciata è completamente in rosso, come in rosso sarebbe stata la falda del tetto sul lato sud del mulino. La presenza dell'edera rampicante sulla facciata e sul tetto non ha permesso di ottenere un riscontro nella fotogrammetria terrestre. Al tempo stesso il laser scanner mobile è riuscito a penetrare attraverso la vegetazione e rilevare la presenza della parete. Lo stesso laser è riuscito a generare dei punti nella nuvola anche per il piccolo vano del mulino che era sprovvisto di una porta. Questo vano, sebbene non ci fosse la porta, era completamente al buio e anche ad occhio nudo risultava difficile esplorare la struttura interna.

**Fig. 5.34 Particolare della facciata est con folta presenza dell'edera e vista interna del vano interno**

Quello che balza subito all'occhio, osservando il relativo istogramma è che una buona parte dei punti della nuvola mostrano una certa vicinanza fisica tra la nuvola di punti del laser scanner e la nuvola di punti della fotogrammetria. Nonostante i valori in rosso sembrano essere elevati (> 0.2 m), indicando che ci sono punti che non trovano alcun riscontro nel confronto (succede quando i punti delle parti di un oggetto non trovano il loro corrispondente nell'altra nuvola), il 93% dei punti assumono valore C2C inferiore ai 20 cm.

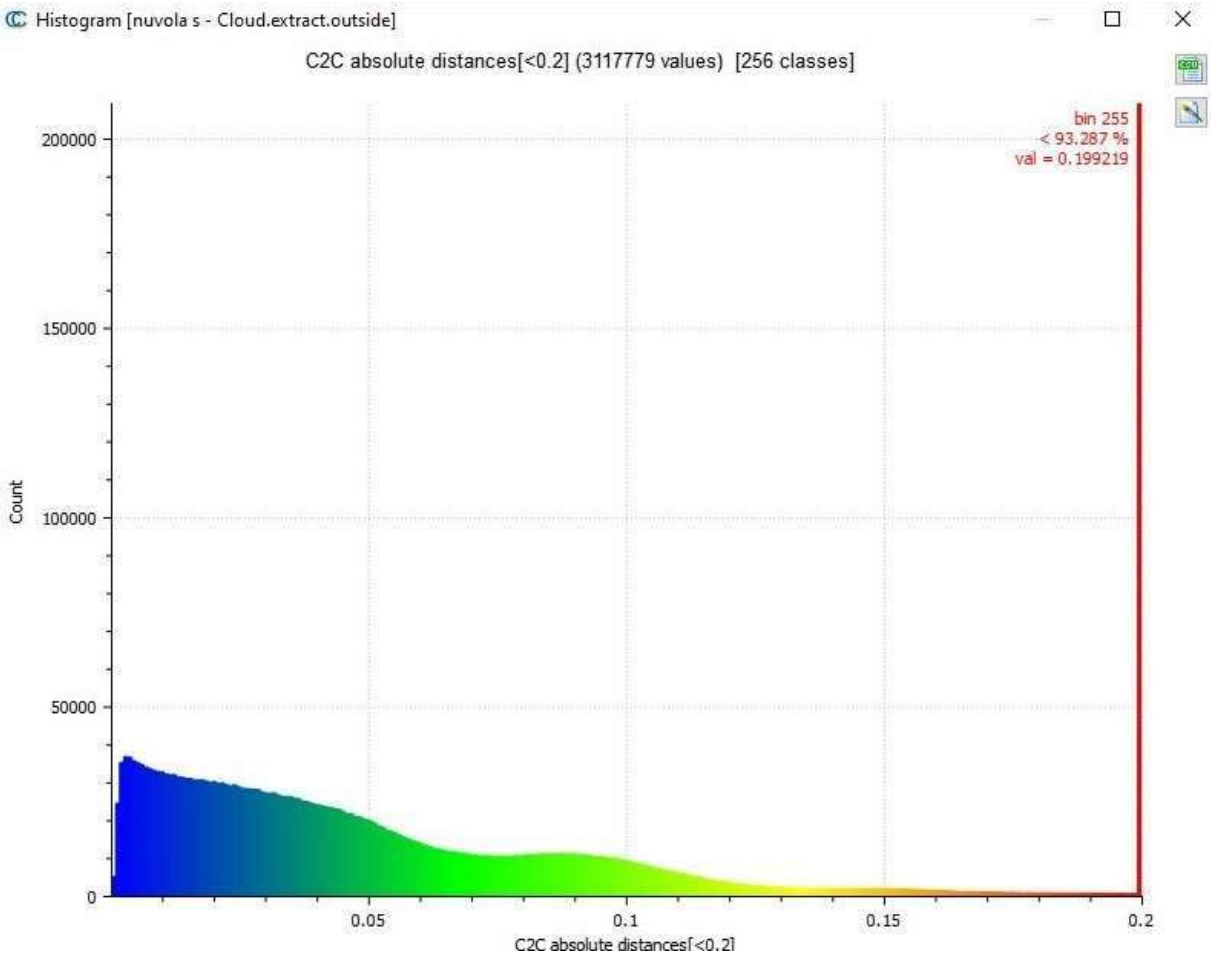



**Fig. 5.35 Istogramma della distribuzione gaussiana dei valori di distanza C2C con indicazione dei punti alla soglia di 20 cm**

# 6. RISULTATI

Lo scopo iniziale della tesi è stato quello di fornire un modello tridimensionale metricamente corretto dei mulini oggetto del lavoro.
Grazie al lavoro svolto con Agisoft Metashape e con Cloud Compare si sono ottenute le nuvole di punti dei due mulini. Tutto ha portato ad ottenere una nuvola di punti unica e quindi ad un modello tridimensionale.

**Fig. 6.1 Modello tridimensionale del mulino Pignoloni**

Un modello di questo tipo, sottoforma di nuvola di punti permette di fare diversi tipi di rappresentazione. La nuvola di punti ottenuta dal laser scanner può essere visualizzata in diversi valori scalari che consentono una diversa rappresentazione della nuvola in falsi colori; una con gradazione in scala di grigi e un'altra su valori dell'intensità, ad esempio.
Sfruttando queste diverse rappresentazioni è possibile vedere un modello che evidenzia solo la parte dell'oggetto che ci interessa (il mulino) in scala di intensità, lasciando il contesto e il paesaggio circostante in scala di grigio.

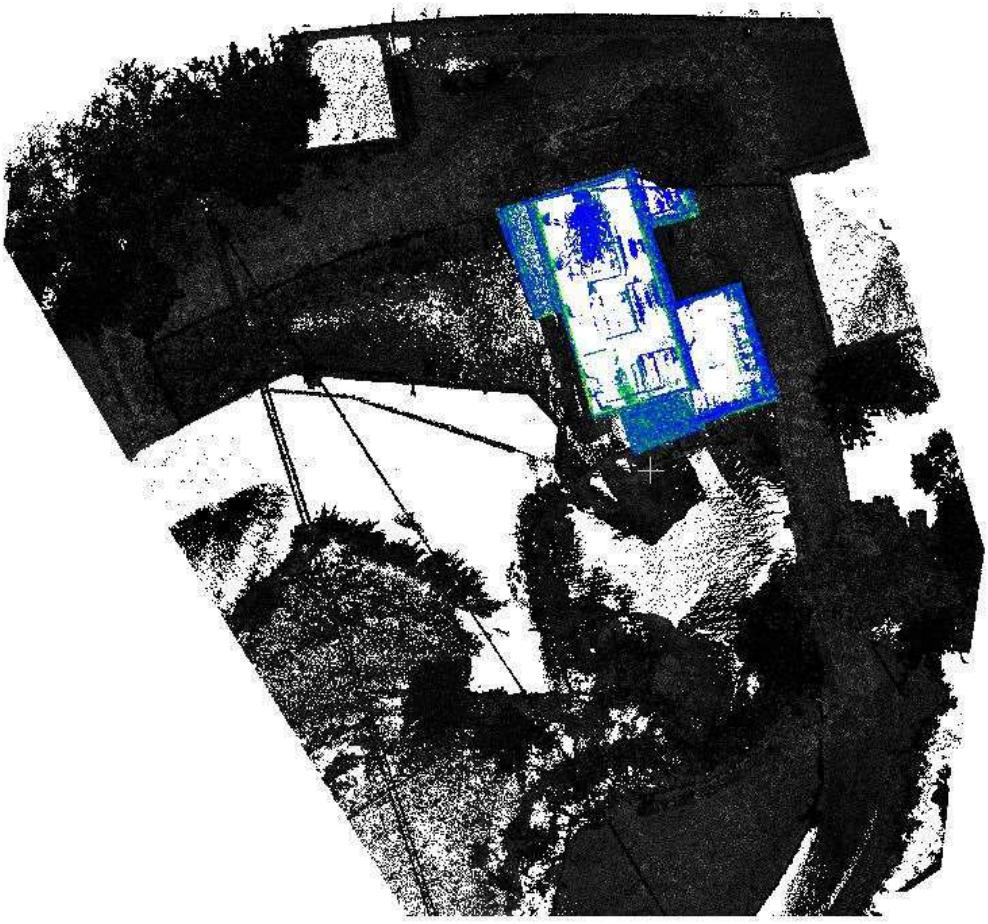


**Fig. 6.2 Nuvola di punti del mulino Pignoloni in planimetria**

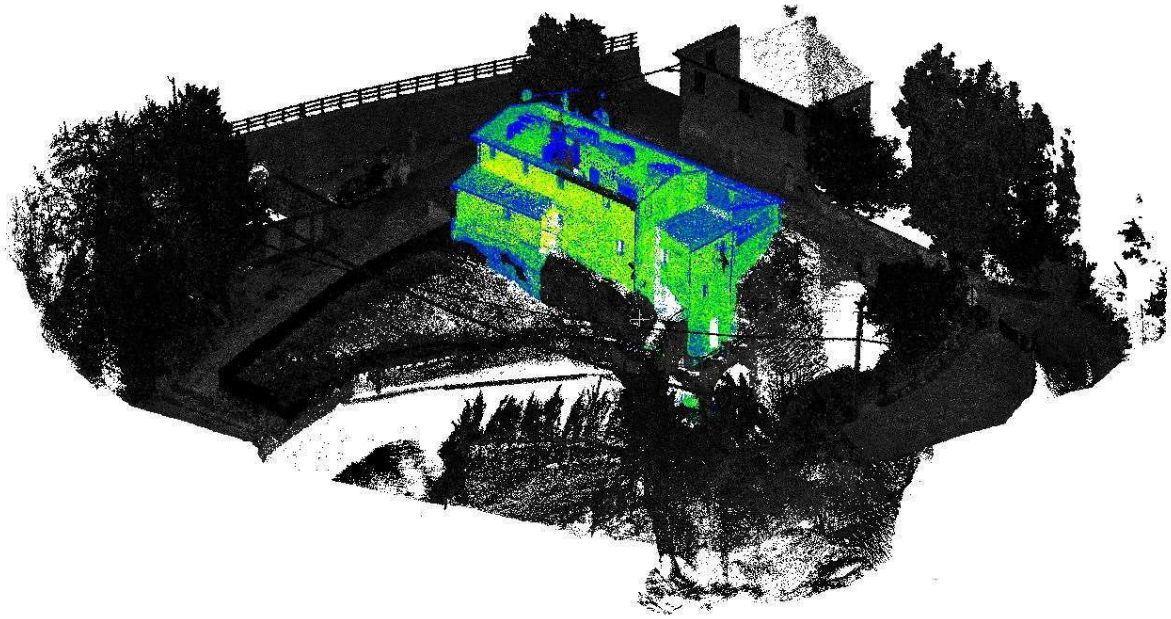


**Fig. 6.3 Nuvola di punti del mulino Pignoloni in una visione assonometrica**

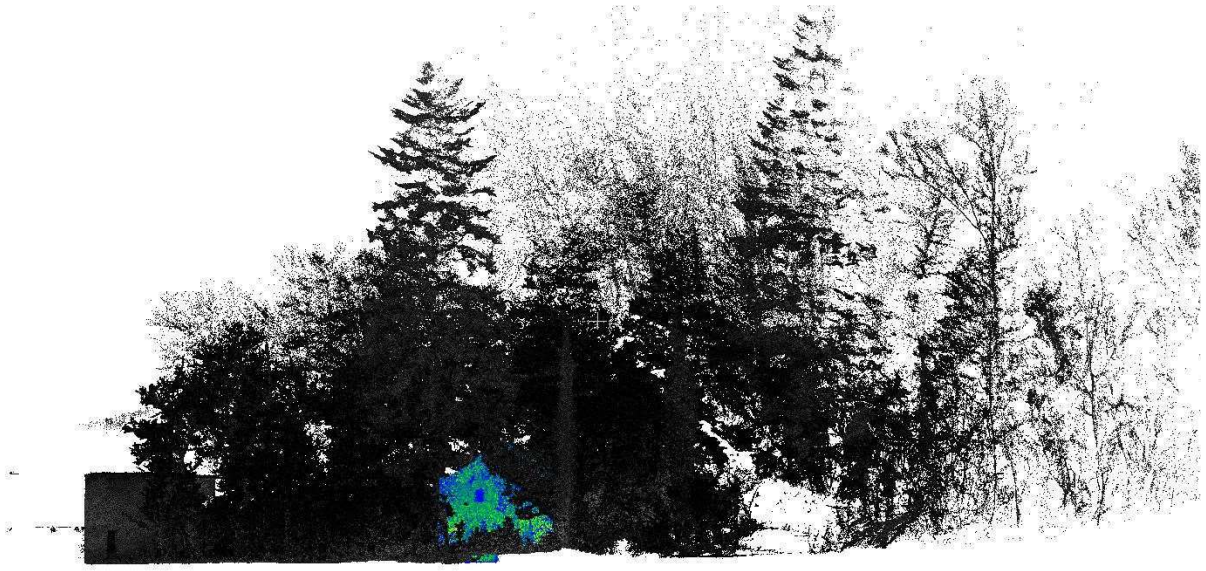


Fig. 6.4 Nuvola di punti del mulino di "Santa Maria in Lapide"

Nel caso di Santa Maria in Lapide, questo metodo di visualizzazione aiuta molto a capire l'esatta collocazione del mulino con il resto del paesaggio, quanto fosse immerso nella vegetazione, quanto fosse distante dal cimitero limitrofo e quindi dalla strada. Le nuvole di punti riescono a dare una visione tridimensionale dell'oggetto, ma laddove ce ne fosse bisogno permette di estrarre anche elaborati bidimensionali come ad esempio planimetrie, piante, ortofoto e prospetti.

Dei due mulini sono stati realizzati i seguenti elaborati:

- ortofoto di ogni singolo lato;
- planimetria in scala 1:500 del mulino "Pignoloni" in allegato (Tav 1);
- prospetti in scala 1:200 del mulino "Pignoloni" in allegato (Tav 2);
- planimetria in scala 1:500 del mulino "Santa Maria in Lapide" in allegato (Tav 3);
- prospetti in scala 1:200 del mulino "Santa Maria in Lapide" in allegato (Tav 4-5).

**Fig. 6.5 Ortofoto facciata est del mulino Pignoloni**

**Fig. 6.6 Ortofoto facciata nord del mulino Pignoloni**

**Fig. 6.7 Ortofoto facciata ovest del mulino Pignoloni**

**Fig. 6.8 Ortofoto facciata sud del mulino Pignoloni**

**Fig. 6.9 Ortofoto facciata nord del mulino "Santa Maria in Lapide"**

**Fig. 6.10 Ortofoto facciata est del mulino "Santa Maria in Lapide"**

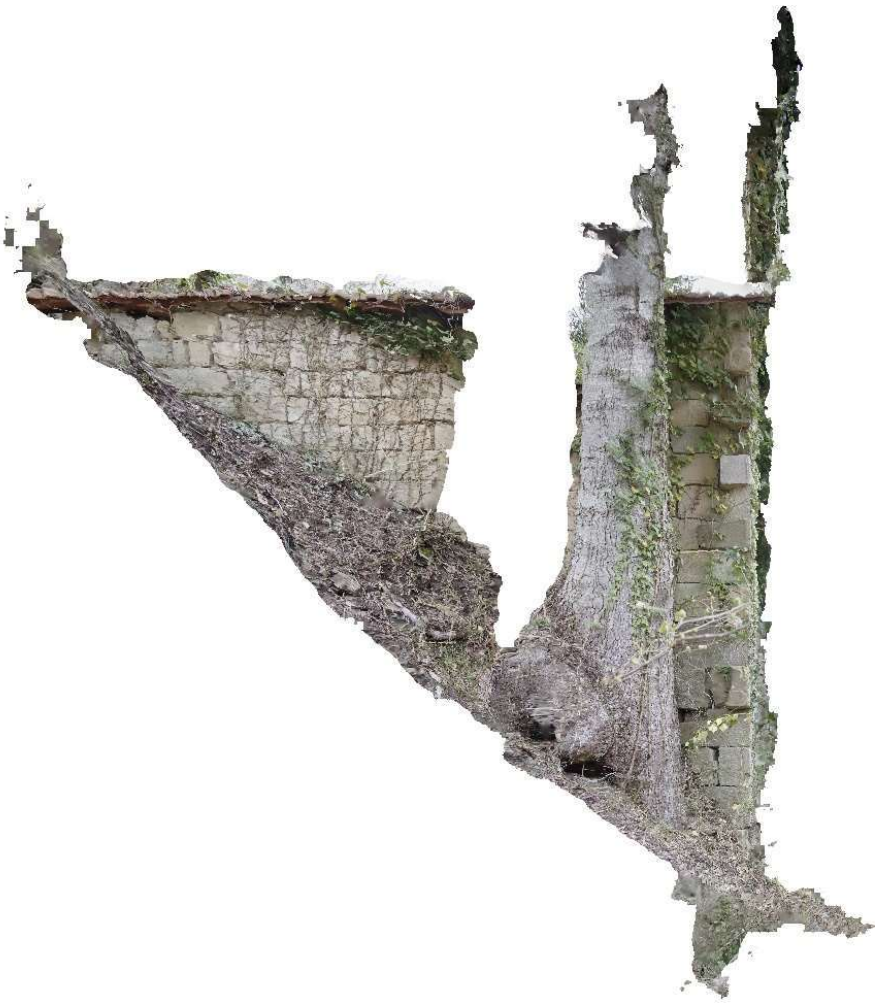
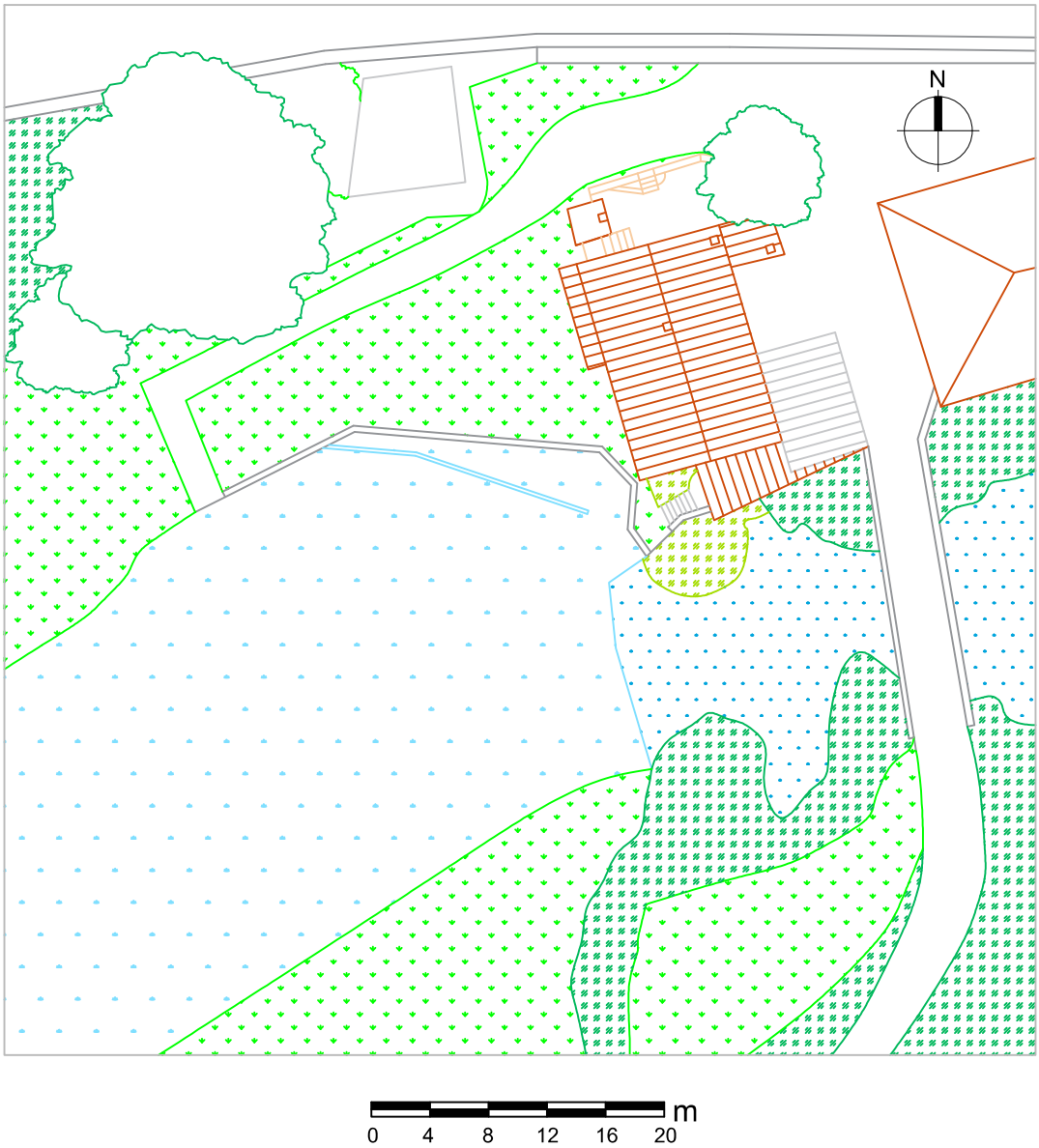


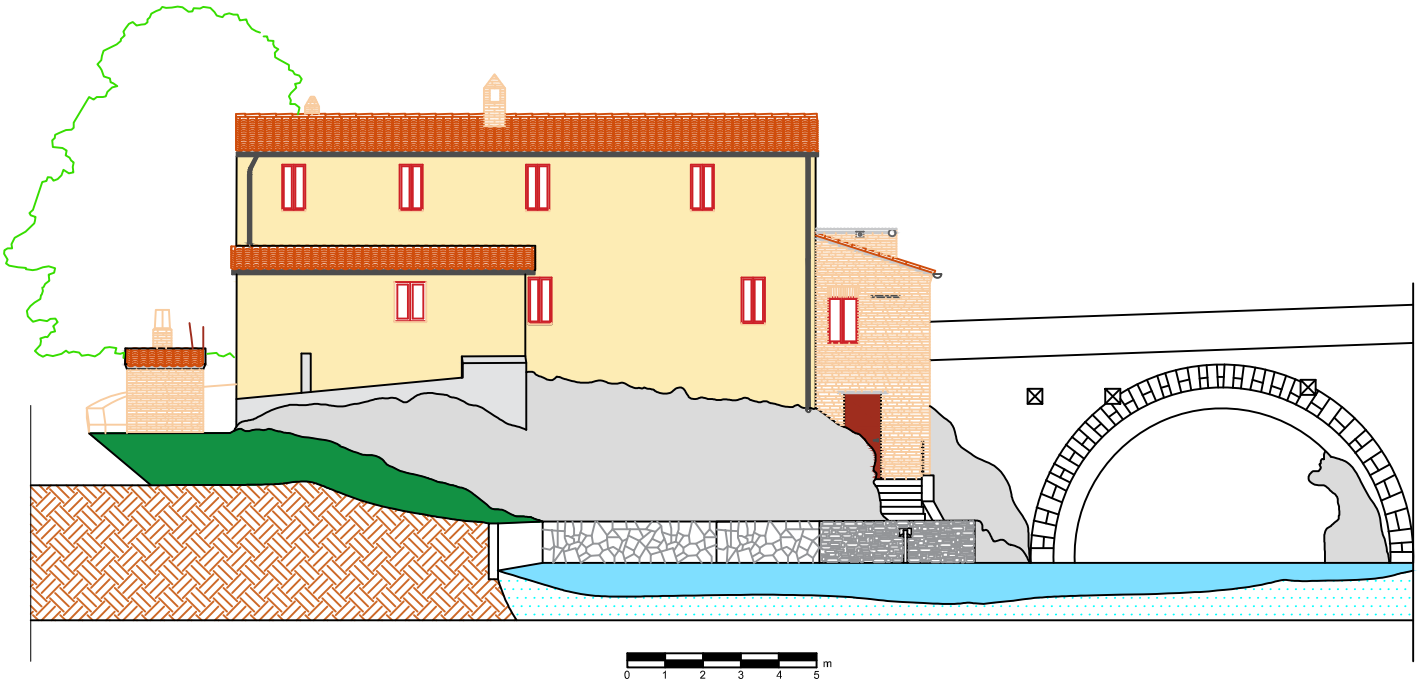
**Fig. 6.11 Ortofoto facciata sud del mulino "Santa Maria in Lapide"**

# TAV.1

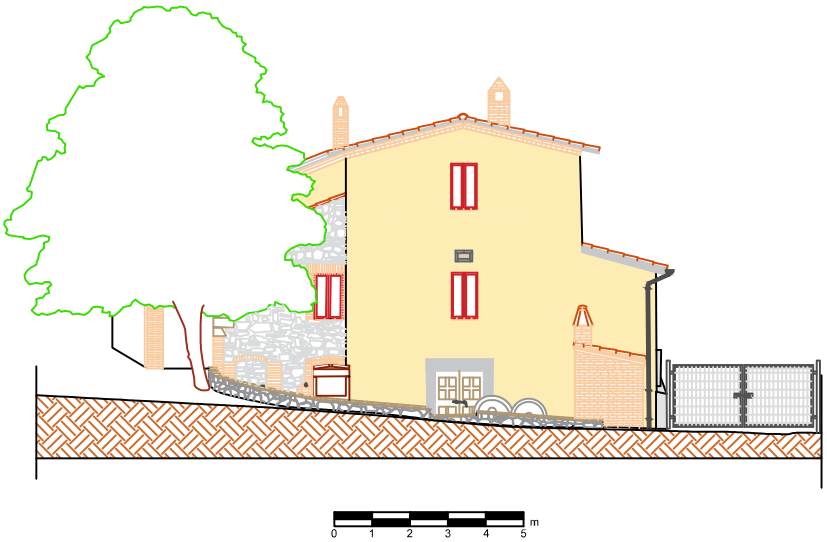



PLANIMETRIA MULINO "Pignoloni" scala 1:500

# TAV.2

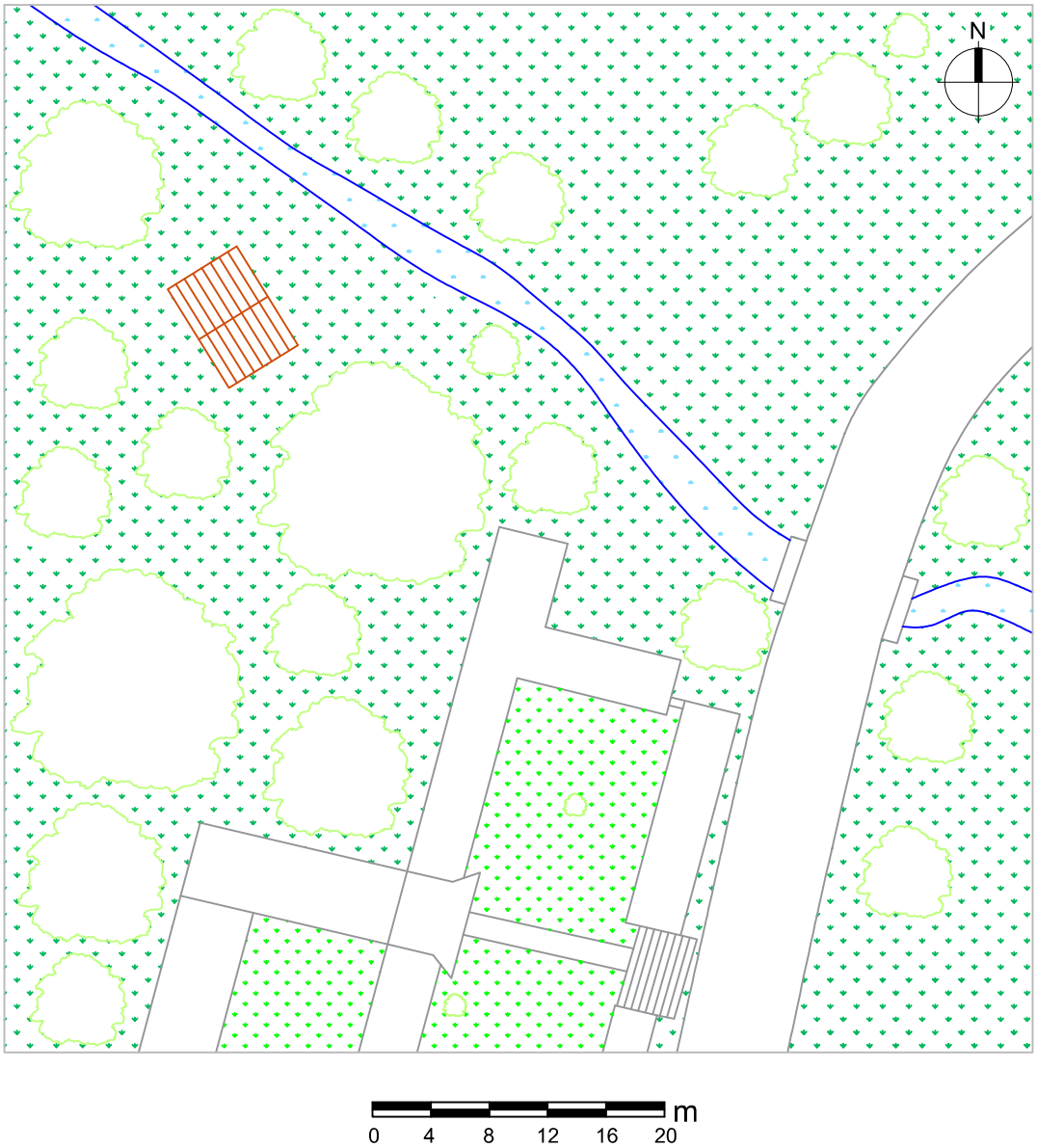



PROSPETTO FACCIATA EST MULINO "Pignoloni" scala 1:200



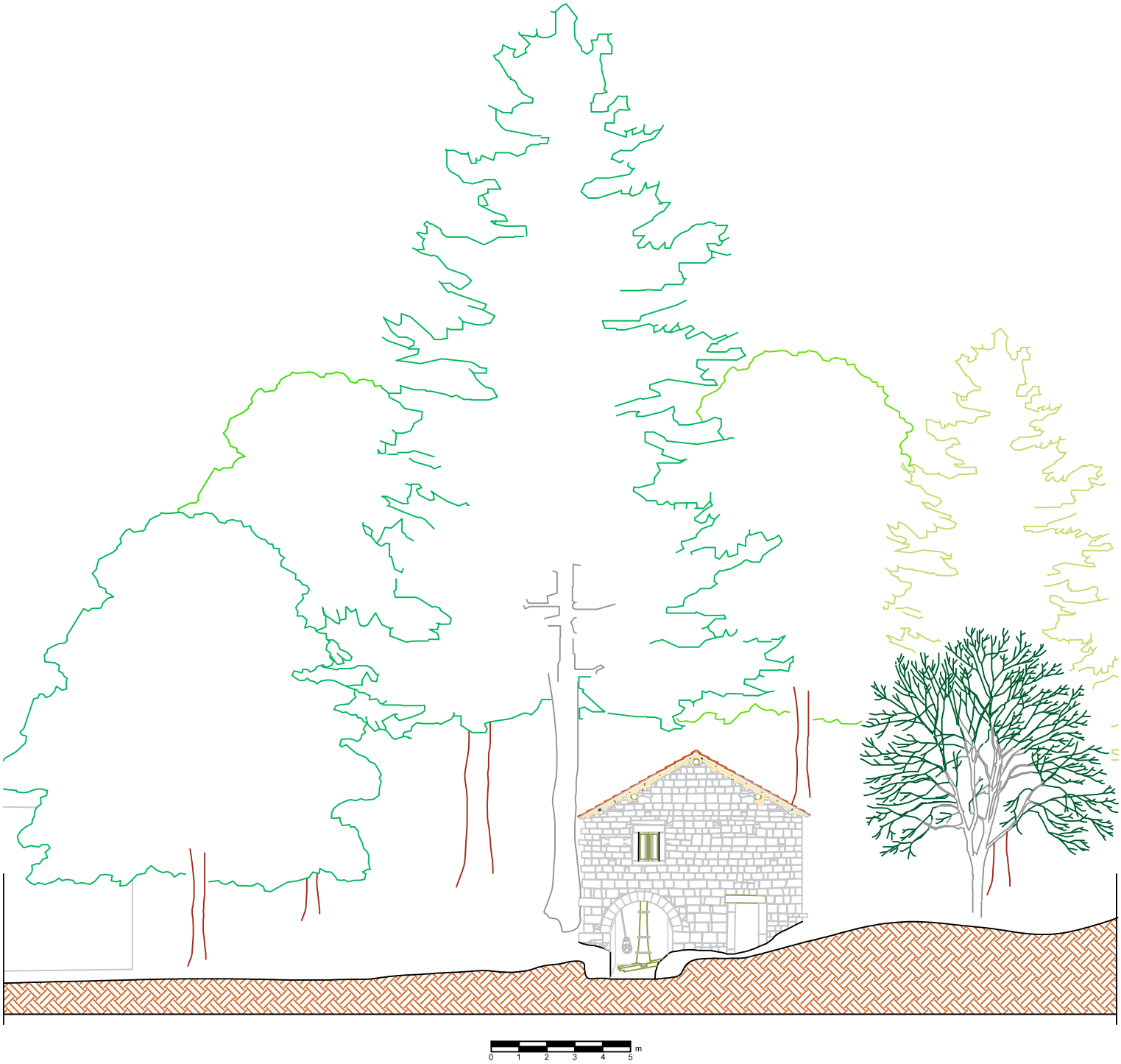

PROSPETTO FACCIATA NORD MULINO "Pignoloni" scala 1:200

# TAV.3



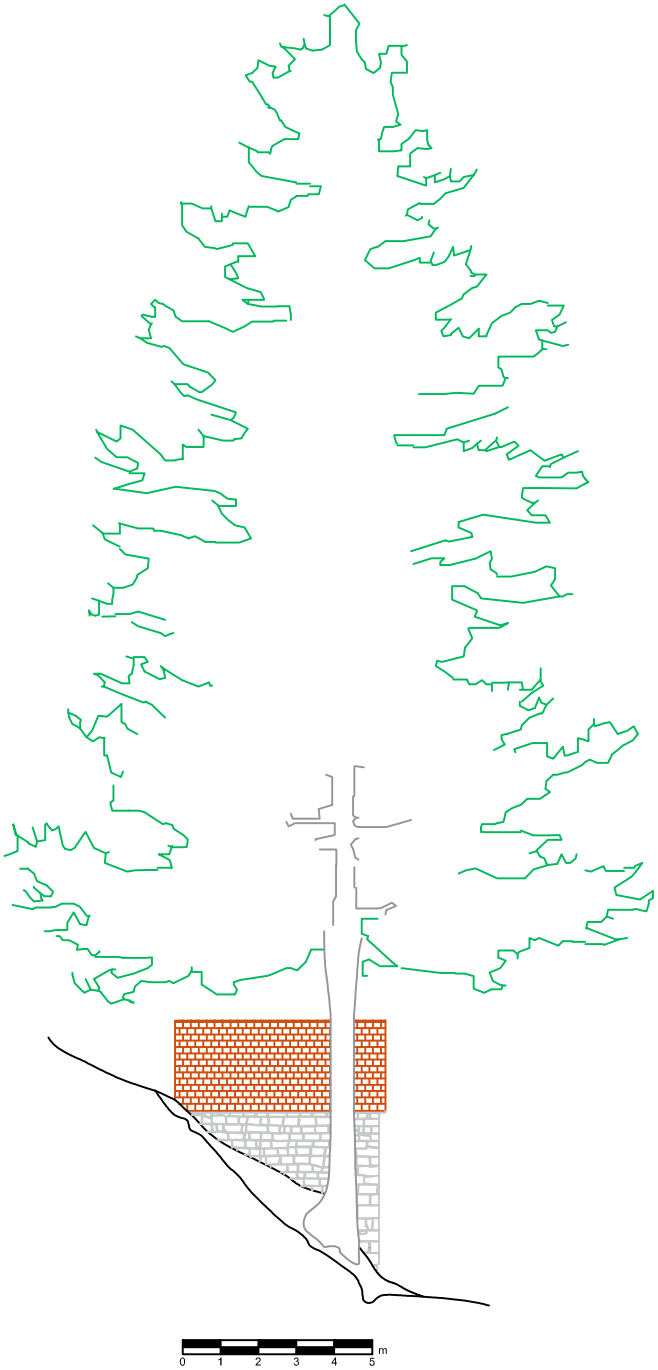

PLANIMETRIA MULINO "Santa Maria in Lapide" scala 1:500

# TAV.4

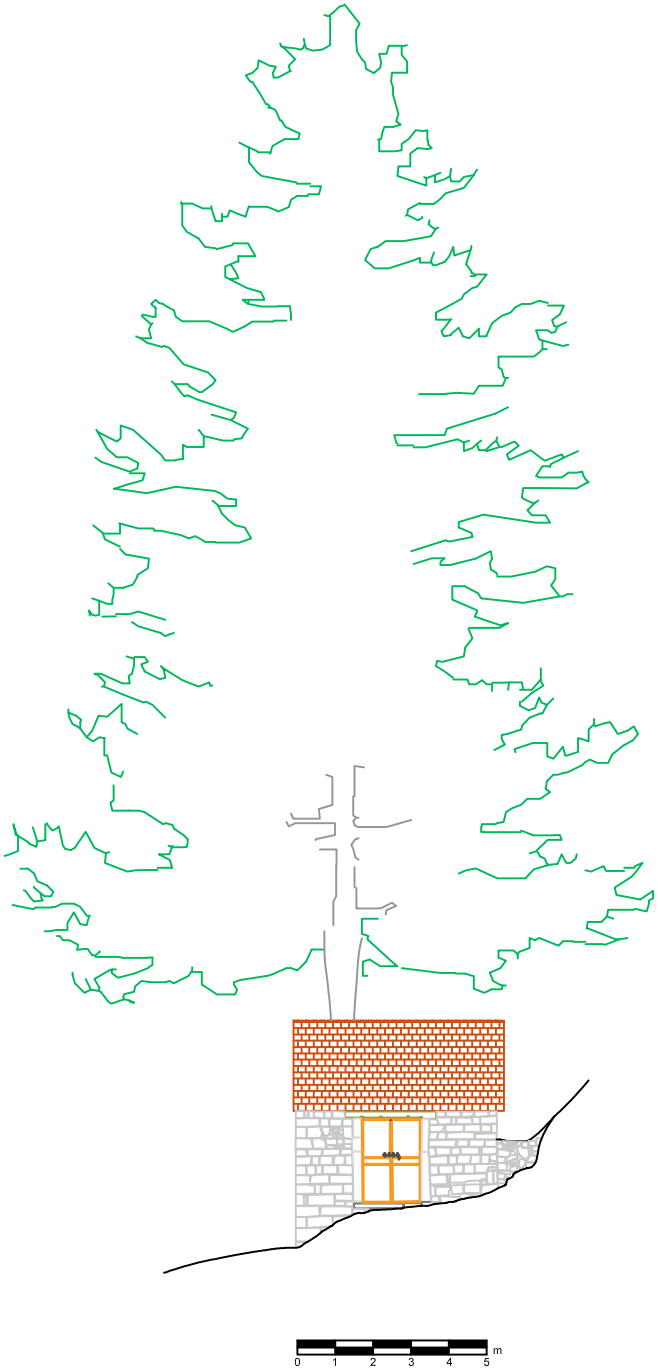



PROSPETTO FACCIATA EST MULINO "Santa Maria in Lapide" scala 1:200

# TAV.5




PROSPETTO FACCIATA SUD MULINO
"Santa Maria in Lapide" scala 1:200




PROSPETTO FACCIATA NORD MULINO
"Santa Maria in Lapide" scala 1:200

## 7. CONCLUSIONI

L'obiettivo principale della tesi è quello di documentare i due mulini idraulici al fine di ottenere un modello complesso del bene architettonico, su cui poter elaborare in futuro un sistema informativo o un progetto di restauro. Tutto passa dal fornire un modello metricamente corretto dei beni architettonici e delle zone che ne sono sprovviste, attraverso un rilievo eseguito con diverse metodologie da integrare tra di loro.

Per raggiungere questo obiettivo, le tecniche che sono state usate sono: la prima basata su un approccio relativamente innovativo tramite i moderni strumenti UAV (image-based), che di recente prendono sempre più piede; la seconda basata su un sistema di mappatura e stima della posizione in tempo reale tramite laser scanner mobili (range-based).

Il primo tipo di rilievo, attraverso uno studio prettamente fotogrammetrico, si caratterizza per l'ottima qualità dei contenuti delle immagini, ma in termini di tempistiche occorre maggior tempo per l'acquisizione dei dati. Parlando di tecnologia UAV, si parla comunque di tempi brevi, basti pensare che per il rilievo dei dati di tutte e due i mulini è durato una mattinata. Nel secondo caso (rilievo con laser scanner mobile) l'acquisizione dei dati avviene davvero in tempi rapidi.

In particolare, l'utilizzo del drone è ottimo per l'acquisizione di immagini sia per oggetti da rilevare di piccole dimensioni, ma anche per aree più estese, grazie al poco tempo che gli serve per effettuare la fase di volo; nel corso degli ultimi anni, si stanno abbassando sempre di più anche i costi per l'acquisto, accessibili anche ai privati; montando una fotocamera con una risoluzione alta (solitamente si parla di 12 Megapixel o più) si riesce ad ottenere immagini di ottima qualità. Grazie all'altezza di volo, un'unica immagine da drone riesce a coprire un'area molto estesa. Al tempo stesso ci sono anche dei problemi nell'uso dei droni; i tempi di autonomia sono relativamente bassi, questo comporta che per aree più complesse o estese, bisogna fare più voli per acquisire tutte le immagini necessarie per un ottimo rilievo; necessita che le condizioni meteo siano piuttosto favorevoli, in caso di pioggia o di vento non si possono effettuare voli; infine, per adoperare con questi tipi di attrezzature servono persone capaci di usarlo e quindi con un brevetto certificato.

Il laser scanner mobile invece è caratterizzato dalle sue tempistiche rapide (in caso di un edificio di piccole dimensioni si parla davvero di minuti per l'acquisizione delle immagini), non necessita di essere usato da un operatore con brevetto, permette l'acquisizione di nuvole di punti in movimento grazie alla tecnologia SLAM anche in ambienti particolari come boschi, grotte e scantinati; permette di arricchire la nuvola di punti in aree o spazi che il drone non riesce ad acquisire come ad esempio sotto gli archi dei portali o oggetti ricoperti dalle chiome degli alberi.

Ovviamente a seconda della tipologia di laser scanner che si usa, si possono incontrare o meno delle problematiche; nel caso di edifici alti è possibile ottenere una nuvola di punti meno fitta e poco precisa per i piani superiori; alcuni modelli necessitano di una posizione perpendicolare al terreno per tutto il tragitto, anche se gli ultimi modelli permettono qualsiasi inclinazione (come è il caso dello strumento utilizzato per questo rilievo).

La fase di acquisizione dei dati dei nostri mulini, avvenuta durante lo stesso giorno, ha visto una procedura diversa a seconda del mulino.

Nel primo caso (mulino Pignoloni), grazie alle condizioni del luogo non si sono avute grosse problematiche, se non per la fotogrammetria da terra che è stata in parte condizionata dalla presenza del torrente e quindi dell'acqua; il corso d'acqua ed una recinzione non hanno permesso di eseguire foto sempre da una distanza sempre equa e ottimale; per la fotogrammetria aerea e per il rilievo con laser scanner non si è avuto alcun intoppo.

Nel secondo mulino, invece, la fase di acquisizione è stata molto complicata a causa dell'accessibilità del luogo del rilievo. Il primo problema è stato l'impossibilità ad acquisire le coordinate terrestri, in quanto non c'era alcuna possibilità di ricevere un minimo di segnale. La fotogrammetria terrestre è stata fortemente condizionata dalla presenza degli alberi, degli arbusti attorno al mulino e dalla vicinanza del corso dell'acqua del torrente, impedendone di fatto di scattare foto oltre che da una distanza ottimale anche da un'equa distribuzione delle prese di carico delle foto; il retro del manufatto inoltre non era per niente accessibile. La fotogrammetria aerea con il drone non è stato possibile effettuarla perché gli alberi del bosco erano troppo fitti, e una ripresa dall'alto non avrebbe garantito alcuna inquadratura del mulino. Infine, il rilievo con il laser scanner mobile è stato possibile effettuarlo ma anche questo è stato condizionato dalla difficile accessibilità del sito.

La fase elaborativa dei dati grazie a software abbastanza innovativi permette di ottenere una nuvola di punti sia se si usa la tecnologia UAV, sia se si usa quella SLAM. I modelli tridimensionali che si possono ottenere sono metricamente corretti e precisi, parlando addirittura nell'ordine dei centimetri. Tramite un'operazione di confronto (Cloud-to-Cloud) delle nuvole di punti fatta per entrambi i mulini si evince che la differenza tra di loro è veramente bassa, se non fosse per alcuni dettagli un po' più problematici, magari dovuti alle caratteristiche del mulino o del paesaggio. Alcune nuvole di punti presentavano parti di modello che con l'altra nuvola non si riusciva ad ottenere. Ciò significa che le due tecnologie della Geomatica (fotogrammetria e laser scanner) possono e devono integrarsi tra di loro; una nuvola di punti acquisita con una delle due tecniche riesce dunque a compensare le mancanze dell'altra.

Una volta che il livello di dettaglio è stato identificato, la tolleranza del dato acquisito può essere stimato. Ad esempio, nel caso di un rilievo condotto in un contesto architettonico strutturale (scala dell'edificio) una precisione centimetrica o decimetrica corrisponde ad una rappresentazione grafica in scala 1:100 – 1:200 (Di Stefano et al., 2021; Bronzino et al.,2019). Nel nostro caso, avendo riscontrato un valore di accuratezza medio maggiore di 10 cm, la precisione complessiva del modello 3D è riconducibile ad una scala di rappresentazione di 1:200. Scala e livello di dettaglio che permettono qualsiasi attività futura di analisi e di restauro.

Per poter garantire una nuova vita a queste strutture, si devono fornire tutte le informazioni possibili, utili a qualsiasi tipo di analisi, anche a solo scopo di essere fruibili a tutti. La scarsità di informazioni di questi esempi di patrimonio architettonico è un problema e questo comporta una mancanza di conoscenza di queste strutture presenti sul territorio e cosa esse rappresentassero un tempo.
Con questo lavoro si vuole cercare anche di dare un ulteriore contributo sui metodi di informazione al grande pubblico. Ad esempio, la creazione o integrazione dei vari database relazionali (si veda il database del censimento dei mulini idraulici da parte della Regione Marche) che contengano informazioni di qualsiasi tipo tra cui anche link URL che rimandano alle piattaforme WEB. Queste, tramite software di visualizzazione e di gestione delle nuvole, possono dare maggiore supporto e tutte le informazioni non geometriche già archiviate. "Potree" è uno dei software open source, accessibile a tutti, che permette la condivisione di nuvole di punti. Si tratta di una piattaforma di visualizzazione molto efficiente che permette di interagire, indagare e interrogare il modello 3D, sotto forma di nuvole di punti, dei mulini in oggetto, che viene caricato online o su altri server virtuali.
Le figure seguenti mostrano come i risultati di qualsiasi rilievo metrico tridimensionale possono essere caricate su queste piattaforme, e disporne per conoscere, comprendere le sue forme geometriche e spaziali.

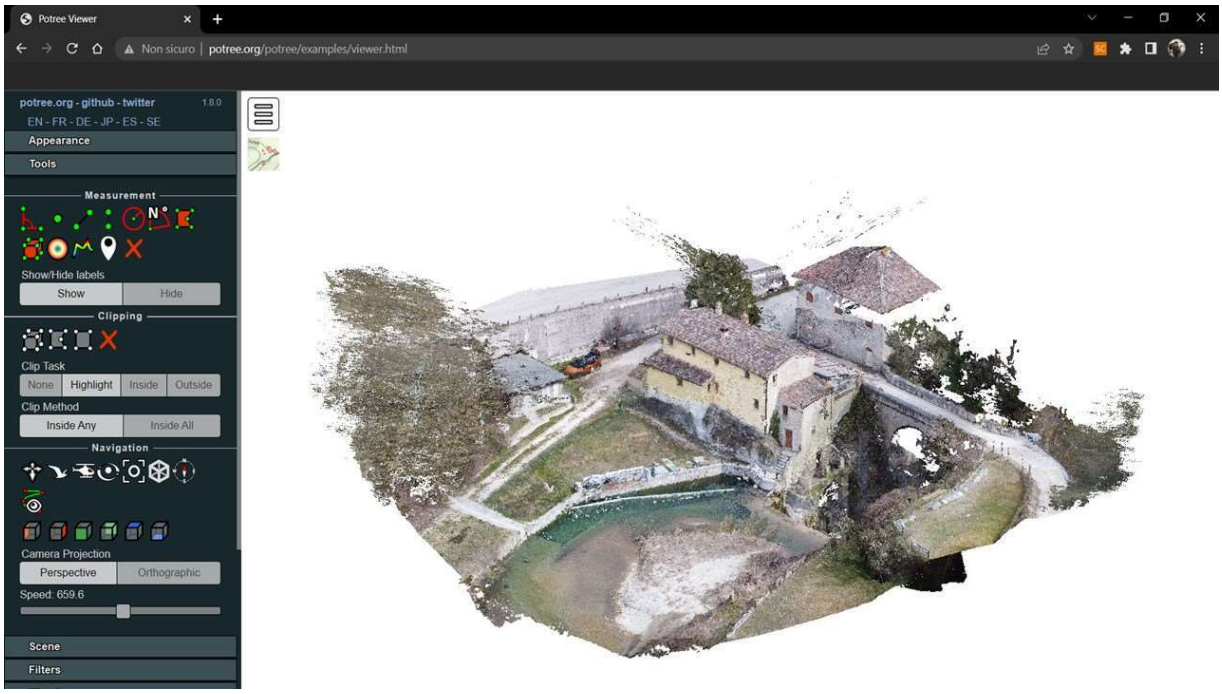



**Fig. 7.1 Esempio di visualizzazione di una nuvola di punti sulla piattaforma "Potree"**

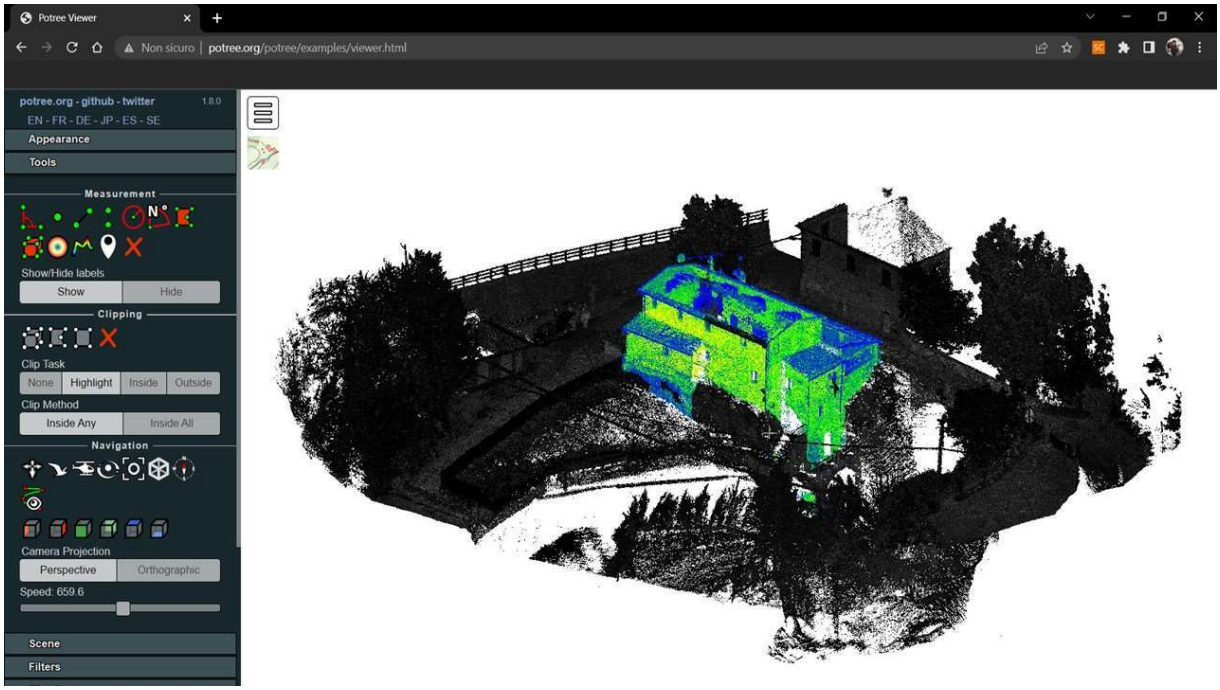



**Fig. 7.2 Esempio di visualizzazione di una nuvola di punti sulla piattaforma "Potree"**

Un'ulteriore osservazione va fatta sull'ottenimento di un rilievo completo di questi manufatti storici. Purtroppo, nel corso dei rilievi eseguiti non è stato possibile rilevare anche gli ambienti interni dei mulini. In un caso perché non era possibile accedere in quanto risultava di proprietà privata, in un altro perché era in uno stato di abbandono e chiuso e quindi fatiscente e non garantiva operazioni in sicurezza. Questo ha precluso la possibilità di effettuare il rilievo degli spazi interni, e anche di capire come la struttura molitoria fosse disposta all'interno degli edifici. Fare un rilievo interno avrebbe sicuramente potuto aiutare a sviluppare il modello tridimensionale, offrendo dunque anche la possibilità di elaborare piante degli interni e sezioni complete di qualsiasi dettaglio.

## BIBLIOGRAFIA

Bronzino GPC, Grasso N, Matrone F, Osello A, Piras M. 2019. Laser-visual-inertial odometry based solution for 3D Heritage Modeling: The sanctuary of the blessed virgin of trompone. Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci. XLII-2/W15(2/W15):215–222. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-215-2019

Di Stefano, F., Chiappini, S., Gorreja, A., Balestra, M., & Pierdicca, R. (2021). Mobile 3D scan LiDAR: A literature review. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *12*(1), 2387-2429. DOI: 10.1080/19475705.2021.1964617

Di Stefano, F., Torresani, A., Farella, E. M., Pierdicca, R., Menna, F., & Remondino, F. (2021). 3D surveying of underground built heritage: Opportunities and challenges of mobile technologies. *Sustainability*, *13*(23), 13289. https://doi.org/10.3390/su132313289

Di Stefano, F., Chiappini, S., Piccinini, F., & Pierdicca, R. (2019, October). Integration and Assessment Between 3D Data from Different Geomatics Techniques. Case Study: The Ancient City Walls of San Ginesio (Italy). In *International Workshop on R3 in Geomatics: Research, Results and Review* (pp. 186-197). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62800-0_15

Fassi F, Perfetti L. 2019. Backpack mobile mapping solution for DTM extraction of large inaccessible spaces. Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci. XLII-2/W15 (2/W15):473–480. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-473-2019

Gomes L, Regina Pereira Bellon O, Silva L. 2014. 3D reconstruction methods for digital preservation of cultural heritage: A survey. Pattern Recog Lett. 50:3–14. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2014.03.023

Macias Solé JM, Puche Fontanilles JM, Sola-Morales P, Domingo T, Pino F. 2017. Mobile mapping and laser scanner to interrelate the city and its heritage: the Roman Circus of Tarragona. Proceedings of the 3rd International Conference on Preservation, Maintenance and Rehabilitation of Historical Buildings and Structures. 1: 21–28. http://hdl.handle.net/2072/303012

E. S. Malinverni, R. Pierdicca, C. A. Bozzi and D. Bartolucci, "Evaluating a Slam-Based Mobile Mapping System: a Methodological Comparison for 3D Heritage Scene Real-Time

Reconstruction," *2018 Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (MetroArchaeo)*, 2018, pp. 265-270, doi: 10.1109/MetroArchaeo43810.2018.13684.

Remondino F. 2011. Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. Remote Sensing. 3(6):1104–1138. https://doi.org/10.3390/rs3061104

Sammartano G, Spanò A. 2018. Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition. Appl Geomat. 10(4):317–339. https://doi.org/10.1007/s12518-018-0221-7

Șmuleac A, Șmuleac L, Man TE, Popescu CA, Imbrea F, Radulov I, Adamov T, Pașcalău R. 2020. Use of modern technologies for the conservation of historical heritage in water management. Water (Switzerland). 12(10):2839–2895. https://doi.org/10.3390/w12102895

Toschi I, Fabio R, Simone O. 2015. Mobile mapping systems: recenti sviluppi e caso applicativo. GEOmedia. 4:6–10. https://ojs.mediageo.it/index.php/GEOmedia/article/view/1231

Tucci, G. (2016). Geomatica e patrimonio digitale. Dai dati ai modelli: quale futuro? Bollettino della società italiana di fotogrammetria e topografia, (3), 11-19.

Tucci G, Visintini D, Bonora V, Parisi EI. 2018. Examination of indoor mobile mapping systems in a diversified internal/external test field. Applied Sciences (Switzerland). 8(3):401. https://doi.org/10.3390/app8030401

Zlot R, Bosse M, Greenop K, Jarzab Z, Juckes E, Roberts J. 2014. Efficiently capturing large, complex cultural heritage sites with a handheld mobile 3D laser mapping system. J Cult Heritage. 15(6):670–678. https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.11.009

## SITOGRAFIA


http://www.luoghidelsilenzio.it/marche/04_mulini/index.htm

http://www.beniculturali.marche.it/

https://www.habitualtourist.com/mulino_pignoloni(arena)

https://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Cultura/Catalogo-beni-culturali/RicercaCatalogoBeni/ids/77417

https://www.cronachemaceratesi.it/2022/05/18/le-marche-puntano-sul-mulino-di-muccia-parte-del-progetto-made-in-land/1640687/

https://www.microgeo.it/prodotto/zeb-horizon/ (GeoSLAM Zeb Horizon)

https://www.dji.com/it/mavic-mini (DJI Mavic Mini)

https://www.topconpositioning.com/it/gnss-and-network-solutions/integrated-gnss-receivers/hiper-vr (Topcon Hiper HR)

https://www.agisoft.com/ (Agisoft Metashape)

https://www.danielgm.net/cc/ (CloudCompare)

https://potree.github.io/ (Potree)