



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE

L'INTEGRAZIONE DEL PROXIMAL SENSING E DELL'INTELLIGENZA  
ARTIFICIALE NEL SETTORE ZOOTECNICO:  
VANTAGGI E SFIDE DEL MONITORAGGIO CON STRUMENTI  
TOUCHLESS

THE INTEGRATION OF PROXIMAL SENSING AND ARTIFICIAL  
INTELLIGENCE IN LIVESTOCK SYSTEMS:  
BENEFITS AND CHALLENGES OF TOUCHLESS MONITORING  
DEVICES

TIPO TESI: sperimentale

Studente:  
ANDREA RAGAINI

Relatore:  
PROF. ERNESTO MARCHEGGIANI

Correlatore:  
PROF. SIMONE CECCOBELLI  
PROF. STEFANO CHIAPPINI

SESSIONE ESTIVA  
ANNO ACCADEMICO 2023-2024

A te nonno

# SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE.....	5
ELENCO DELLE FIGURE .....	6
CAPITOLO 1 INTRODUZIONE .....	8
CAPITOLO 2 STATO DELL'ARTE .....	12
CAPITOLO 3 MATERIALI E METODI.....	17
3.1 Fotogrammetria.....	17
3.1.1 Fase di presa – fotogrammetria aerea da drone.....	19
3.2 Lidar.....	20
3.2.1 Laser .....	22
2.2.1.1 Laser scanner aereo.....	24
2.2.1.2 Laser scanner terrestri o TLS.....	26
2.2.1.3 Laser scanner miniaturizzati: l'esempio di iPhone 14 PRO max .....	26
3.3 NeRF.....	28
3.4 3d Gaussian Splatting .....	29
3.5 App iPhone.....	29
3.5.1 3D scanner .....	29
3.5.2 Recon 3D .....	30
3.5.3 Luma AI.....	30
3.5.4 Kiri Engine app.....	31
CAPITOLO 4 CASI STUDIO E RISULTATI.....	32
4.1 Caso studio 1.....	33
4.1.1 Rilievo UAV-RTK.....	34
4.1.2 Modello NERF e GS.....	36
4.1.3 Calcolo dell'accuratezza del dataset .....	38
4.1.4 Volume stalla .....	41
4.1.5 Volume letamaio.....	44
4.2 Caso studio 2.....	45
4.2.1 Fase di rilievo.....	45

4.2.2 Processamento .....	50
4.2.3 Risultati modelli 3D.....	51
CAPITOLO 5 DISCUSSIONI.....	54
CONCLUSIONI .....	57
BIBLIOGRAFIA .....	59

## ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 4.1 Valori della RMS ottenuti da C2M tra i modelli NERF-GS rispetto al risultato UAV-RTK.....	40
Tabella 4.2 Risultati volume stalla.....	44
Tabella 4.3 Risultati volume letamaio .....	45

## ELENCO DELLE FIGURE

Figura 3.1 Visione stereoscopica .....	19
Figura 3.2 strisciate parallele: volo fotogrammetrico .....	20
Figura 3.3 LiDAR su drone .....	21
Figura 3.4 Tecnica radar .....	21
Figura 3.5 scala della lunghezza d'onda.....	23
Figura 3.6 calcolo delle coordinate cartesiane .....	23
Figura 3.7 percorso emettitore-oggetto-ricevitore .....	24
Figura 3.8 laser scanner aereo da aereo .....	25
Figura 3.9 laser scanner aereo da drone.....	25
Figura 3.10 camera LiDAR iPhone.....	28
Figura 4.1 Workflow delle operazioni svolte.....	33
Figura 4.2 Centro di presa delle camere: si notano sia le camere nadirali che oblique ....	34
Figura 4.3 Nuvola sparsa (800,441 punti).....	35
Figura 4.4 Nuvola densa da Metashape (58,364,210 punti, high quality) .....	36
Figura 4.5 Allineamento Stalla NERF rispetto al modello di riferimento UAV-RTK. Il valore di RMS è pari a 0,22 cm.....	37
Figura 4.6 Allineamento Letamaio NERF rispetto al modello di riferimento UAV-RTK. Il valore di RMS è pari a 0,17 cm.....	37
Figura 4.7 Allineamento Stalla GS rispetto al modello di riferimento UAV-RTK. Il valore di RMS è pari a 0,42 cm .....	38
Figura 4.8 Allineamento Letamaio GS rispetto al modello di riferimento UAV-RTK. Il valore di RMS è pari a 0,12 cm.....	38
Figura 4.9 Anteprima del comando C2C tool .....	39
Figura 4.10 Distribution fitting della C2C calcolata sulla Stalla NERF e UAV-RTK .....	40
Tabella 4.1 Valori della RMS ottenuti da C2M tra i modelli NERF-GS rispetto al risultato UAV-RTK.....	40
Figura 4.11 Individuazione dei punti fuori terra da parte di CSF filter tool .....	42
Figura 4.12 Individuazione dei punti a terra da parte di CSF filter tool .....	42

Figura 4.13 Risultato delle mesh ottenuta dai punti a terra (a), conversione in punti e creazione di una superficie piana mediante il Fit Plane tool (b) .....	43
Figura 4.14 Vista frontale della copertuta della stalla Nerf combinata con la superficie UAV-RTK.....	43
Figura 4.15 Calcolo volume stalla .....	44
Tabella 4.2 Risultati volume stalla.....	44
Figura 4.16 Calcolo del volume del letamaio mediante Volume 2.5 tool e la creazione dei layer.....	45
Tabella 4.3 Risultati volume letamaio .....	45
Figura 4.17 Target.....	46
Figura 4.18 Disposizione target .....	46
Figura 4.19 TLS e posizionamento .....	47
Figura 4.20 Rilievo iPhone .....	48
Figura 4.21 Bastone misuratore e fettuccia metrica.....	48
Figura 4.22 Misurazione altezza al garrese.....	49
Figura 4.23 Misurazione lunghezza del tronco .....	49
Figura 4.24 Misurazione circonferenza toracica.....	49
Figura 4.25 Ricostruzione 3D TLS e coordinate target .....	50
Figura 4.26 allineamento rilievo Iphone e rilievo TLS.....	51
Figura 4.27 Recon-3D fotogrammetria Olimpia.....	51
Figura 4.28 Recon-3D LiDAR Jennifer.....	52
Figura 4.29 NeRF Luma Jennifer .....	52
Figura 4.30 NeRF KIRI Gaia.....	53
Figura 4.31 Gaussian Splatting KIRI Gaia .....	53

# Capitolo 1

## INTRODUZIONE

L'innovazione digitale sta diventando sempre più pervasiva nel campo agricolo. Negli ultimi due decenni, l'adozione delle tecnologie digitali è stata prevalente in settori come l'agricoltura di precisione e la viticoltura (Bramley 2009) e, in misura minore, nell'allevamento animale (Borchers and Bewley 2015; Eastwood et al. 2019). Ci sono grandi aspettative riguardo alla sua ulteriore diffusione e al potenziale di trasformazione (Rose and Chilvers 2018; Shepherd et al. 2020).

A partire dal 2015, si è assistito a una crescita accelerata delle pubblicazioni di scienze sociali sull'agricoltura digitale, con un focus sugli approcci sociali, economici e istituzionali (Scholz et al. 2018; Wolf, Just, and Zilberman 2001). Numerosi programmi scientifici e di innovazione, come il progetto europeo Horizon 2020 "Internet of Farm & Food" (IoF2020) e iniziative in Australia, Francia, Nuova Zelanda, Canada e Stati Uniti, si concentrano su questi aspetti (AKIS 2019; Klerkx, Jakku, and Labarthe 2019). La letteratura scientifica si è focalizzata principalmente sugli aspetti tecnici dell'applicazione di tecnologie come l'agricoltura di precisione, l'analisi dei big data, i droni, l'intelligenza artificiale, la robotica, la stampa 3D e l'IoT per migliorare le pratiche agricole (de Amorim et al. 2019).

Il dominio emergente dell'intelligenza artificiale applicata ha provocato un cambiamento di paradigma negli approcci metodologici in vari settori, con un impatto notevole nel campo della rappresentazione generativa 3D visiva (Basso et al. 2024). La crescente pubblicazione e condivisione di algoritmi e sistemi complessi hanno svolto un ruolo cruciale in questo tipo di processo. Questi progressi hanno ridotto significativamente gli errori nella riproduzione di spazi tridimensionali. Nel campo della digitalizzazione tridimensionale e della grafica computerizzata, tra le varie ricerche condotte negli ultimi anni, di particolare interesse è l'indagine sullo sviluppo di NeRF (Mildenhall et al. 2021). Sebbene all'inizio non fosse progettato per la generazione di oggetti 3D comuni (nuvole di punti o mesh) ma per il rendering 3D, nel corso degli anni lo sviluppo delle tecniche grafiche ne ha garantito la conversione e l'uso diffuso in vari campi di indagine (Murtiyoso and Grussenmeyer 2023). Le ricerche attuali sono diverse e alcune di esse sono state indirizzate verso l'approfondimento di

vari aspetti della metodologia o il miglioramento di alcuni di essi (Gao et al. 2022; Müller et al. 2022). I vantaggi del Neural Radiance Field (NeRF) sono anche testati nel campo del Patrimonio Culturale. Alcune ricerche confrontano e analizzano i vantaggi dell'uso di NeRF rispetto alla tecnica fotogrammetrica o alla scansione laser, specialmente in condizioni critiche come un basso numero di foto o una bassa risoluzione delle immagini (Balloni et al. 2023; Croce et al. 2024), nella ricostruzione di edifici con condizioni molto difficili rispetto a quelle tipiche (Condorelli et al. 2021), o esplorano anche il potenziale di NeRF in casi di condizioni di acquisizione non convenzionali (Balloni et al. 2023).

La recente pandemia ha accelerato ulteriormente questa espansione digitale, portando alla luce la necessità di una trasformazione digitale anche nelle aree rurali, tradizionalmente caratterizzate da una minore accessibilità alle tecnologie. Tuttavia, fattori come la connettività, le competenze necessarie e i costi limitano ancora l'accesso degli utenti alla digitalizzazione in queste zone, a differenza di molti altri settori economici. È fondamentale affrontare queste sfide per garantire un futuro sostenibile e innovativo per l'agricoltura e l'ambiente.

L'adozione di sensori per il monitoraggio di suolo e colture, insieme all'impiego di Big Data e intelligenza artificiale, può contribuire a ottimizzare le pratiche agricole, garantendo al contempo la tracciabilità e la sicurezza alimentare (Li et al., 2022).

Tuttavia, sorgono importanti domande: Quali saranno i costi e i benefici di questa transizione digitale? Sarà sempre possibile garantire la privacy e la sicurezza dei dati? Quali implicazioni avrà nel lungo periodo, come il cambiamento del paesaggio rurale e agricolo o dei modelli di lavoro e dinamiche sociali? Come garantire equità tra le figure coinvolte e prevedere chi beneficerà maggiormente di questi cambiamenti, evitando che nessuno venga lasciato indietro?

Nel prossimo futuro, la strategia di transizione dovrà considerare diversi elementi cardine:

- **Accesso alle Tecnologie:** Garantire l'accesso alle tecnologie anche nelle zone più remote, affrontando le sfide legate alla connettività.
- **Formazione e Consapevolezza:** Fornire formazione specifica ed educare gli agricoltori e le comunità locali sull'importanza della digitalizzazione.
- **Collaborazioni:** Favorire collaborazioni tra aziende, agricoltori e istituzioni per sviluppare soluzioni condivise.
- **Monitoraggio e Valutazione:** Valutare costantemente gli impatti delle politiche e iniziative digitali.
- **Incentivi Finanziari:** Introdurre incentivi finanziari, come sovvenzioni per l'acquisto di software.

Solo affrontando queste sfide e adottando una strategia olistica, potremo garantire un futuro sostenibile e innovativo per l'agricoltura e l'ambiente.

Recentemente, il 3D Gaussian Splatting (GS) rappresenta un'ulteriore alternativa competitiva per la ricostruzione del rendering 3D (Kerbl et al. 2023). Garantisce il rendering in tempo reale di scene catturate da più immagini in un lasso di tempo sufficientemente rapido. Attualmente ci sono diversi tipi di ricerche che trattano indagini, confronti e integrazioni tra NeRF e GS (Chen and Wang 2024; Malarz et al. 2023; Tang et al. 2024).

Vale la pena osservare che negli ultimi 10 anni, un importante contributo alla realizzazione di modelli 3D sono arrivati dai veicoli aerei senza pilota (UAV). Utilizzare gli UAV come piattaforme di fotografia aerea consente l'acquisizione rapida di immagini di alta qualità e alta risoluzione, offrendo una promessa significativa per la produzione di dati di mappatura geografica (Gao and Wu 2017; Shang and Wang 2022). Con l'avanzamento della fotogrammetria inclinata, le tecniche per la generazione di nuvole di punti dense e la costruzione di modelli a griglia triangolare 3D a partire da immagini 2D si sono evolute, incorporando la ricostruzione sparsa (Structure from Motion, SFM) e la ricostruzione densa (Multiple View Stereo, MVS) (Pepe, Alfio, and Costantino 2022; Schönberger and Frahm 2016). Tuttavia, questi approcci ricchi di dati spesso portano a un notevole carico computazionale nella ricostruzione 3D tradizionale, che pone un ulteriore sforzo sui computer e prolunga il processo di ricostruzione (Ge et al. 2024).

Oltre alla fotogrammetria digitale, sia aerea che da terra, abbiamo assistito allo sviluppo della tecnologia dell'informazione 3D, la scansione dei sensori LiDAR (light detection and ranging) e le misurazioni della luce strutturata sono diventate metodi importanti per ottenere rapidamente dati spaziali 3D. Possono essere utilizzati per ottenere rapidamente e accuratamente i dati di coordinate della superficie dell'oggetto misurato e realizzare la misurazione senza contatto dell'oggetto. Rispetto ai metodi di misurazione tradizionali, la tecnologia di misurazione della scansione 3D ha molti vantaggi come velocità elevata, buona performance in tempo reale e alta precisione (Edson and Wing 2011). A seconda dei diversi obiettivi di ricerca, gli studi pertinenti sui requisiti di misurazione dei dati 3D nell'allevamento possono essere grossolanamente divisi in tre categorie: (i) migliorare la qualità dell'allevamento e l'alimentazione di precisione e prevenire malattie come la zoppia; (ii) analizzare la condizione corporea di parti specifiche; e (iii) studiare i metodi di acquisizione del peso corporeo, delle dimensioni corporee, ecc. (Huang et al. 2019). Inoltre, i dispositivi che montano sensori LiDAR, come i Laser Scanner Terrestri (TLS) o gli iPhone (a partire dalla Versione 14) definiti Mobile Mapping System (MMS), sono considerate efficienti e

potenti negli studi sui patrimoni archeologici, ecologici e paesaggistici (Calders et al. 2020), specialmente nel processo di acquisizione dei dati, rilevamento dei siti, mappatura e modellazione (Guarnieri, Remondino, and Vettore 2006). Come noto, diversi metodi di acquisizione da Lidar hanno caratteristiche diverse e vengono utilizzati in vari campi per ottenere dati in tempo reale. È necessario selezionare un metodo di rilevamento e restituzione del modello 3D adatto in base alle caratteristiche specifiche e ai requisiti degli obiettivi e dei compiti.

Il seguente lavoro mira a fornire un'analisi qualitativa di diverse metodologie innovative di rendering digitali applicate a scene reali sia nel campo delle costruzioni rurali che nella modellazione 3d di vacche. Principalmente in questa prima fase, analizzeremo la qualità dei rendering 3D finali considerando anche i tempi necessari per il processo e la complessità delle operazioni da eseguire. I risultati NeRF e GS sono stati ottenuti tramite le piattaforme Luma AI (LUMA AI 2024) Kiri Engine (Kiri Engine Web 2023) e Recon-3d (Recon-3d 2023). Successivamente saranno criticamente confrontati e analizzati rispetto al risultato UAV-fotogrammetria. Vengono analizzati i vantaggi e le criticità della metodologia, nonché l'efficacia e i possibili sviluppi futuri del metodo di digitalizzazione per la restituzione di modelli fedeli alla realtà, utilizzabili per la rappresentazione, la visualizzazione e la divulgazione dell'architettura dei fabbricati rurali.

## Capitolo 2

# STATO DELL'ARTE

Ogni anno nuove tecniche e nuove tecnologie diventano più centrali e necessari nel settore agricolo, ciò è ogni giorno più chiaro sia a imprenditori, investitori e comunità scientifica e numerose sono le pubblicazioni in questo ambito.

Ad esempio, nel lavoro di tesi “Fruit detection and 3D location using optical sensors and computer vision” (Gené Mola, 2020) si studia il rilevamento e localizzazione dei frutti per la gestione delle piantagioni di alberi da frutto e, di conseguenza, con applicazioni dirette nella previsione del raccolto, nella mappatura della produzione e nella raccolta automatizzata.

Per farlo sono stati testati sensori attivi, come i LiDAR (light detection and ranging) e le telecamere di profondità (RGB-D) e i risultati ottenuti dimostrano che i dati di intensità forniti dai sensori attivi LiDAR e RGB-D sono estremamente utili per la rilevazione dei frutti, inoltre, entrambe le strategie testate per ridurre il numero di frutti nascosti hanno dimostrato di aumentare la percentuale di frutti rilevati.

Nella tesi “Sviluppo di modelli 3D di chiome di vite utilizzando la Structure from Motion per la stima di parametri biometrici e la ripartizione della biomassa” (Chin, 2019) la SfM è stata utilizzata per creare modelli 3D delle chiome di vite in diverse fasi di sviluppo fenologico. L'obiettivo era valutare l'efficacia di stimare le dimensioni e lo sviluppo delle piante di vite integrando modelli 3D con misure biometriche, indici di crescita e dinamiche di distribuzione della biomassa durante la stagione. Questi dati sono stati correlati alle misure di crescita e alla distribuzione della biomassa tra foglie, tralci e grappoli rilevate durante la stagione vegetativa. È stato sviluppato un modello per stimare la crescita della vite basato sui modelli 3D, proponendo un protocollo di analisi per quantificare le misure biometriche delle chiome.

Nello studio “Remote Sensing and Decision Support System Applications in Precision Agriculture: Challenges and Possibilities” (Mehedi et al., 2024) si esamina le difficoltà nell'uso dei sistemi di supporto decisionale nell'Agricoltura 4.0 e si analizzano i vantaggi e gli svantaggi di ciascun metodo, valutando la loro efficacia in diverse situazioni agricole. Le tecniche di rilevamento remoto vengono esplorate per aumentare i profitti agricoli riducendo l'impatto sull'ambiente. Queste tecniche includono la previsione dei rendimenti, la valutazione

dei bisogni nutritivi delle piante e dei livelli di nutrienti nel suolo, il calcolo dei livelli di umidità delle piante e la gestione delle infestanti.

Nell'ambito delle ricostruzioni tridimensionali e nell'estrazione di misure, l'applicazione dell'IA, sia nell'ambito professionale che di ricerca, sta assumendo sempre più importanza e interesse. In particolar modo sono nati nuovi strumenti anche per la ricostruzione 3D di oggetti partendo da immagini 2D come i NeRF, basati sul deep learning.

Lo studio "Comparative Assessment of Neural Radiance Fields and Photogrammetry in Digital Heritage: Impact of Varying Image Conditions on 3D Reconstruction"(Croce et al., 2024), esegue un'analisi comparativa tra i Campi di Radianza Neurale (NeRF) e la Fotogrammetria, applicati alla ricostruzione tridimensionale nel contesto dei beni culturali. Tre casi di studio sono stati esaminati, con la statua di Tersicore utilizzata come caso pilota, per valutare la qualità, la coerenza e l'efficienza di entrambi i metodi.

I risultati mostrano che NeRF supera la fotogrammetria nel mantenere la completezza e la descrizione del materiale quando i dati di input sono limitati o di risoluzione inferiore, utilizzando lo stesso set di immagini di input con pose note della fotocamera. NeRF è quindi consigliato per scenari che necessitano di una mappatura estesa dell'area con un numero limitato di immagini, in particolare in situazioni di emergenza.

Nonostante NeRF sia in una fase di sviluppo meno avanzata rispetto alla fotogrammetria, i risultati evidenziano un potenziale superiore nel descrivere le caratteristiche dei materiali e nel rendere texture omogenee con maggiore fedeltà e accuratezza visiva. Tuttavia, NeRF sembra essere più sensibile agli effetti del rumore.

Il documento propone l'integrazione futura di NeRF con la fotogrammetria per affrontare le limitazioni di entrambi i metodi, fornendo così una rappresentazione più completa per le attività di conservazione del patrimonio culturale. Gli sviluppi futuri prevedono l'estensione delle applicazioni a superfici planari, l'esplorazione di NeRF in realtà virtuale e aumentata, e lo studio dell'evoluzione di NeRF in linea con le tendenze emergenti nella segmentazione semantica e nella ricostruzione della scena.

Anche nello studio *Evaluating the Point Cloud of Individual Trees Generated from Images Based on Neural Radiance Fields (NeRF) Method* (H. Huang et al., 2024), vengono utilizzati i NeRF ma, in questo caso, vengono impiegati nella ricostruzione tridimensionali di alberi. Tale applicazione risulta molto importante nella gestione e ricerca forestale di precisione perché, mediante metodi fotogrammetrici convenzionali, è molto difficile creare un modello tridimensionale di un albero partendo da immagini bidimensionali. In questo studio viene paragonata la ricostruzione dei NeRF a quelli per fotogrammetria evidenziando come il

metodo NeRF abbia un tasso di ricostruzione riuscita più elevato, una ricostruzione della chioma migliore e richiede meno immagini. Tuttavia, i NeRF tendono a creare delle nuvole di punti più rumorose e di bassa risoluzione e i parametri strutturali dell'albero estratti sono meno accurati di quelli provenienti da modello fotogrammetrico. In conclusione, si evidenzia l'elevato potenziale del metodo NeRF per la ricostruzione dei singoli alberi.

In "3D Reconstruction of Ancient Buildings Using UAV Images and Neural Radiation Field with Depth Supervision" (Ge et al., 2024) si propone un modello di ricostruzione 3D basato sui NeRF per la ricostruzione di edifici antichi che sia in grado di produrre modelli di superficie di qualità superiore, consentendo la ricostruzione 3D rapida e geometricamente accurata di edifici antichi.

L'applicazione di queste tecnologie può essere fatta anche ad altri soggetti come ad animali, infatti, l'applicazione soprattutto su animali da reddito può dimostrarsi di grande interesse nel monitoraggio di numerosi aspetti morfologici, e di conseguenza sanitari e commerciali, cari ad allevatori e centri di selezione.

Nonostante sia un settore ancora agli inizi, ma in piena esplorazione, vi sono alcune pubblicazioni scientifiche in merito alla misurazione a distanza di caratteri morfologici su bovini.

In questo articolo, Automated measurement of dairy cows body size via 3D point cloud data analysis (Yang et al., 2022), è stato presentato un sistema di misurazione 3D portatile senza contatto per il corpo delle vacche da latte, utilizzando gli smartphone. Per ottenere una rappresentazione tridimensionale della bovina, sono stati impiegati diversi metodi:

- Fotogrammetria Structure-from-Motion (SfM): Questo approccio ha permesso di ricostruire la scena in tre dimensioni utilizzando immagini bidimensionali. Le foto scattate da diverse angolazioni sono state elaborate per creare una nuvola di punti 3D che rappresenta la superficie della mucca.
- RANdom SAmples Consensus (RANSAC): Questo algoritmo è stato utilizzato per identificare e rimuovere eventuali punti outlier o rumore nella nuvola di punti. Ciò ha contribuito a migliorare la precisione delle misurazioni.
- Clustering euclideo: Questo metodo ha consentito di suddividere la nuvola di punti in gruppi omogenei, facilitando l'estrazione delle informazioni specifiche sulla mucca.

Per affrontare le limitazioni dovute all'occlusione della barriera e delle gambe, è stato proposto un metodo di completamento basato sulla curva spline. Questo ha permesso di ricostruire le parti mancanti della nuvola di punti, garantendo una rappresentazione più completa e accurata del corpo della mucca.

Infine, le dimensioni corporee della mucca sono state misurate automaticamente utilizzando caratteristiche morfologiche. Questo approccio ha consentito di ottenere informazioni dettagliate sulla struttura e le proporzioni del corpo dell'animale, senza la necessità di contatto fisico.

In "Estimating body dimensions and weight of cattle on pasture with 3D models from UAV imagery" (Los et al., 2023), si porta avanti uno studio di fattibilità, si indaga l'impiego di metodologie tridimensionali per la valutazione manuale delle dimensioni fisiche, come l'altezza e il peso, di singoli esemplari di bovini della razza Frisona Holstein. Le tecniche adottate si fondano sull'analisi di immagini stereo RGB, video e dati LiDAR raccolti mediante Veicoli Aerei Non-Tripulati (UAV).

Durante un intervallo temporale di tre anni, sono stati sottoposti a monitoraggio 25 bovini distinti, con l'analisi complessiva di 4.611 immagini, approssimativamente 10 video e un insieme di dati LiDAR. I metodi applicati includono la stima del peso attraverso l'analisi di modelli 3D generati da immagini RGB e video raccolti tramite UAV, e la stima dell'altezza e del peso utilizzando dati LiDAR.

Per l'elaborazione dei dati UAV e l'estrazione dei modelli 3D sono stati utilizzati i software Agisoft Metashape Professional, CloudCompare, RiPROCESS 1.8.4 Riegl Software e Potree Desktop.

I risultati derivati dal LiDAR per la stima dell'altezza al garrese e del peso si sono rivelati accurati, con un errore medio rispettivamente di 6 cm e 38 kg. La stima del peso ottenuta dai modelli 3D generati mediante la tecnica Structure for Motion (SfM) da immagini RGB sovrapposte ha evidenziato un errore medio superiore, pari a 62 kg. Tuttavia, l'errore medio è diminuito a 31 kg dopo l'eliminazione di tre valori anomali che eccedevano il doppio della deviazione standard.

Questi risultati suggeriscono che l'utilizzo di UAV per la stima delle dimensioni corporee nei sistemi di produzione estensiva di carne bovina è promettente. Tuttavia, permangono alcune sfide, come la necessità di acquisire immagini dei bovini da tutti i lati senza movimenti eccessivi da parte degli animali, per permettere una corretta modellazione 3D. Un'altra sfida è la riduzione dell'errore medio nelle stime del peso, al fine di monitorare efficacemente le variazioni del peso corporeo nel tempo.

Nello studio "Non-Contact Body Measurement for Qinchuan Cattle with LiDAR Sensor" (L. Huang et al., 2018), si introduce un approccio per la modellazione digitale tridimensionale di bovini Qinchuan adulti vivi allo scopo di misurare le dimensioni del corpo.

Utilizzando un sensore LiDAR per acquisire la serie originale di dati puntuali di bovini vivi, vengono applicati metodi di filtraggio condizionale, outlier statistici e griglia voxel per eliminare lo sfondo e gli outlier. Successivamente, attraverso la segmentazione dell'estrazione del clustering K-means e l'algoritmo RANSAC, viene proposto l'istogramma delle caratteristiche dei punti veloci (FPFH) per ottenere automaticamente i dati dei bovini.

La superficie del bovino viene quindi ricostruita per ottenere un modello 3D del bovino utilizzando un abbinamento ICP veloce con alberi K-D casuali bidirezionali e un metodo di ricostruzione GPT. Questo permette di cliccare e calcolare i punti caratteristici delle sagome dei bovini. Infine, vengono misurati sul campo cinque parametri corporei (altezza al garrese, profondità del petto, altezza del dorso, lunghezza del corpo e altezza della vita) e verificati con un'accuratezza di 2 mm e un errore vicino al 2%.

## Capitolo 3

# MATERIALI E METODI

### 3.1 Fotogrammetria

La tecnica più diffusa e assodata nel mondo della ricostruzione tridimensionale è sicuramente la fotogrammetria. Con questo termine si intendono tutte quelle procedure che utilizzano immagini fotografiche di un oggetto per ricavarne le dimensioni.

Grazie ad essa è possibile effettuare il rilievo di un oggetto, ossia ricavarne la posizione spaziale di tutti i punti di interesse, ma, a differenza di altre metodiche, l'operazione viene fatta, in gran parte, non direttamente sull'oggetto ma operando su immagini fotografiche.

La fotogrammetria rappresenta il metodo più completo e preciso, a parità di costi e rapidità, rispetto ad altri metodi di studio e rappresentazione del territorio.

Sebbene la sua origine si confonda storicamente con la nascita della fotografia, risalente alla metà dell'Ottocento, è stato solo nei primi del Novecento, che è divenuta la protagonista assoluta nella realizzazione di qualsiasi documento cartografico, parallelamente allo sviluppo della tecnologia aeronautica. (Beani Egle, 2019)

Nello sviluppo della tecnica del rilievo fotogrammetrico, è possibile riconoscere schematicamente quattro fasi temporali, grossomodo della durata di cinquant'anni ciascuna, la cui distinzione è legata allo sviluppo delle relative tecnologie: fase pionieristica, fase analogica/stereoscopica, fase analitica e fase digitale. La quarta ed ultima fase, cosiddetta "digitale" (1990-oggi), nasce dalla possibilità di produrre e utilizzare immagini numeriche, che si differenziano dalle semplici immagini fotografiche, in quanto immagini digitali, definite in una rappresentazione raster, strutturate in una matrice di piccoli elementi di dimensioni finite detti pixel. (Beani Egle, 2019)

La fotogrammetria così definita risulta essere uno strumento fondamentale per il rilievo di oggetti di qualsiasi forma e dimensione che necessitano di un elevato numero di punti per una descrizione completa, quali possono essere oggetti difficilmente accessibili, o accessibili per breve tempo, oggetti di piccole dimensioni o organismi viventi.(Beani Egle, 2019)

I vantaggi del processo fotogrammetrico rispetto al rilievo diretto del territorio per produrre cartografia sono molteplici, in quanto risulta avere caratteristiche di maggiore produttività,

rapidità ed economicità, con un'uniformità di precisione, soprattutto per rilievi di grande estensione e scale medio-piccole.(Beani Egle, 2019)

Un rilievo fotogrammetrico si divide in 3 fasi principali:

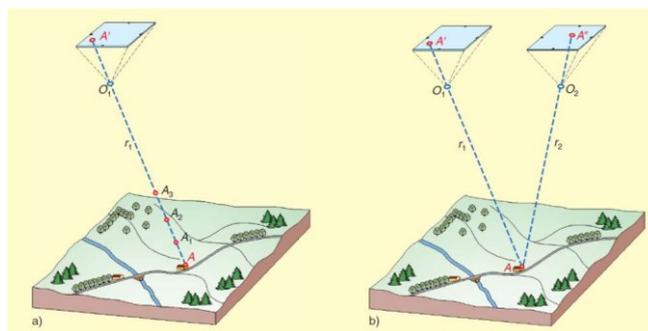
1) Acquisizione: consiste nello scattare fotografie dell'oggetto o del territorio in esame. Per garantire una corretta acquisizione dell'oggetto bisogna assicurarsi di scattare immagini da diversi punti di vista, accertandosi di fotografare tutti i lati dell'oggetto e di mantenere un certo grado di sovrapposizione tra un fotogramma e il successivo;

2) Orientamento: consiste nella definizione della posizione del fotogramma e si distingue tra

orientamento interno ed esterno. L'orientamento interno permette di individuare la posizione del centro di presa rispetto al fotogramma. Le informazioni necessarie in tal senso sono solitamente note perché contenute nel certificato di calibrazione della camera. L'orientamento esterno consiste invece nella ricostruzione matematica della posizione e dell'assetto della camera al tempo dell'acquisizione delle immagini. Questo secondo tipo di orientamento deve essere, invece, ricavato per ogni singolo fotogramma.

3) Restituzione: con questa fase si torna dallo spazio 2D dell'immagine allo spazio tridimensionale dell'oggetto ricostruito, ovvero dalle coordinate immagine di un punto (spazio immagine) alle coordinate oggetto (spazio oggetto). Nella fotogrammetria digitale tali operazioni vengono eseguite automaticamente dai software di restituzione, mediante l'utilizzo di algoritmi in grado di generare i prodotti cartografici.

Per poter svolgere quest'ultimo passaggio ed applicare il principio della visione stereoscopica, ovvero la visione dell'oggetto da due diversi punti di vista/presa, è necessario che una serie di punti siano visibili su almeno 2 immagini. Nella figura di seguito riportata si può osservare come una sola fotografia (caso a) non sia sufficiente per definire la posizione dei punti sul terreno; ma se si dispone di due fotogrammi che da due centri di presa contengono lo stesso oggetto (b), i suoi punti sono definiti univocamente dall'intersezione dei raggi omologhi  $r_1$  e  $r_2$  (configurazione di presa aerea).



**Figura 3.1** *Visione stereoscopica*

### 3.1.1 Fase di presa – fotogrammetria aerea da drone

In questa tesi si utilizzerà la fotogrammetria aerea e, di conseguenza, una fase di presa aerea.

Detta anche aerofotogrammetria, essa si fonda sullo stesso principio della parziale sovrapposizione delle immagini fotografiche che è proprio della stereoscopia.

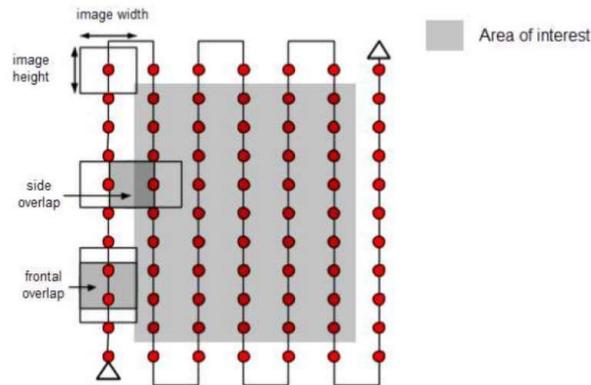
La fotogrammetria aerea consente di produrre cartografia di qualsiasi tipo, da quelle generali a scala piccola, alle carte tecniche a grande scala. Il tipo di prodotto realizzabile dipende da molteplici fattori, tra cui la quota di volo e il tipo di camera utilizzata. Differiscono ovviamente le modalità operative dell’acquisizione: si useranno camere metriche montate su aeromobili, o come nel nostro caso, su UAV (Unmanned Aerial Vehicle) (Beani Egle, 2019).

Ad oggi i sistemi UAV possono essere classificati in base al tipo di volo, all’equipaggiamento, alla durata, alla distanza o alla quota del volo (Sartini Matteo, 2021).

Secondo tale procedura il territorio è ripreso con sequenze di fotogrammi, chiamate strisciate o strip, scattati automaticamente a intervalli regolari, mantenendo velocità di volo uniformi lungo traiettorie rettilinee e a quota costante (Beani Egle, 2019). Per la maggior parte dei casi è di almeno il 70-75% di sovrapposizione longitudinale – overlap (rispetto alla direzione di volo) e almeno il 50-60% di sovrapposizione laterale - overside (tra le strisciate). La fotocamera deve essere mantenuta il più possibile a un'altezza costante sull’oggetto per garantire la risoluzione delle foto a terra (GSD Ground Sampling Distance) desiderata. Per rendere la fase di presa ottimale si effettuano voli con traiettorie a serpentina con strisciate parallele l’una all’altra. Generalmente si effettuano strisciate perpendicolari l’un l’altra solo nel caso di rilievo di aree urbane in modo che tutte le facciate degli edifici siano visibili sulle immagini raccolte (Sartini Matteo, 2021).

Per la ricostruzione completa del territorio occorrono molti fotogrammi parzialmente sovrapposti che determineranno il cosiddetto piano di volo, in cui si definiscono le quote relative di volo, la velocità di crociera, gli eventuali assetti di presa e i tempi di scatto.

Il piano di volo, benché correlato a un UAV, deve seguire le tradizionali regole di un piano di volo fotogrammetrico, come riportato nello schema seguente (Beani Egle, 2019).



*Figura 3.2 strisciate parallele: volo fotogrammetrico*

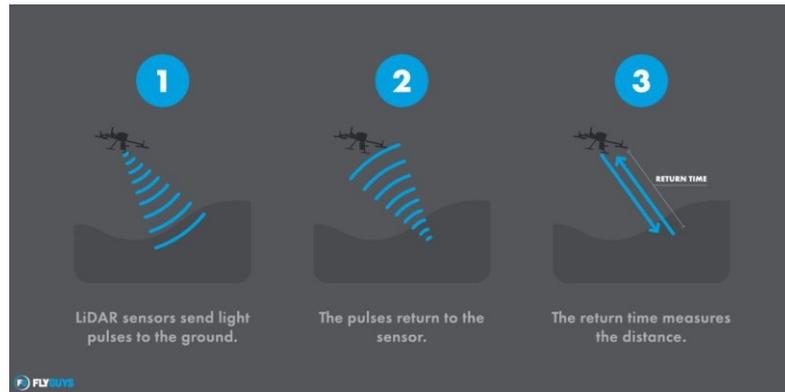
I dati definiti nel piano di volo verranno gestiti automaticamente dal software di pianificazione del volo proprio dell'UAV utilizzato, grazie ai sensori navigazionali (ricevitore/i GNSS, antenna radio-modem e IMU) integrati nei vettori disponibili sul mercato, che permettono anche al drone di contrastare l'azione del vento, guadagnando in stabilità del mezzo e quindi in qualità delle riprese, il tutto ottimizzando il numero di scatti e il tempo di volo.

### 3.2 Lidar

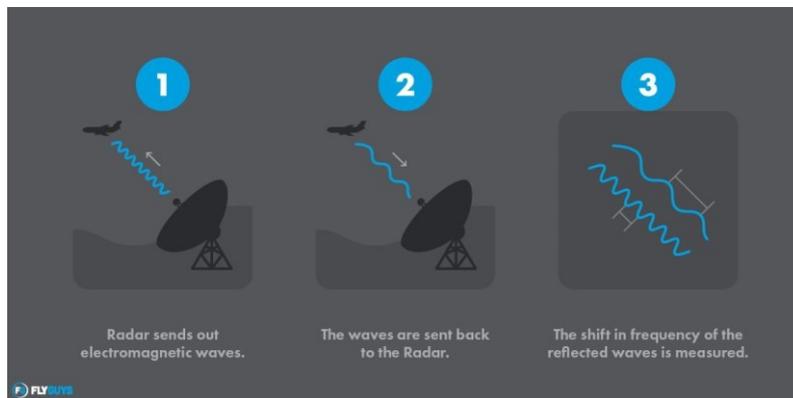
In questo lavoro, tuttavia, non è stata applicata solo la fotogrammetria ma anche una ulteriore tecnica di ricostruzione che prevede la misurazione di una nuvola di punti mediante uno strumento definito LiDAR.

LiDAR è un acronimo per Light Detection And Ranging, è una tecnologia di rilevamento attivo e remoto che utilizza impulsi laser per misurare con precisione le distanze verso un determinato area o obiettivo.

LiDAR è simile alle tecnologie radar e sonar, ma molto più preciso. Mentre il radar fornisce solo informazioni generali sulla posizione degli oggetti, LiDAR offre una maggiore precisione.



**Figura 3.3 LiDAR su drone**



**Figura 3.4 Tecnica radar**

Si tratta, pertanto, di un *laser scanner*, ossia, di un dispositivo di acquisizione che genera un modello 3D definendo, per ogni punto, un insieme di informazioni geometriche, topologiche e radiometriche. La geometria permette infatti di gestire i punti che costituiscono l'oggetto tramite le sue coordinate spaziali senza perdere l'informazione metrica; la topologia consente di legare tra loro le varie componenti geometriche che formano l'oggetto attraverso relazioni di connessione; il contenuto radiometrico permette infine di ottenere informazioni di colore.

Il rilievo laser scanning fornisce come risultato un point cloud (nuvola di punti) che rappresenta l'oggetto colpito dal raggio laser. Ogni punto è correlato a delle coordinate tridimensionali, generalmente misurate rispetto ad un sistema di riferimento interno allo strumento.

Le applicazioni di LiDAR sono diverse:

- Scoperta di città perdute: LiDAR rivela città sepolte nel terreno, individuando lievi elevazioni lineari. Questo è possibile grazie alla densa nuvola di punti generata dagli impulsi laser.
- Controllo di qualità per edifici e ponti: Scansioni LiDAR verificano la corrispondenza tra la costruzione reale e il modello informativo degli edifici (BIM). Rilevano difetti in tempo reale.
- Esplorazione della batimetria subacquea: LiDAR subacqueo utilizza una lunghezza d'onda verde per mappare fino al fondale marino. È utile per la mappatura sia terrestre che acquatica.
- Agricoltura di precisione: Gli agricoltori utilizzano LiDAR per misurare con precisione elementi come biomassa, altezza e volumi nei campi.
- Analisi forestale: LiDAR visualizza la struttura e l'altezza degli alberi nei boschi, generando rappresentazioni tridimensionali realistiche.

### 3.2.1 *Laser*

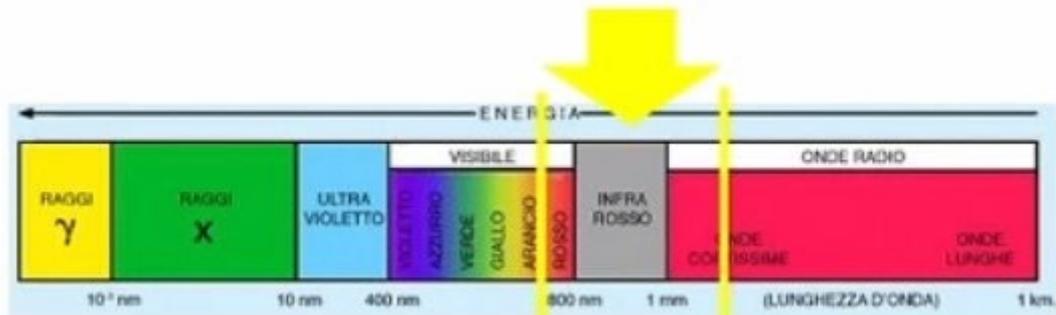
A questo punto risulta fondamentale definire il concetto di raggio laser, elemento cardine del LiDAR.

Con L.A.S.E.R. (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) si definisce uno strumento che trasforma energia (elettrica, chimica, termica, ottica o nucleare) in un fascio di radiazioni elettromagnetiche ad alta intensità: la luce laser (Fabio Bottazzo, 2014). Si usa la luce perché la sua velocità è nota nel mezzo considerato (atmosfera) e la sua interazione con le superfici oggetto di indagine e la sua modellizzazione è nota.

Il laser, quindi, non è altro che una radiazione elettromagnetica, ovvero un'onda luminosa, avente le seguenti caratteristiche:

- Monocromaticità: l'onda dev'essere composta da una sola frequenza di luce, diversamente quindi da quello di una torcia che è composta da molte frequenze appartenenti allo spettro visibile e che definiscono la luce bianca (pur avendo colori variabili in base alla lampadina scelta)
- Unidirezionalità: l'onda si propaga a grande distanza e con estrema direzionalità, anziché essere irradiata in tutte le direzioni come nel caso delle sorgenti di tipo tradizionale.
- Coerenza: la radiazione luminosa dev'essere costituita da onde della stessa frequenza che si sommano assieme originando un fascio di luce che può essere spinto ad elevata intensità e potenza, in particolar modo la "potenza".

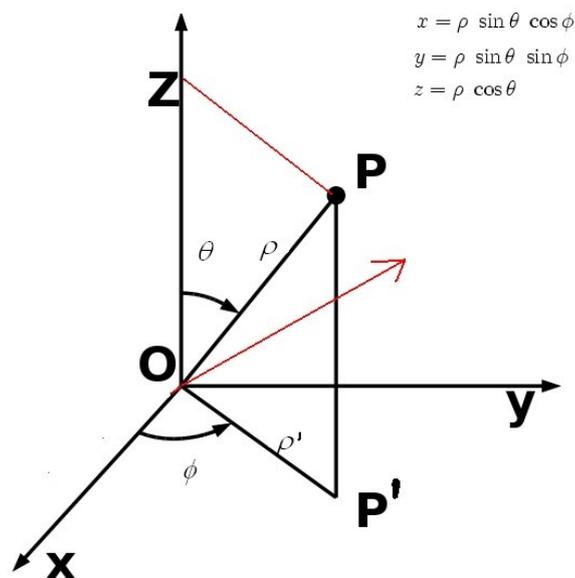
La radiazione luminosa, inoltre, può differenziarsi in base alla lunghezza d'onda e, nel caso del laser, la radiazione può essere ultravioletta (avere, cioè, una lunghezza d'onda compresa tra i 200 e 400 nm), visibile (tra i 400 e i 700 nm) o infrarossa (tra i 700 e i 300 nm) (Fabio Bottazzo, 2014).



**Figura 3.5** scala della lunghezza d'onda

Il Lidar viene definito un laser scanner distanziometrico a impulsi.

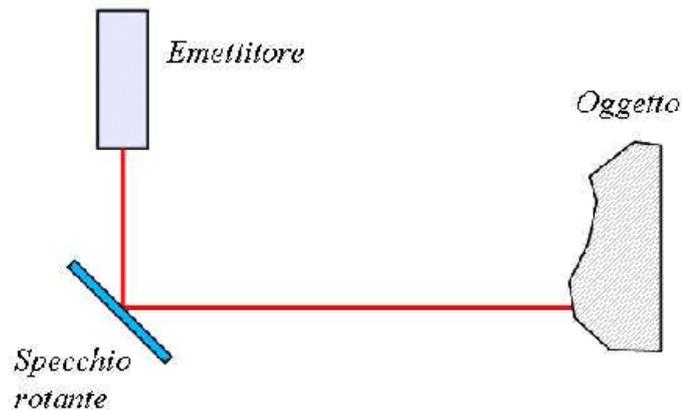
Per laser distanziometrico si intende che la misura della posizione tridimensionale del punto avviene in coordinate sferiche attraverso la misura dell'angolo orizzontale (azimutale), dell'angolo verticale (zenitale) e della distanza inclinata (Milan Nicola, 2012). Successivamente queste coordinate possono essere convertite in coordinate cartesiane grazie alle formule sottostanti.



**Figura 3.6** calcolo delle coordinate cartesiane

La distanza dello strumento dall'oggetto è calcolata misurando il tempo di percorrenza di un'onda elettromagnetica del percorso emettitore-oggetto-ricevitore dove emettitore e ricevitore coincidono (Fabio Bottazzo, 2014).

Proprio per tale ragione, vengono anche definiti come sistemi a tempo di volo (TOF - Time Of Flight).



**Figura 3.7 percorso emettitore-oggetto-ricevitore**

Per laser a impulso, invece, si intende uno strumento che prevede la misura della distanza attraverso la misura del tempo trascorso tra due impulsi o tra due treni d'onda. In pratica, la misura della distanza  $D$  avviene attraverso la misura del tempo  $\Delta t$  impiegato da un impulso per andare dal distanziometro al riflettore e viceversa:  $D = (v \cdot \Delta t) / 2$ , avendo indicato con  $v$  la velocità della luce ( $2,998 \times 10^8$  m/s) (Milan Nicola, 2012).

La massima distanza operativa per strumenti che operano sul tempo di volo è di alcune centinaia di metri e l'accuratezza nella determinazione delle coordinate varia in genere da alcuni millimetri ad un paio di cm o oltre. Oltre alla distanza, per ogni punto viene rilevato anche il suo angolo zenitale  $\alpha$  e azimutale  $\beta$ : queste tre misure consentono di determinare per coordinate polari la posizione del punto in questione (Fabio Bottazzo, 2014).

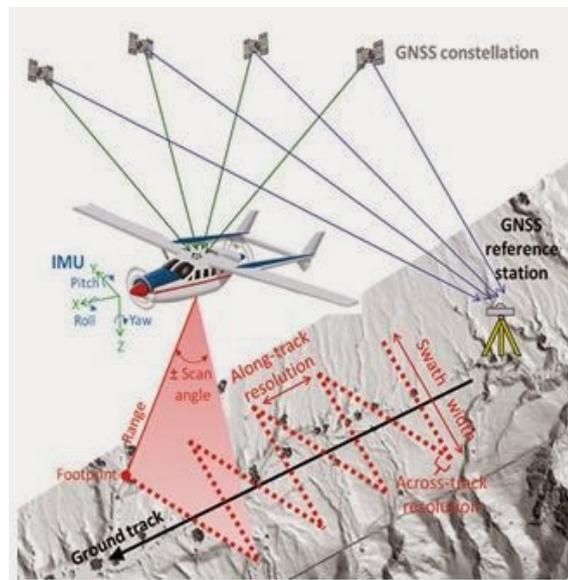
All'utente viene anche fornito per ogni punto un quarto valore che esprime l'intensità di ritorno (il sensore laser è in grado di valutare quale sia l'intensità di riflessione dell'oggetto nei confronti del raggio stesso) (Milan Nicola, 2012).

I laser scanner possono essere di due tipi: aerei e terrestri.

#### 2.2.1.1 Laser scanner aereo

La scansione del territorio con il laser scanner distanziometrici avviene sorvolando l'area a bordo di un aereo o un elicottero sul quale è montato un telemetro laser che determina la

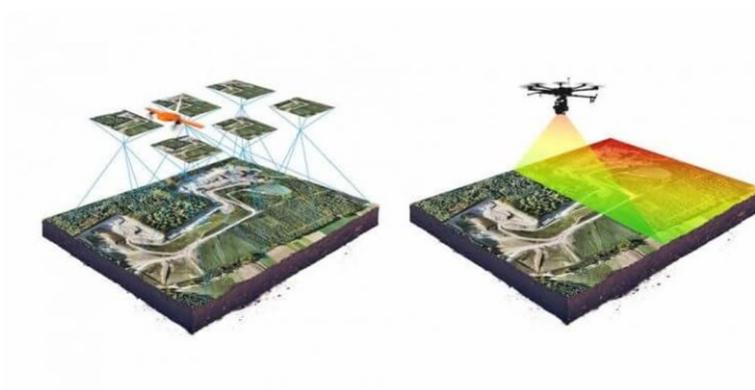
distanza fra il punto di emissione A, materializzato dal telemetro, e il punto di riflessione B, che rappresenta il generico punto appartenente al terreno e colpito dal laser (Fabio Bottazzo, 2014).



*Figura 3.8 laser scanner aereo da aereo*

Lo scanner laser, oltre a misurare la distanza fra i punti, ne fornisce anche le coordinate essendo nota, in ogni istante, la posizione e l'assetto del mezzo sul quale il telemetro è montato, grazie ad un sistema integrato GPS/IMU. Il sistema GPS/IMU, infatti, consente di determinare oltre alle coordinate, l'orientamento della retta normale all'aereo. (Fabio Bottazzo, 2014)

Il volo è effettuato mediante strisciate che ricoprono il territorio (come per la tecnica fotogrammetrica).



*Figura 3.9 laser scanner aereo da drone*

### 2.2.1.2 Laser scanner terrestri o TLS

I laser scanner terrestri sono l'insieme di strumenti laser a scansione che durante le fasi di acquisizione non si trovano installati su un veicolo in movimento. Essi possono operare come strumenti stabili in posizioni fisse per il monitoraggio di movimenti e deformazioni di strutture, il rilievo di alta precisione, oppure come strumenti mobili montati su treppiedi per il rilievo di oggetti "vicini" (da pochi centimetri a 1 km) allo strumento (Fabio Bottazzo, 2014).

Poiché la dimensione degli oggetti da rilevare può variare da alcuni millimetri fino ad alcune centinaia di metri non è possibile individuare un tipo di strumento idoneo per ogni evenienza. A questo scopo i laser scanner terrestri possono essere suddivisi, in base alla loro portata, in tre grandi categorie:

laser di piccola portata ( $\leq 1$  m);

laser di media portata (1 m  $\div$  50 m);

laser di lunga portata ( $> 50$  m) (Fabio Bottazzo, 2014)

Le portate effettive dei laser scanner dipendono dal materiale di cui è costituito l'oggetto.

Materiali fortemente assorbenti alla lunghezza d'onda del raggio laser impiegato rifletteranno una minore quantità di energia compromettendo la possibilità di misura della distanza nei laser distanziometrici o la possibilità di avere immagini automaticamente riconoscibili nei laser triangolatori. A parità di materiale costituente l'oggetto, la scabrosità della superficie può ridurre notevolmente la portata del laser scanner in quanto aumenta la quantità di energia riflessa in direzioni diverse da quella di ritorno verso lo strumento. Altri fattori non trascurabili nel determinare la portata effettiva di uno strumento laser scanner sono la composizione del mezzo nel quale il raggio laser si propaga e la presenza di radiazioni di disturbo quali quelle causate dalla riflessione della luce solare, da altre radiazioni artificiali dell'oggetto stesso o di altri oggetti in prossimità dei punti da rilevare. Tutti questi effetti diventano molto importanti specialmente negli strumenti che misurano la distanza mediante la differenza di fase delle onde emesse e riflesse e negli strumenti triangolatori (Rinaudo Fulvio, 2003).

I principali limiti dei TLS, meno rilevanti nei laser scanner mobili, rimangono i tempi operativi più lunghi, il maggior numero di accortezze richieste per l'acquisizione dei dati soprattutto per modelli a 360° che rischiano di tralasciare delle zone d'ombra non rilevate.

### 2.2.1.3 Laser scanner miniaturizzati: l'esempio di iPhone 14 PRO max

L'evoluzione tecnologica ha consentito l'immissione sul mercato di sensori economici e miniaturizzati (fino a dimensioni sub-centimetriche), come quello che Apple ha installato nei suoi tablet e smartphone a partire dal 2020. Questo sensore è stato introdotto sul mercato

principalmente per applicazioni di realtà aumentata: una tecnica che impiega i dati sulla profondità della scena per inserire nell'inquadratura testi e oggetti tridimensionali. Si tratta, pertanto, di un sensore che può essere impiegato come strumento di misura pur non essendo stato concepito a tale scopo. Questo sensore, del quale Apple non ha fornito le specifiche tecniche, dovrebbe usare onde elettromagnetiche di lunghezza pari a  $0,8 \mu\text{m}$ , dunque onde non visibili dall'uomo. Il suo funzionamento prevede la trasmissione di impulsi ad onde elettromagnetiche alla velocità costante di  $299.792.458 \text{ m/s}$  (velocità della luce) e li riceve una volta che sono riflessi da un ostacolo.

La fotocamera svolge un ruolo di fondamentale importanza in questo contesto. Non solo contribuisce alla colorazione dei punti all'interno della nuvola, ma gioca anche un ruolo cruciale nella creazione dell'intera struttura di punti. Questo è evidente poiché, se si oscura l'obiettivo durante una scansione, il risultato sarà una nuvola di punti completamente nera e con notevoli lacune. Un vantaggio notevole deriva dall'integrazione del sensore LiDAR con la fotocamera RGB, che consente la produzione di una nuvola di punti colorata.

In questa tesi il modello di iPhone utilizzato è l'iPhone 14 PRO max, immesso nel mercato nel 2022, dotato di:

- 512gb di memoria
- Chip: A16 Bionic, CPU 6-core con 2 performance core e 4 efficiency core, GPU 5-core, Neural Engine 16-core
- Fotocamera: Sistema di fotocamere Pro, Fotocamera principale (grandangolo) da 48MP: 24 mm,  $f/1.78$ , stabilizzazione ottica dell'immagine su sensore di seconda generazione, obiettivo a sette elementi, 100% Focus Pixels, Ultra-grandangolo da 12MP: 13 mm,  $f/2.2$  e angolo di campo  $120^\circ$ , obiettivo a sei elementi, 100% Focus Pixels.



*Figura 3.10 camera LiDAR iPhone*

### 3.3 NeRF

Giungendo, infine, alle fasi di processamento e ricostruzione 3D degli oggetti, si vedrà l'applicazione di nuove tecnologie come i NeRF e Gaussian Splatting.

NeRF (acronimo di Neural Radiance Fields) sono una classe di modelli neurali utilizzati per la ricostruzione 3D di oggetti e scene a partire da immagini bidimensionali.

L'introduzione dei campi di radianza neurale (NeRF) potrebbe sembrare un'alternativa promettente alla fotogrammetria per la ricostruzione 3D dalle immagini.

NeRF, infatti, si basa su una rete neurale completamente connessa per generare nuove visualizzazioni di oggetti e scene 3D (funzione volumetrica) basate su una serie di immagini sovrapposte con pose note della fotocamera; le coordinate spaziali vengono mappate a colori e opacità, consentendo di generare rappresentazioni tridimensionali realistiche.

I modelli NeRF sono fotorealistici e hanno raggiunto la qualità visiva richiesta per la riproduzione di forme reali e dell'aspetto di una scena 3D. Tuttavia, l'interesse nell'applicazione del NeRF rispetto ad altre tecnologie consolidate come la fotogrammetria non è stato ancora riconosciuto in tutto il suo potenziale. Anche se il punto di partenza è ancora una serie di immagini sovrapposte, i NeRF utilizzano le reti neurali per creare i cosiddetti campi di radianza invece di fare affidamento sulla ricostruzione delle relazioni geometriche tra un'immagine e lo spazio mondiale 3D.

La fotogrammetria è ampiamente applicata in molti settori che vanno dal design industriale all'archeologia, architettura e agricoltura, geologia, ecc. Tuttavia, le tecniche di ricostruzione fotogrammetrica affrontano molte limitazioni comuni nei casi in cui gli oggetti mostrano

proprietà ottiche impegnative (come assorbimento, riflettività intensa o dispersione estesa), variazioni nelle condizioni di illuminazione, come ombre, abbagliamento o illuminazione incoerente, trame uniformi o ripetitive e forme o geometrie complesse. In questo contesto, i NeRF sono emersi come tecnologia all'avanguardia che rappresenta una grande promessa per affrontare alcune di queste limitazioni intrinseche.

Dalla loro introduzione nel 2020, i NeRF hanno visto numerose implementazioni e sono stati estesi a vari campi di ricerca, tra cui la mappatura urbana, la robotica, la guida autonoma, la simulazione degli effetti climatici, design industriale e stima della posa umana (Croce et al., 2024).

### **3.4 3d Gaussian Splatting**

Si tratta di un'altra tecnica di ricostruzione 3D partendo da immagini 2D ed è una tecnica proposta nel campo della grafica computerizzata e si è diffusa anche nelle applicazioni spaziali.

Si basa sulla proiezione di punti di dati su un piano bidimensionale utilizzando distribuzioni gaussiane per creare rappresentazioni fluide e visivamente accattivanti e, quindi, eccelle nella produzione di visualizzazioni continue e lisce, ideali per applicazioni in cui l'estetica e la chiarezza sono cruciali.

Ciò che lo distingue dai NeRF sta nella maggior predisposizione a visualizzazioni fluide mentre NeRF è ideale per dettagli e realismo.

### **3.5 App iPhone**

In questa tesi, inoltre, si evidenzieranno le nuove applicazioni nell'ambito delle ricostruzioni tridimensionali utilizzando tecniche intuitive e alla portata di tutti, dalla grande azienda al piccolo operatore agricolo. Per questo trova spazio di applicazione la camera LiDAR installata negli iPhone e le numerose applicazioni di processamento dati scaricabili sul dispositivo mobile. Le app utilizzate in questo lavoro sono le seguenti.

#### **3.5.1 3D scanner**

Si tratta di un'applicazione per la ricostruzione 3D compatibile con i modelli iPhone 12/13/14/15 PRO e PRO max con una versione di base gratuita e due a pagamento, di cui una riservata alle aziende.

### 3.5.2 Recon 3D

Recon3D è un'applicazione di scansione, compatibile con iPhone 12/13/14/15 PRO e PRO max, che utilizza il sensore LiDAR dell'iPhone per produrre dati di alta qualità e precisione ed è stata progettata e ottimizzata principalmente per la ricostruzione di scene di crimini e incidenti o, in ogni caso, i migliori oggetti per la scansione sono quelli intorno ai quali puoi camminare completamente.

Recon-3D utilizza il motore EveryPoint e fonde il lidar con i fotogrammi video per darti un modello di sensore fotogrammetrico più Lidar.

Ha una portata predefinita e consigliata di 5m ma può arrivare fino a superfici distanti 30m ma con tempi di elaborazione più lunghi.

Il tempo di scansione è limitato a 10 min con differenze in base alla risoluzione impostata: risoluzioni uguali o superiori a 5 mm permettono fino a 10 min di rilievo.

L'elaborazione dei dati può essere su cloud o su dispositivo: in caso di risoluzioni uguali o superiori ai 15mm e rilevazioni non troppo lunghe il dispositivo può fornire un'anteprima rapida ma l'elaborazione cloud consente ai dati di scansione di essere ricostruiti al loro pieno potenziale.

### 3.5.3 Luma AI

Luma AI è una nuova tecnologia che permette di creare incredibili modelli 3D iperrealistici utilizzando l'intelligenza artificiale e anche solo uno smartphone.

La tecnologia si basa sui Nerf (Neural Radiance Fields), algoritmi di intelligenza artificiale che ricostruiscono immagini tridimensionali anche a partire da semplici foto bidimensionali. I campi di applicazione sono numerosi: comunicazione, realtà aumentata, e-commerce, stampa 3D, settore immobiliare, gaming e molto altro.

In sostanza, l'algoritmo di intelligenza artificiale alla base dei Nerf viene addestrato analizzando migliaia di immagini 2D per imparare a generare viste fotorealistiche 3D basandosi sui dati ricavati. Durante l'addestramento, la rete neurale acquisisce una comprensione approfondita della scena o dell'oggetto da reindirizzare in 3D, mappando tutte le caratteristiche visive come luci, ombre e dettagli superficiali.

Successivamente, sfruttando questa conoscenza, il sistema Nerf è in grado di colmare gli spazi vuoti e aggiungere profondità alle immagini 2D in input, generando modelli 3D di elevatissima qualità. Luma AI rappresenta una delle prime applicazioni consumer di questa tecnologia di nuova generazione, che aprirà le porte a incredibili innovazioni nella computer grafica e nella realtà virtuale.

#### 3.5.4 *Kiri Engine app*

KIRI Engine è un'applicazione avanzata di scansione 3D disponibile per dispositivi mobili e browser web, progettata per artisti, designer, ingegneri e appassionati di stampa 3D. L'app consente di creare modelli 3D di alta qualità in pochi minuti utilizzando diverse tecnologie innovative. Tra queste, la fotogrammetria trasforma le foto in modelli 3D dettagliati, mentre la Neural Surface Reconstruction (NSR) utilizza i Neural Radiance Fields (NeRF) per scansionare oggetti privi di caratteristiche distintive o lucidi. Inoltre, il 3D Gaussian Splatting permette di ottenere visualizzazioni 3D complete da video, catturando tutti gli elementi della scena, inclusi i riflessi. KIRI Engine offre anche strumenti di modifica avanzati, la possibilità di esportare in vari formati e una versione gratuita funzionale che permette di esplorare il mondo della fotogrammetria senza costi aggiuntivi.

## Capitolo 4

### CASI STUDIO E RISULTATI

Il caso studio ha interessato due stalle del territorio marchigiano per l'allevamento di bovini da carne.

Il primo rilievo (caso studio 1) ha interessato unicamente la componente strutturale dell'allevamento.

Il caso studio in questione è un'azienda agricola zootecnica in selezione per l'attuazione del programma genetico della razza limousine (ANACLI). Situata a Osimo (AN), è un'azienda a stabulazione libera con accesso al pascolo nel periodo primaverile/estivo. L'allevamento è costituito da circa 50 bovine adulte, 2 tori aziendali e giovane bestiame.

Sono stati scelti due elementi tipici dell'architettura rurale: una stalla per il bestiame e una letamaia. Quest'ultimo elemento ha destato particolare interesse data la sua importanza in un allevamento. Nell'ambito della gestione a lettiera permanente, esso rappresenta una soluzione imprescindibile. La conoscenza dei volumi di materiale che è in grado di ospitare riveste un notevole interesse pratico per gli imprenditori agricoli. Il secondo rilievo (caso studio 2), invece, ha interessato l'elemento centrale dell'allevamento bovino, ossia l'animale stesso.

L'allevamento in questione, anch'esso situato Osimo (An), è un allevamento in selezione per l'attuazione del programma genetico della razza Marchigiana (ANABIC). E' un'azienda a stabulazione fissa in cui sono presenti 16 capi adulti e del giovane bestiame. Non sono presenti riproduttori maschi in quanto l'allevatore pratica l'inseminazione artificiale.

L'interesse nasce dalla volontà di studiare nuovi metodi di misurazione dei caratteri morfologici e relativi indici zoometrici, che in ambito zootecnico vengono impiegati per le valutazioni morfologiche e la definizione degli standard di razza, valutazioni manageriali e merceologiche e sperimentare un'alternativa ai classici sistemi di misurazione manuale: laboriosi, temporalmente lunghi e, alcuni casi, pericolosi.

Per poter valutare l'accuratezza delle rilevazioni lidar sono state effettuate anche delle misurazioni manuali come elementi di confronto.

La seconda parte del lavoro, invece, ha riguardato il processamento dei dati tramite software specifici per la ricostruzione 3D.

#### 4.1 Caso studio 1

Il primo caso studio riguarda i fabbricati rurali tipici della Regione Marche. Nello specifico una stalla che ospita circa 100 bovini e il relativo letamaio per la raccolta del letame. Il procedimento per l'elaborazione del dataset, fino alla comparazione dei risultati ottenuti con le diverse applicazioni, è mostrato nella Fig. 4.1

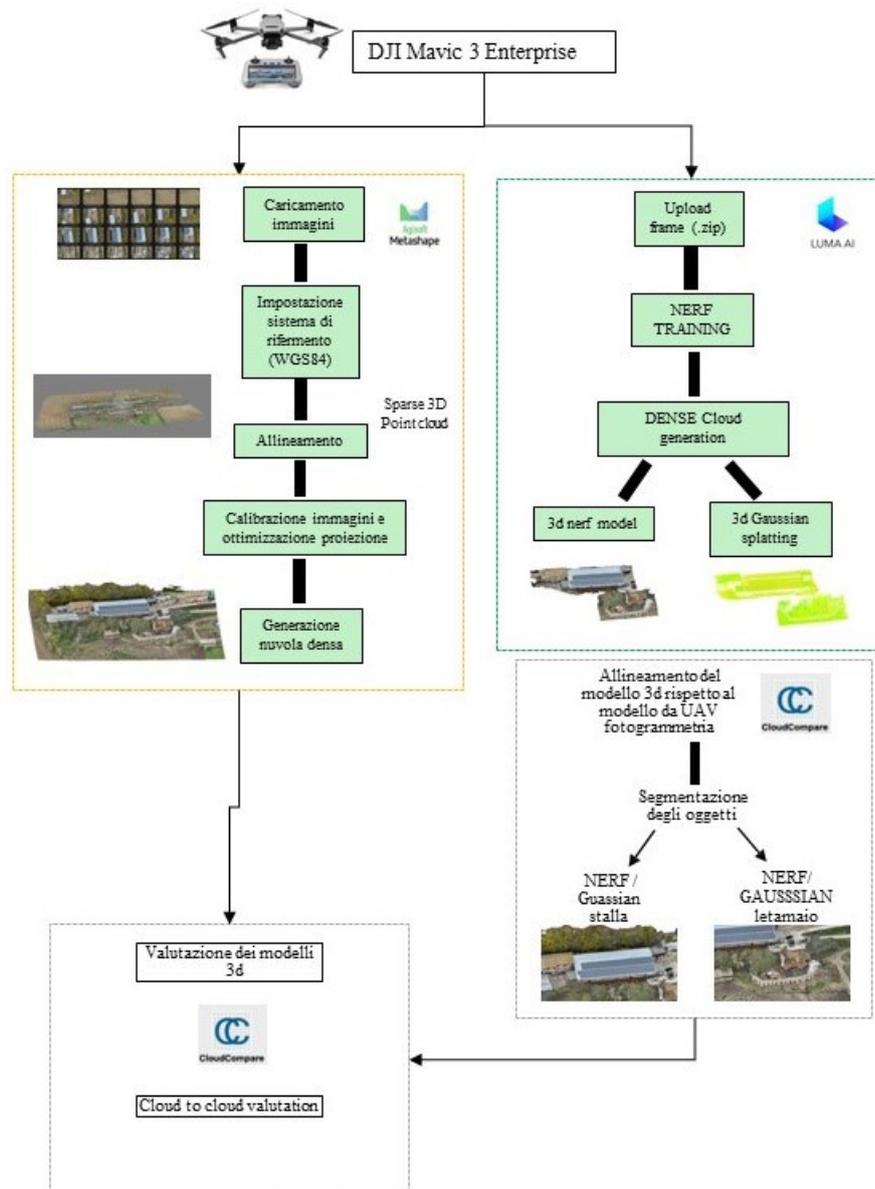


Figura 4.1 Workflow delle operazioni svolte

#### 4.1.1 Rilievo UAV-RTK

Il rilievo è stato eseguito mediante un drone DJI Mavic 3 Enterprise dotato di un ricevitore GNSS multi-frequenza e multi-costellazione operante in modalità Real-Time Kinematic (RTK).

La tecnica utilizzata in questo caso è stata la fotogrammetria quindi, con l'ausilio del UAV, si sono effettuate delle strisciate parallele e sono state ottenute immagini nadirali e con camera obliqua.

È stata utilizzata l'applicazione DJI Pilot 2 per impostare i parametri di volo, tra cui l'altitudine massima di 40 metri, sovrapposizione longitudinale dell'80%, sovrapposizione laterale del 70% e velocità di volo massima di 5 m/s.

Con questa configurazione sono state ottenute 315 immagini nadirali mentre per le foto laterali è stato eseguito un rilievo manuale ottenendo 146 immagini ad altezza inferiore ai 20 metri. L'anteprima del risultato dei centri di presa sono mostrate in Fig. 4.2



**Figura 4.2 Centro di presa delle camere: si notano sia le camere nadirali che oblique**

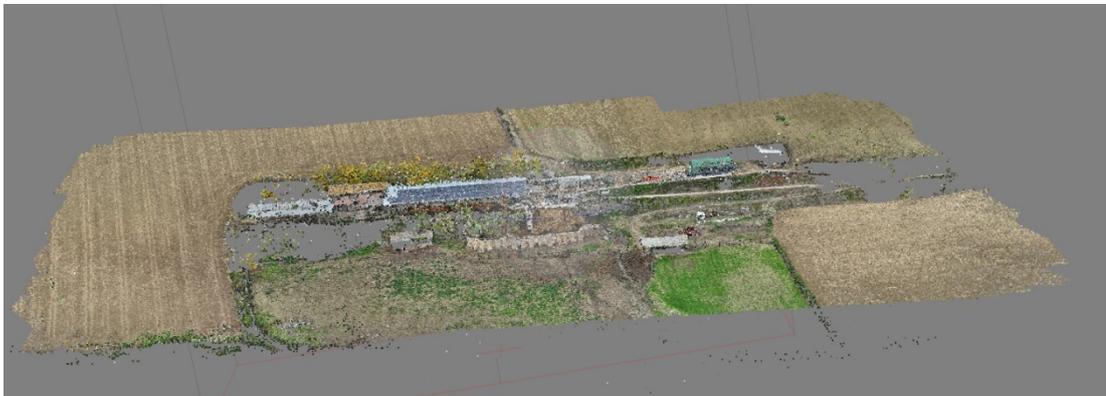
Queste due tipologie di fotografie sono state realizzate per ottenere una corretta ricostruzione 3D, in quanto, senza fotografie laterali dell'immobile, la ricostruzione delle facciate laterali e l'affidabilità del modello sarebbe stata compromessa a causa della sporgenza della copertura del fabbricato o dalla vicinanza della vegetazione presente ai lati di esso.

Nel primo caso, a differenza del secondo, il drone garantisce una precisione nettamente migliore grazie a un'antenna GNSS-RTK che, ricevendo un segnale di posizione da un dispositivo mobile a terra, garantisce una precisione centimetrica delle coordinate del drone e di conseguenza delle foto scattate. Questo aspetto del rilievo è particolarmente importante in

quanto senza conoscere le coordinate delle foto non è possibile allinearle e successivamente procedere col processo di ricostruzione 3D.

Le fotografie sono state successivamente scaricate e trasferite all'interno del software Agisoft Metashape Educational (versione 2.0.1) dove sono state allineate e utilizzate per la creazione di una point cloud (nuvola di punti).

La nuvola di punti (Fig. 4.3) è costituita da un insieme di punti con coordinate note e delle informazioni sul colore e sono individuati mediante la sovrapposizione di almeno due immagini affinché si possa determinare la distanza dal centro di presa e, pertanto, le loro coordinate. Sono state mantenute le coordinate dei centri delle immagini nadirali ma non quelle scattate con camera oblique le quali coordinate non erano sufficientemente precise.



***Figura 4.3 Nuvola sparsa (800,441 punti)***

La nuvola di punti è stata successivamente elaborata dal programma per la realizzazione di una dense cloud (nuvola densa).

Quest'ultimo passaggio viene eseguito perché la dense cloud ha un livello di dettaglio e precisione superiore alla semplice point cloud. Essa è, infatti, frutto di un ulteriore passaggio di elaborazione in cui vengono generati ulteriori punti per ogni pixel delle immagini di partenza e quindi la densità di questa aumenterà rispetto alla point cloud che è formata dai soli punti ottenuti con l'allineamento delle fotografie.

Per ridurre i tempi di processamento, eliminare aree non rilevanti e ridurre le possibilità di errore del software, prima di procedere con la realizzazione della dense cloud, la nuvola sparsa è stata ritagliata e filtrata dai punti anomali e indesiderati mediante strumenti forniti dal software stesso, come gradual selection o il comando seleziona per la rimozione manuale.

Il risultato finale della nuvola densa è stato esportato in formato OBJ (Fig. 4.4).



**Figura 4.4** Nuvola densa da Metashape (58,364,210 punti, high quality)

#### 4.1.2 Modello NERF e GS

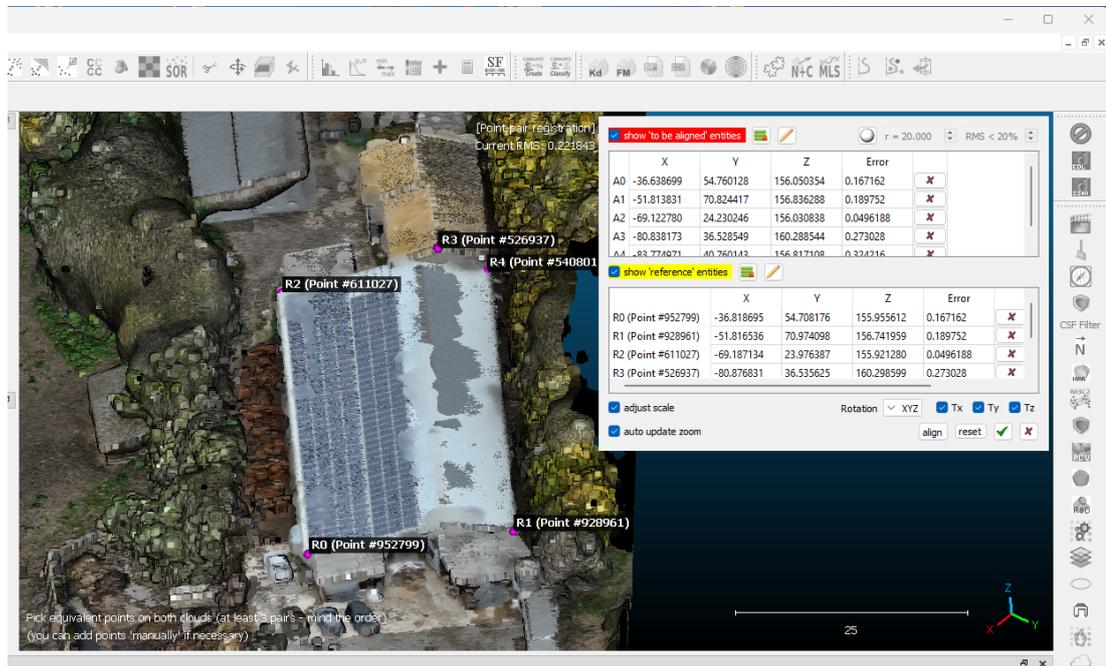
Al fine della ricostruzione 3D, dell'edificio e del letamaio in particolare, sono state testate anche due reti neurali che nascono proprio a questo scopo: NeRF e Gaussian Splatter.

I risultati NeRF e Gaussian Splatting sono stati ottenuti attraverso la piattaforma Luma AI (LUMA AI 2024). Per tale scopo sono state utilizzate gli stessi dati input del rilievo fotogrammetrico UAV, tuttavia, con meno immagini rispetto quest'ultimo: per la stalla solo 106 immagini (circa 23% del totale), mentre per il letamaio 81 immagini (circa il 18% del totale).

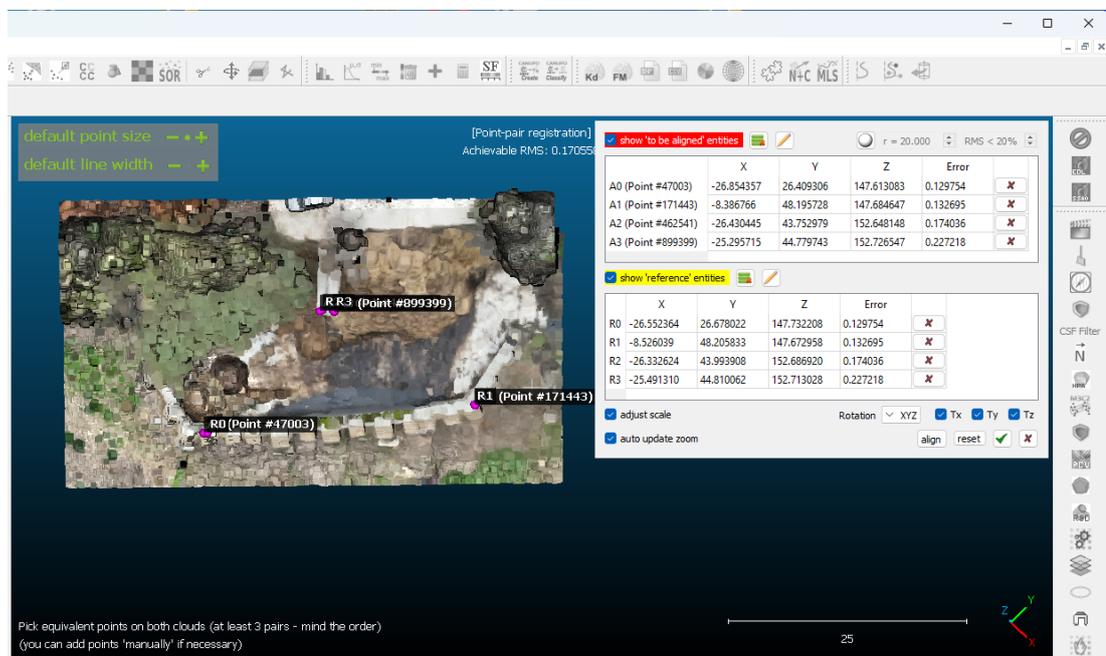
Successivamente, sono stati caricati nel software Cloud Compare (Girardeau-Montaut 2016), prima abbiamo tagliato le parti in eccesso degli oggetti indagati, successivamente abbiamo eseguito l'operazione di allineamento e scalatura usando lo strumento Align rispetto al risultato ottenuto da UAV-RTK. Non essendo stati posizionati punti a terra, sono stati selezionati dei punti di riferimento sul modello 3D da UAV-RTK come gli spigoli della copertura in quanto ben visibili e riconoscibili, come i vertici delle linee di gronda e i muri esterni. Il comando Align richiede che la selezione dei punti di allineamento siano scelti sempre nello stesso ordine.

L'operazione di allineamento e scalatura è stata eseguita su ogni oggetto indagato, tenendo conto della singola stalla e poi del letamaio, rendendo più facile e agevole l'operazione di scalatura del modello.

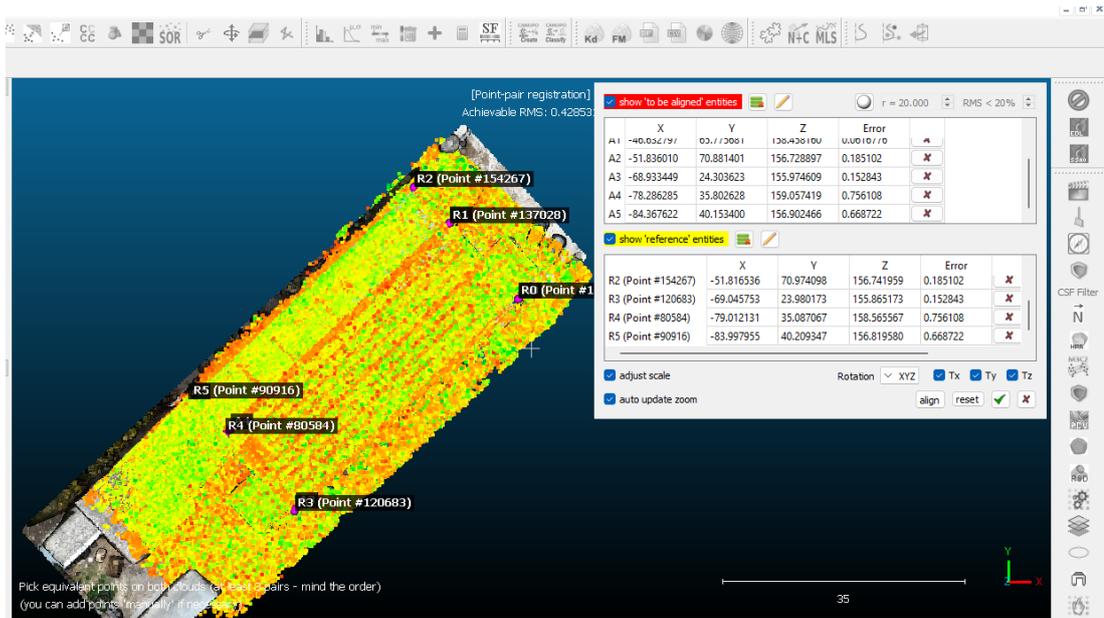
Di seguito le Fig. 4.5 - 4.6 - 4.7 - 4.8 estratte dal software con i valori di RMS (scarto quadratico medio) di errore nella fase di allineamento.



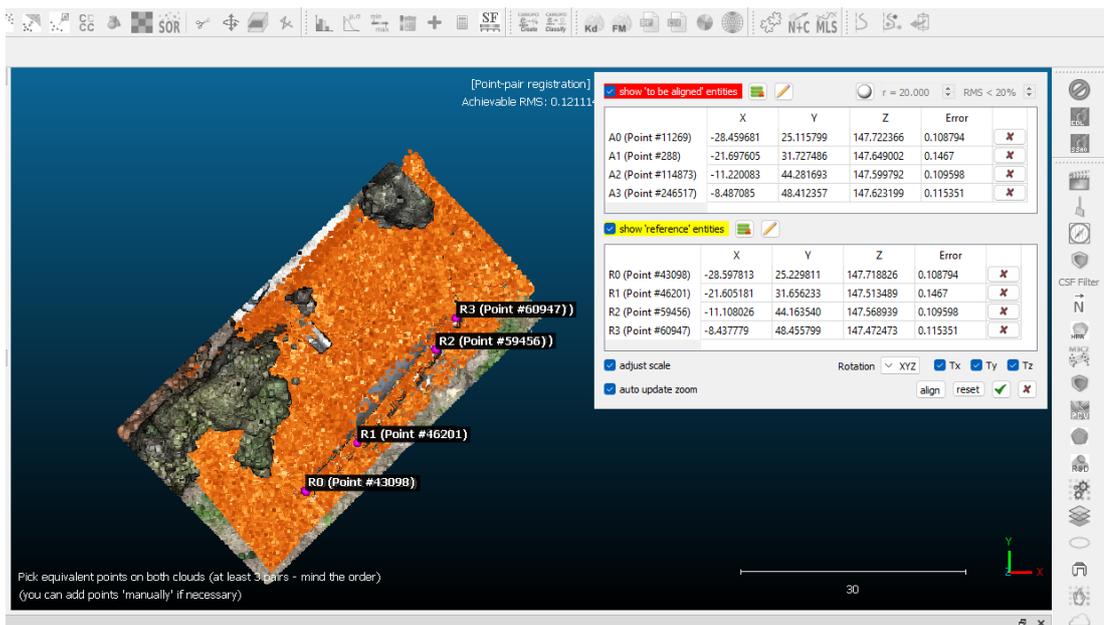
**Figura 4.5 Allineamento Stalla NERF rispetto al modello di riferimento UAV-RTK. Il valore di RMS è pari a 0,22 cm**



**Figura 4.6 Allineamento Letamaio NERF rispetto al modello di riferimento UAV-RTK. Il valore di RMS è pari a 0,17 cm**



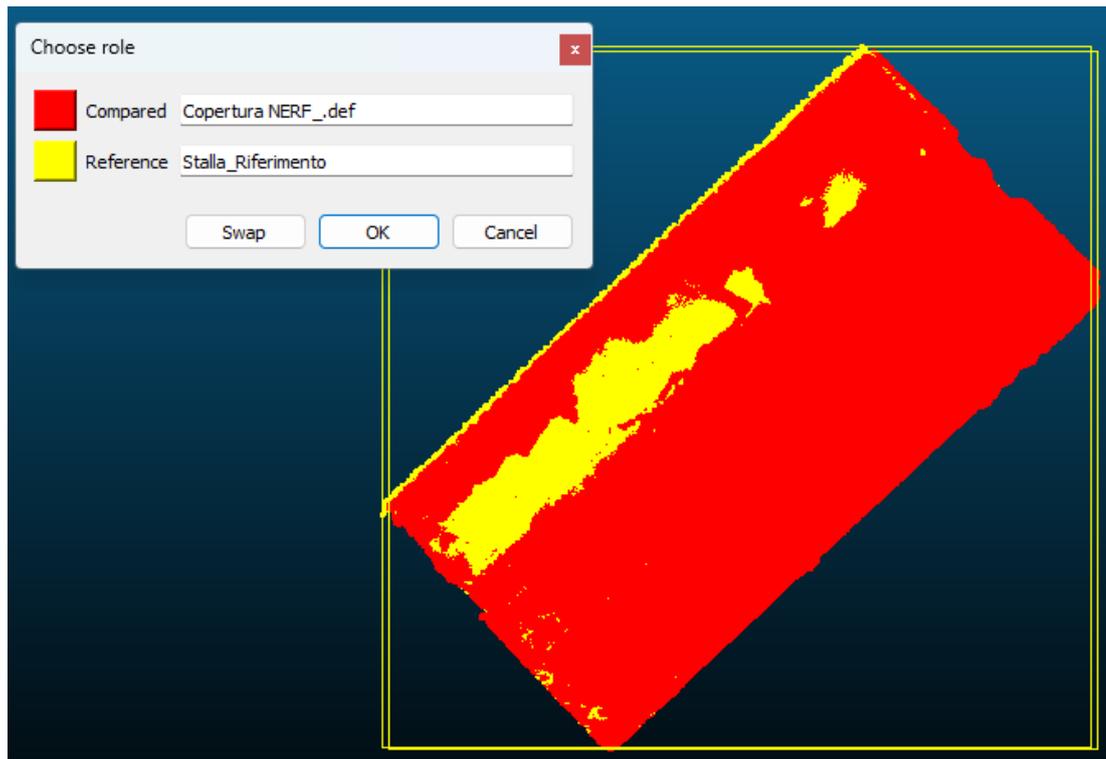
**Figura 4.7 Allineamento Stalla GS rispetto al modello di riferimento UAV-RTK. Il valore di RMS è pari a 0,42 cm**



**Figura 4.8 Allineamento Letamaio GS rispetto al modello di riferimento UAV-RTK. Il valore di RMS è pari a 0,12 cm**

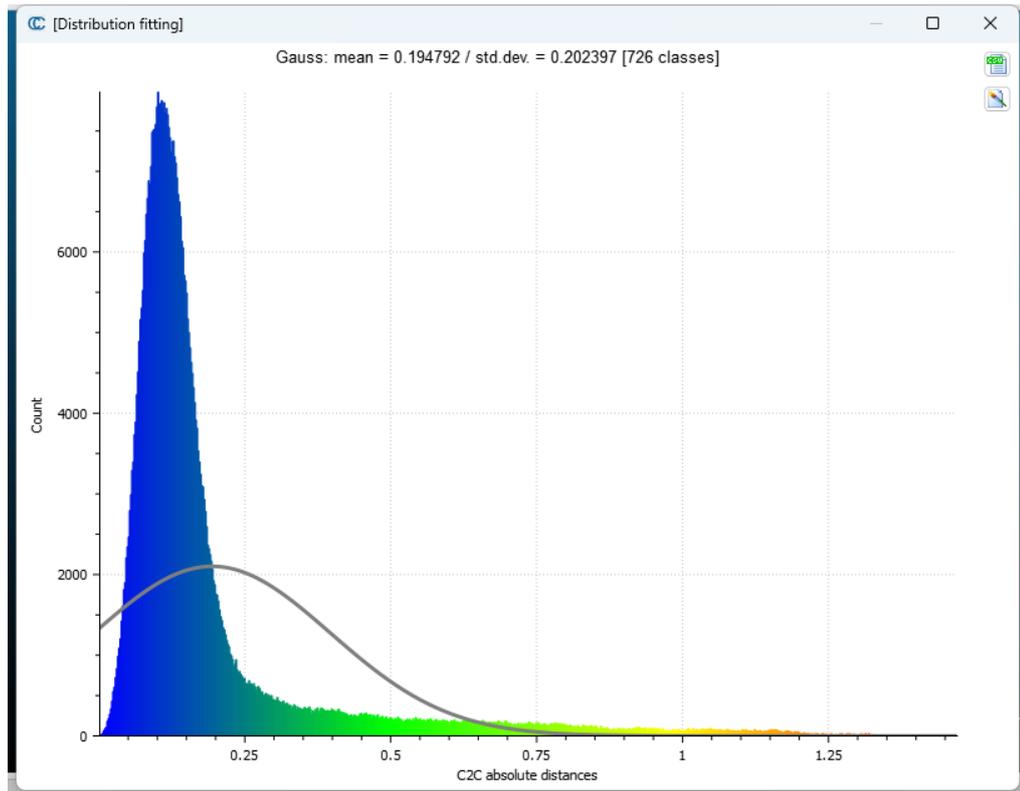
#### 4.1.3 Calcolo dell'accuratezza del dataset

Il calcolo dell'accuratezza è stato eseguito usando C2C tool selezionando come layer di comparazione il modello copertura NERF e GS rispetto il risultato UAV-RTK. In Fig. 4.9 è mostrato l'anteprima dei layer di confronto.



*Figura 4.9 Anteprima del comando C2C tool*

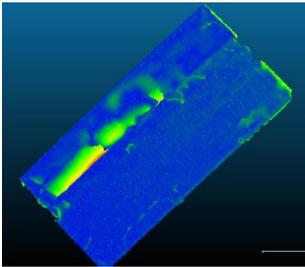
Selezionando il modello NERF e GS, si clicca sull'icona Distribution fitting è possibile leggere il valore di deviazione standard, il quale indica l'accuratezza. In Fig. 4.10 è mostrato la curva di Gauss con la distribuzione dei valori in base al numero di punti e la distanza tra nuvole di punti mediante C2C.

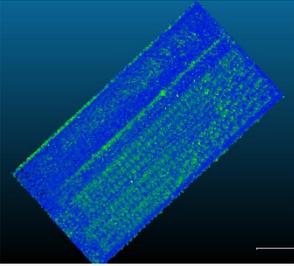
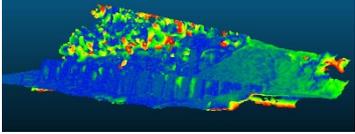
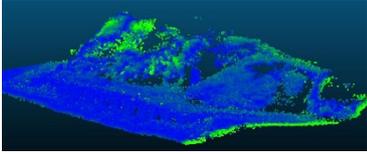


**Figura 4.10** *Distribution fitting della C2C calcolata sulla Stalla NERF e UAV-RTK*

Nella Tabella 4.1 sono riportati i valori della Deviazione Standard della C2M.

**Tabella 4.1** *Valori della RMS ottenuti da C2M tra i modelli NERF-GS rispetto al risultato UAV-RTK*

Metodo	C2M (Cloud to Mesh)
UAV-NERF stalla	 <p>RMS: 0,20</p>

<p>UAV-GS stalla</p>	 <p>RMS: 0,08</p>
<p>UAV-NERF letamaio</p>	 <p>RMS: 0,27</p>
<p>UAV-GS letamaio</p>	 <p>RMS: 0,22</p>

#### 4.1.4 Volume stalla

Il secondo obiettivo è stato il calcolo del volume del fabbricato e del letamaio ottenuto tramite Nerf e GS comparato con il risultato da UAV-RTK.

Il software di lavoro è stato CloudCompare, sfruttando i vari tools messi a disposizione.

Per quanto riguarda la stalla, partendo dal modello ottenuto da UAV-RTK, si separano i punti dai punti fuori terra usando il tool CSF filter. I parametri usati sono stati i seguenti: cloth resolution pari a 1 pixel, Max iteration pari a 500 e classification threshold pari a 0,3. Siccome il rilievo è stato eseguito solo esternamente al fabbricato, la classificazione degli oggetti fuori terra risultano corretti, come mostrato in Fig.4.11 – 4.12. Di segno opposto i punti a terra, in merito alla superficie su cui poggia la stalla, che invece non sono visibili in quanto non è stato eseguito un rilievo all'interno della stalla per via della presenza degli animali, come mostrato in Fig.?

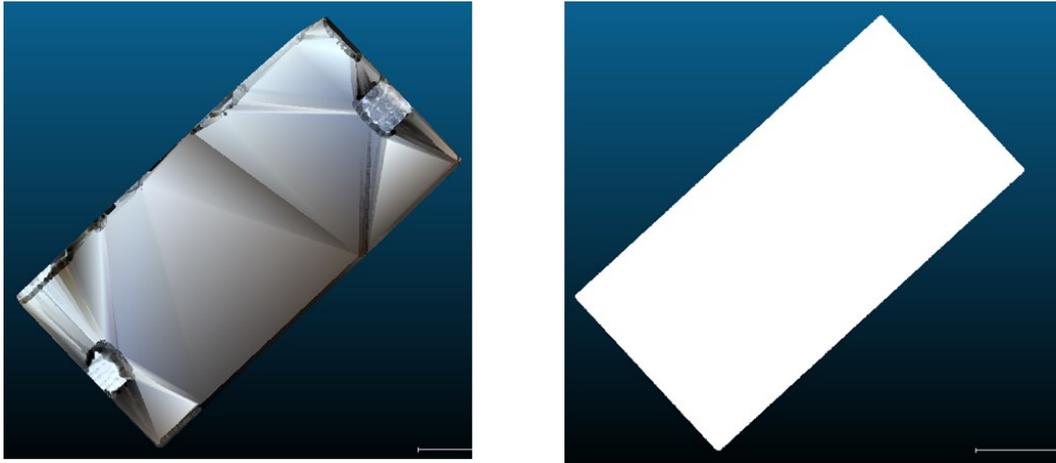


*Figura 4.10 Individuazione dei punti fuori terra da parte di CSF filter tool*



*Figura 4.11 Individuazione dei punti a terra da parte di CSF filter tool*

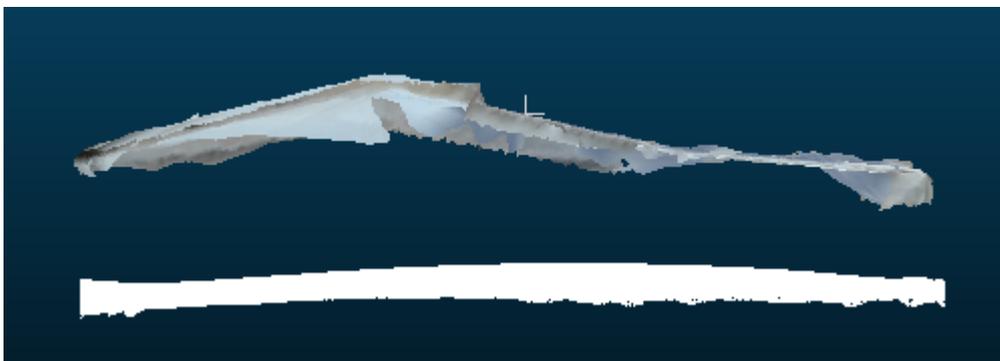
Per eseguire il calcolo del volume, bisogna ottenere i punti a terra del fabbricato, per cui ripartendo dal risultato mostrato in Fig. 8, abbiamo ritagliato il perimetro del fabbricato in corrispondenza della superficie e poi creato una Mesh usando il comando Deluanay 2.5 e valore 0. Il risultato del comando che si trova in Edit è mostrato in Fig. 4.13a. Successivamente viene convertito in nuvola di punti con il tool Point sampling on Mesh e creata una superficie piana con il comando Fit Plane, consultabile nella Fig. 4.13b.



***Figura 4.12 Risultato delle mesh ottenuta dai punti a terra (a), conversione in punti e creazione di una superficie piana mediante il Fit Plane tool (b)***

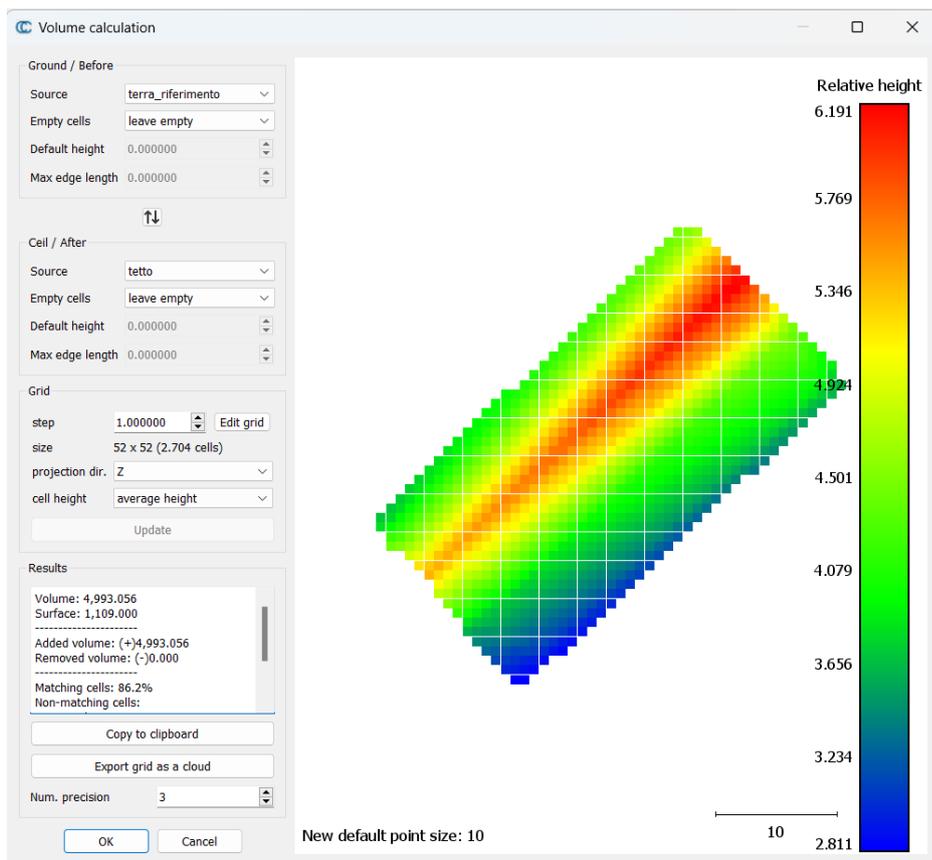
La stessa operazione di classificazione dei punti a terra e fuori terra è stata ripetuta sia per la stalla NERF e GS. In questo caso però ci siamo limitati a esportare solo i punti fuori terra e di usare i punti a terra esportati dal modello di riferimento UAV-RTK.

Di seguito in Fig. 4.14 è riportato una vista frontale della copertura della Stalla da Nerf combinata con la superficie ottenuta dal modello UAV-RTK.



***Figura 4.13 Vista frontale della copertura della stalla Nerf combinata con la superficie UAV-RTK***

Arrivati a questo punto, tramite Volume 2.5 tool in Cloud Compare, è stato calcolato il volume della stalla, sia da UAV-RTK, Nerf e GS. In Fig. 4.15 l'anteprima del calcolo con i parametri impiegati, selezionando come Source in Ground/ Before il layer inerente ai punti a terra, mentre in Cell/After il layer inerente alla copertura, mentre la griglia ha un valore di step pari a 1 m.



**Figura 4.14** Calcolo volume stalla

I risultati del calcolo del volume sono riportati in Tab. 4.2

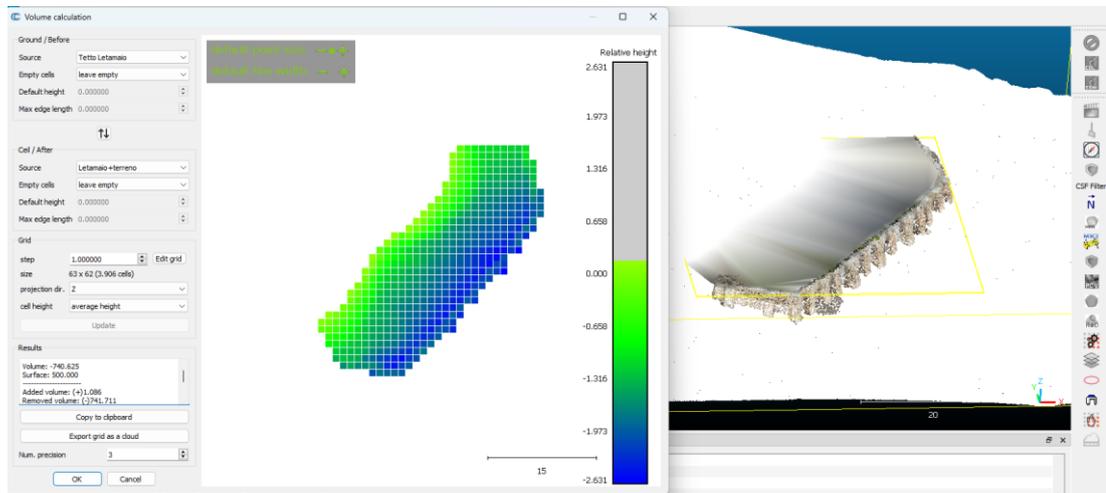
**Tabella 4.1** Risultati volume stalla

Risultati stalla	
	Volume (m <sup>3</sup> )
<b>Stalla RTK</b>	4239
<b>Stalla NeRF</b>	4445
<b>Stalla GS</b>	4422

#### 4.1.5 Volume letamaio

In questo caso la superficie mancante, a differenza del fabbricato, era quella superiore, ossia del coperchio in quanto volevamo calcolare lo spazio all'interno delle mura. In questo caso abbiamo tagliato manualmente il muro di sostegno e fatto merge con i punti a terra ottenuti dal modello UAV – RTK. Infine, è stato poi ritagliato la cima del muro in modo perpendicolare, così da prendere anche il terreno. Da questo profilo, si genera la mesh che poi è stata convertita in punti e tagliata seguendo il contorno delle mura del letamaio e

successivamente è stato calcolato il volume nello stesso modo e con gli stessi parametri del fabbricato.



**Figura 4.15** Calcolo del volume del letamaio mediante Volume 2.5 tool e la creazione dei layer.

I risultati del calcolo del volume sono riportati in Tab. 4.3

**Tabella 4.2** Risultati volume letamaio

Risultati letamaio	
	Volume
	(m3)
<b>Letamaio RTK</b>	740
<b>Letamaio</b>	687,00
<b>NeRF</b>	
<b>Letamaio GS</b>	708,00

## 4.2 Caso studio 2

Gli animali scelti, tutte femmine di diversa età e stadio di gestazione, sono state tre: Gaia, Jennifer, e Olimpia.

### 4.2.1 Fase di rilievo

Il primo passaggio è stato l'allestimento dell'area di rilievo, ossia una tettoia utilizzata per il ricovero attrezzi e stoccaggio delle balle di paglia. In seguito, è stato realizzato un rilievo

con un TLS per ottenere una nuvola di punti altamente precisa da poter utilizzare in seguito nel processo di elaborazione dei dati.

Sono stati disposti dei target di diverso genere intorno all'area di rilievo, sia a terra che su dei supporti locali, affinché si rendesse più facile il processo di individuazione di punti di riferimento.



*Figura 4.17 Target*



*Figura 4.18 Disposizione target*

Si è proseguito con il posizionamento del TLS in tre punti differenti affinché si potesse rilevare adeguatamente tutta l'area e il suo avviamento.

Lo strumento ha rilevato inizialmente l'area tramite lidar e successivamente scattato delle fotografie utili al processo di colorazione del modello 3D.



*Figura 4.19 TLS e posizionamento*

Il passo successivo è stato quello di condurre le bovine in posizione grazie all'ausilio degli allevatori e di eseguire i rilievi tramite iPhone.

Questo secondo rilievo è centrale in questa tesi sperimentale e ha visto l'impiego, oltre che di un iPhone 14 PRO max, anche di 3 applicazioni diverse:

- Luma AI
- 3D Scanner
- Recon3D

Gli animali sono stati mantenuti il più immobili possibile dagli allevatori e successivamente sono stati effettuati i rilievi inquadrando a 360° tutto l'animale.



*Figura 4.20 Rilievo iPhone*

Questo processo è stato uniforme per tutte e quattro le applicazioni e per tutti e tre i soggetti ed è stato caratterizzato da estrema rapidità.

La problematica principale è stata rappresentata unicamente dal movimento degli animali che, in alcuni casi, ha reso necessario ripetere la procedura in quanto, il movimento, rende impossibile il rilevamento dei punti dell'animale in modo affidabile.

A questo punto sono state eseguite delle misurazioni biometriche con metodi classici: con l'ausilio di un bastone misuratore e una fettuccia metrica sono state misurate diverse altezze, lunghezze e circonferenze dell'animale, sia del tronco che della testa, al fine di confrontare le misurazioni ottenute con quelle che si sarebbero poi estrapolate dai modelli 3D e valutare l'accuratezza di questi ultimi.

Questo punto di riferimento è essenziale per valutare quanto efficacemente questi strumenti di rilevamento riescano a rappresentare la realtà fisica degli oggetti interessati.



*Figura 4.21 Bastone misuratore e fettuccia metrica*



*Figura 4.22 Misurazione altezza al garrese*



*Figura 4.23 Misurazione lunghezza del tronco*



*Figura 4.24 Misurazione circonferenza toracica*

#### 4.2.2 Processamento

La seconda parte di questo secondo rilievo ha visto un'elaborazione dei dati ottenuti con entrambi gli strumenti di rilievo.

Primo passo è stato l'allineamento delle fotografie scattate con il TLS e ottenere un modello 3D accurato dell'area di rilievo. Successivamente sono stati identificati su di esso dei punti caratteristici relativi ai target posizionati prima del rilievo.

A questo punto sono stati scaricati i modelli ottenuti con Luma AI, 3D scanner e Recon3D, sono stati elaborati come i modelli NeRF e Gaussian Splatter visti nel caso 1, quindi, tagliati e semplificati per mantenere solo la parte utile del rilievo: l'area comprendente i target e l'animale stesso.

Tramite lo strumento fornito dal software si è potuto identificare i punti caratteristici del modello TLS anche nei modelli 3D ottenuti da iPhone e procedere all'allineamento dei due modelli. Questo processo è utile al fine di scalare il modello iPhone con il modello TLS per una maggior precisione del rilievo, essendo il secondo modello con una precisione millimetrica, al contrario della precisione centimetrica del modello iPhone.

La corrispondenza dei punti selezionati in entrambi i modelli è stata monitorata con lo stesso metodo visto per il caso 1.

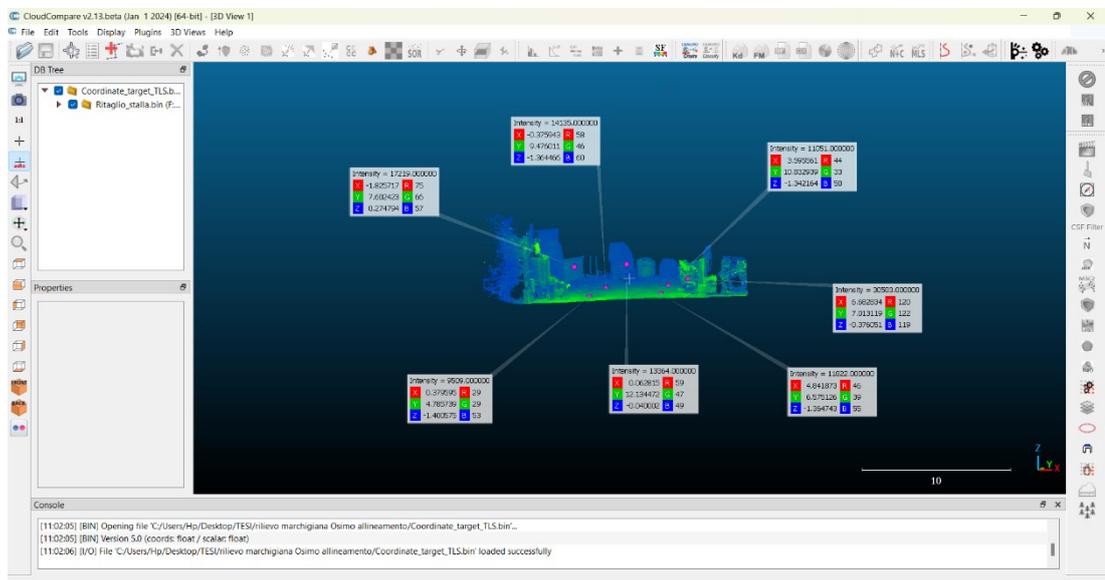
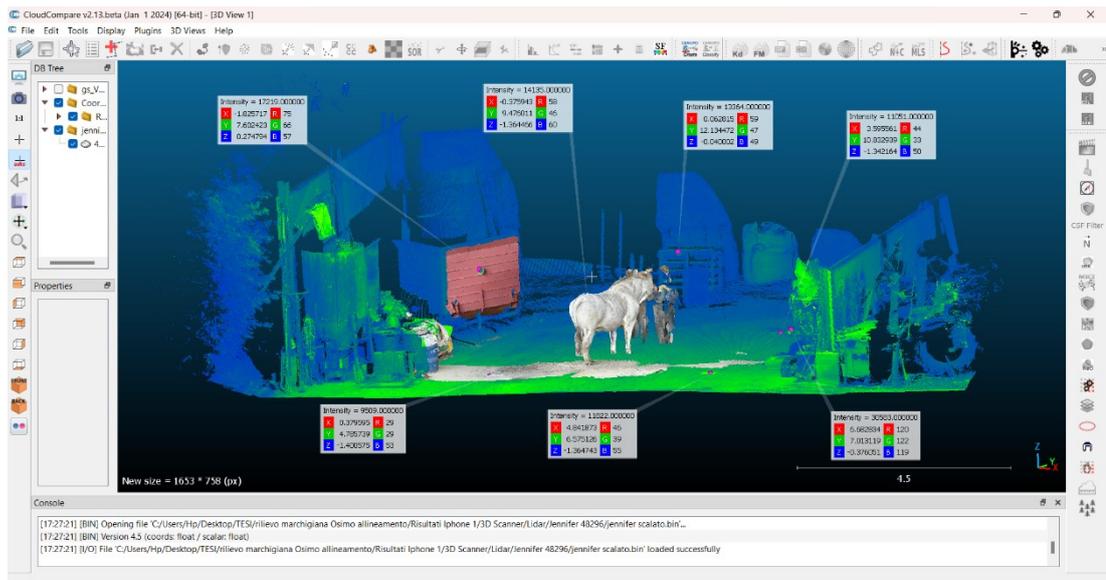


Figura 4.25 Ricostruzione 3D TLS e coordinate target



**Figura 4.26 allineamento rilievo Iphone e rilievo TLS**

### 4.2.3 Risultati modelli 3D

Dopo aver svolto le operazioni di scalatura mediante l'individuazione di almeno 3 target, usando Align tool in Cloudcompare, il modello è pronto per la visualizzazione del render 3D reale. Di seguito le Fig. 4.17 – 4.18 – 4.19 – 4.20 – 4.21 con l'anteprima estratta da CloudCompare dei modelli che meglio rappresentano senza troppi buchi e difetti costruttivi.



**Figura 4.16 Recon-3D fotogrammetria Olimpia**



*Figura 4.17 Recon-3D LiDAR Jennifer*



*Figura 4.18 NeRF Luma Jennifer*



*Figura 4.19 NeRF KIRI Gaia*



*Figura 4.3120 Gaussian Splatting KIRI Gaia*

## Capitolo 5

### DISCUSSIONI

Dati i risultati del nostro calcolo, in riferimento al caso studio della stalla, è necessario discutere i pro e i contro del metodo proposto. Innanzitutto, quando si tratta della documentazione del patrimonio culturale, l'obiettivo è di raggiungere un alto standard di risoluzione e accuratezza dei dettagli digitali secondo le rigide regole del progetto. Ci sono alcune differenze nell'architettura rurale. Infatti, agli stakeholder agricoli può essere fornita una metodologia per valutare gli spazi disponibili nei fienili per migliorare il benessere degli animali. Mentre, per quanto riguarda le fosse per il letame, è utile conoscere la stima dei rifiuti liquidi da smaltire in base al numero di animali nell'area di interesse. Queste considerazioni ci hanno permesso di stabilire quali metriche indagare, limitando l'accuratezza e il volume. Detto questo, è chiaro che i risultati ottenuti da SfM sono ancora superiori a quelli basati su AI e metodi generativi, come confermato da Balloni et al. (Balloni et al. 2023). Questo è dimostrato nella Tabella 4.1, dove sono state condotte analisi su CC, eseguendo il confronto C2M per l'analisi dell'accuratezza. Il valore di riferimento della stalla è pari a 4239,00 mc, mentre quella da NERF e GS è pari a 4445 mc e 4422 mc. La variazione in % simile tra i due modelli prodotti da AI pari a 4,86 % per la NERF e 4,32 % per la GS. Per quanto riguarda il letamaio, il valore di riferimento è pari a 740 mc, mentre quello NERF e GS sono 687 mc e 708 mc. La variazione in % risulta pari a -7,16 % per la NERF – UAV, mentre -4,32 % per la GS-UAV.

Le metodologie implementate e i risultati ottenuti ci permettono di presentare alcune considerazioni iniziali per gli stakeholder nel campo agricolo. La fase di acquisizione è fondamentale per qualsiasi indagine e influenza significativamente la qualità dei risultati. Vale la pena notare che il lavoro mira a valutare e analizzare i risultati delle opere agricole e architettoniche realizzate in condizioni difficili, con la presenza di bestiame e vegetazione ripariale che ostacola il rilevamento dettagliato nell'area di studio. In questo confronto, ci limitiamo a un confronto metrico dei modelli estratti basato sulla densità dei punti e sui loro dettagli e sulle piattaforme utilizzate per l'elaborazione dei modelli 3D. L'applicazione LumaAI consente di ottenere modelli fotorealistici in modo rapido e semplice senza necessariamente avere conoscenze tecniche o computer ad alte prestazioni, poiché

l'elaborazione dei dati avviene in remoto. Questo rappresenta sia un vantaggio, per la semplicità del workflow, sia una limitazione, poiché non consente la gestione personalizzata dei dati e la possibilità di intervenire durante le varie fasi del processo. Dai risultati ottenuti nella Tabella 4.1, eseguendo il confronto C2M, i valori di accuratezza dei modelli generati tramite GS sono migliori di quelli ottenuti con NERF. Infatti, l'accuratezza risulta in un RMS di 0,08 e 0,22. I modelli mostrano un dettaglio superiore nella densità dei punti e nella ricostruzione della forma della superficie.

Di conseguenza, anche i valori di volume si avvicinano al valore di riferimento, dettato da una modellazione più realistica della realtà, anche se la variazione di volume rispetto alle NERF è minimo. Al contrario, i risultati di NERF, con valori di 0,20 e 0,27, hanno presentato lacune costruttive, come oggetti che non coprono in realtà il tetto esistente del fienile o parti delle pareti della fossa per il letame. Questo ha causato un'ispezione visiva e la rimozione manuale degli oggetti che falsificavano i dati effettivi, causando una perdita di accuratezza anche nel valore del volume, come si vede nella Tabella 4.1.

In riferimento al secondo caso studio e quindi alla ricostruzione di bovini, il modello più accurato è quello ottenuto mediante NeRF Kiri Engine, un esempio in anteprima è in Fig. 4.20.

Come si può notare dal confronto visivo dei modelli in figura 4.17 – 4.18 – 4.19 – 4.20 – 4.21, il modello NeRF ottenuto con KIRI Engine mostra un livello di dettaglio significativo.

I modelli ottenuti con le altre tecniche o applicazioni, invece, mostrano delle nette difficoltà nel delineare dei margini definiti o nel creare una superficie fluida, continua e ricca di dettagli; mostrano molto spesso dei fori o delle aree mal ricostruite e alterate e, in alcuni casi, sono carenti di porzioni relativamente meno visibili come le zampe e la coda.

Tralasciando la zona della testa, che l'animale tende a muovere molto spesso, nel modello NeRF KIRI Engine si nota una conformazione del corpo ben definita, con margini netti e privi di fori. I colori sono ben marcati e sono apprezzabili i dettagli dell'animale come vene superficiali, coste e aree d'interesse zootecnico quali fosse del fianco e protuberanze del bacino. Anche zone più ardue da ricostruire come il garretto o gli unghioni mostrano un dettaglio non irrilevante. Più ardua è la rappresentazione della mammella così come il ventre dell'animale che, in tutti i modelli, appaiono solo accennati o mancanti. Questa difficoltà è probabilmente riconducibile all'impossibilità per l'operatore di avvicinarsi sufficientemente all'animale ed effettuare inquadrature più dettagliate della regione ventrale dell'animale, abbinata al livello di complessità anatomica della mammella.

Da questi modelli tridimensionali si estrarranno misure che saranno oggetto di confronto con quelle misurate manualmente per valutarne l'accuratezza. Nel fare ciò una problematica sarà quella della variabilità delle misure: le contrazioni dei muscoli pellicciani e scheletrici e le diverse posizioni acquisite dall'animale durante i vari rilievi, rendono meno accurati i modelli creando un errore nelle misure estratte rispetto alla realtà. Occorrerà, pertanto, valutare l'entità dell'errore e tenerne in considerazione evidenziando, però, come questo possa anche inficiare sulle misure manuali.

## CONCLUSIONI

In conclusione, questo studio presenta un approccio innovativo per l'inventario 3D in ambito agricolo che ha riguardato sia due strutture rurali comunemente presenti nelle aziende che praticano l'allevamento intensivo di bovini, che tre bovine adulte in fase riproduttiva. I risultati ottenuti da NERF e GS, utilizzando i dati di input da un rilevamento fotogrammetrico UAV per le strutture rurali, evidenziano l'importanza di scegliere attentamente l'approccio appropriato in base alle complessità del caso e ai dati metrici richiesti. Mentre i modelli ottenuti dalla scansione delle bovine presentano migliori risultati visivi sulle NERF ottenute da Kiri Engine rispetto a Luma Ai.

Questa ricerca ha l'obiettivo di contribuire agli sforzi in atto per migliorare la precisione e l'efficienza dei metodi di inventario agricolo mediante l'utilizzo di modelli 3D. In tal modo, si faciliterà la transizione verso un archivio digitale, volto alla conservazione e alla ricerca del patrimonio culturale dei paesaggi rurali. Inoltre, questi innovativi approcci consentiranno di semplificare la gestione degli allevamenti. Tali approcci rappresentano un significativo progresso rispetto alle metodologie di rilevamento digitale basate su SfM o Lidar, sebbene persistano alcune carenze, in particolare nella gestione degli errori.

Tuttavia, nel caso dei fabbricati rurali, essi garantiscono una resa volumetrica fotorealistica apprezzabile grazie al plugin Luma AI, che ne rende facile l'uso anche per il personale non specializzato in geomatica. Mentre per quanto riguarda le bovine l'indagine si è spinta nel definire quale modelli di AI e con quale App fosse in grado non solo di ricostruire nella sua interezza il modello 3d, ma anche quella che fornisce maggiori dettagli per facilitare poi la lettura manuale dei dati metrici sui singoli animali. L'unica app apprezzabile per il caso studio è Kiri Engine mediante il suo modello di NERF che produce un file mesh a alta risoluzione.

I potenziali sviluppi futuri di questa metodologia non si limitano agli artefatti rurali, ma includono anche la creazione di modelli 3D dettagliati degli animali. Ciò consentirà ai veterinari e agli agricoltori di monitorare con precisione la salute e lo sviluppo fisico, identificando tempestivamente anomalie o problemi di salute. Infatti, queste rappresentazioni volumetriche potrebbero essere utilizzate per mappare e analizzare gli spazi di allevamento, ottimizzare il layout delle strutture e la gestione delle risorse, e progettare ambienti più

efficienti e confortevoli per gli animali. Infine, l'implementazione del sensing di prossimità utilizzando NERF e GS consente la raccolta di dati dettagliati su ciascun animale, migliorando la tracciabilità lungo l'intera catena di produzione.

## BIBLIOGRAFIA

- AKIS, E. U. SCAR. 2019. "Preparing for Future AKIS in Europe." *Brussels, European Commission* 2(0):1.
- de Amorim, Wellyngton Silva, André Borchardt Deggau, Gabriéli do Livramento Gonçalves, Samara da Silva Neiva, Arun R. Prasath, and José Baltazar Salgueirinho Osório de Andrade Guerra. 2019. "Urban Challenges and Opportunities to Promote Sustainable Food Security through Smart Cities and the 4th Industrial Revolution." *Land Use Policy* 87:104065. doi: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104065>.
- Balloni, E., L. Gorgoglione, M. Paolanti, A. Mancini, and R. Pierdicca. 2023. "Few Shot Photogrammetry: A Comparison between Nerf and Mvs-Sfm for the Documentation of Cultural Heritage." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* 48(M-2-2023):155–62. doi: 10.5194/isprs-Archives-XLVIII-M-2-2023-155-2023.
- Basso, A., F. Condorelli, A. Giordano, S. Morena, and M. Perticarini. 2024. "Evolution of Rendering Based on Radiance Fields. The Palermo Case Study for a Comparison between Nerf and Gaussian Splatting." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* 48(2):57–64. doi: 10.5194/isprs-Archives-XLVIII-2-W4-2024-57-2024.
- Borchers, M. R., and J. M. Bewley. 2015. "An Assessment of Producer Precision Dairy Farming Technology Use, Prepurchase Considerations, and Usefulness." *Journal of Dairy Science* 98(6):4198–4205.
- Bramley, Rob G. V. 2009. "Lessons from Nearly 20 Years of Precision Agriculture Research, Development, and Adoption as a Guide to Its Appropriate Application." *Crop and Pasture Science* 60(3):197–217.
- Calders, Kim, Jennifer Adams, John Armston, Harm Bartholomeus, Sebastien Bauwens, Lisa Patrick Bentley, Jerome Chave, F. Mark Danson, Miro Demol, Mathias Disney, Rachel Gaulton, Sruthi M. Krishna Moorthy, Shaun R. Levick, Ninni Saarinen, Crystal Schaaf, Atticus Stovall, Louise Terry, Phil Wilkes, and Hans Verbeeck. 2020. "Terrestrial Laser Scanning in Forest Ecology: Expanding the Horizon." *Remote Sensing of Environment* 251:112102. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112102>.
- Chen, Guikun, and Wenguan Wang. 2024. "A Survey on 3d Gaussian Splatting." *ArXiv Preprint ArXiv:2401.03890*.

- Condorelli, Francesca, F. Rinaudo, F. Salvatore, and S. Tagliaventi. 2021. "A Comparison between 3D Reconstruction Using Nerf Neural Networks and Mvs Algorithms on Cultural Heritage Images." *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 43:565–70.
- Croce, Valeria, Dario Billi, Gabriella Caroti, Andrea Piemonte, Livio De Luca, and Philippe Véron. 2024. "Comparative Assessment of Neural Radiance Fields and Photogrammetry in Digital Heritage: Impact of Varying Image Conditions on 3D Reconstruction." *Remote Sensing* 16(2). doi: 10.3390/rs16020301.
- Eastwood, Callum, Laurens Klerkx, Margaret Ayre, and Brian Dela Rue. 2019. "Managing Socio-Ethical Challenges in the Development of Smart Farming: From a Fragmented to a Comprehensive Approach for Responsible Research and Innovation." *Journal of Agricultural and Environmental Ethics* 32(5):741–68.
- Edson, Curtis, and Michael G. Wing. 2011. *Airborne Light Detection and Ranging (LiDAR) for Individual Tree Stem Location, Height, and Biomass Measurements*. Vol. 3.
- Gao, Jing, and Bihu Wu. 2017. "Revitalizing Traditional Villages through Rural Tourism: A Case Study of Yuanjia Village, Shaanxi Province, China." *Tourism Management* 63:223–33.
- Gao, Kyle, Yina Gao, Hongjie He, Dening Lu, Linlin Xu, and Jonathan Li. 2022. "Nerf: Neural Radiance Field in 3d Vision, a Comprehensive Review." *ArXiv Preprint ArXiv:2210.00379*.
- Ge, Yingwei, Bingxuan Guo, Peishuai Zha, San Jiang, Ziyu Jiang, and Demin Li. 2024. "3D Reconstruction of Ancient Buildings Using UAV Images and Neural Radiation Field with Depth Supervision." *Remote Sensing* 16(3). doi: 10.3390/rs16030473.
- Girardeau-Montaut, Daniel. 2016. "CloudCompare." *France: EDF R&D Telecom ParisTech* 11.
- Guarnieri, Alberto, Fabio Remondino, and Antonio Vettore. 2006. "Digital Photogrammetry and TLS Data Fusion Applied to Cultural Heritage 3D Modeling." *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci* 36:1–6.
- Huang, Lvwen, Han Guo, Qinqin Rao, Zixia Hou, Shuqin Li, Shicheng Qiu, Xinyun Fan, and Hongyan Wang. 2019. "Body Dimension Measurements of Qinchuan Cattle with Transfer Learning from LiDAR Sensing." *Sensors* 19(22).
- Kerbl, Bernhard, Georgios Kopanas, Thomas Leimkühler, and George Drettakis. 2023. "3d Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering." *ACM Transactions on Graphics* 42(4):1–14.
- Kiri Engine Web. 2023. "KIRI Engine." Retrieved March 10, 2024 (<https://www.kiriengine.com/>).
- Klerkx, Laurens, Emma Jakku, and Pierre Labarthe. 2019. "A Review of Social Science on

- Digital Agriculture, Smart Farming and Agriculture 4.0: New Contributions and a Future Research Agenda.” *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* 90–91:100315. doi: <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>.
- LUMA AI. 2024. “Luma AI Inc. 2023.” Retrieved (<https://lumalabs.ai/>).
- Malarz, Dawid, Weronika Smolak, Jacek Tabor, Sławomir Tadeja, and Przemysław Spurek. 2023. “Gaussian Splitting Algorithm with Color and Opacity Depended on Viewing Direction.” *ArXiv Preprint ArXiv:2312.13729*.
- Mildenhall, Ben, Pratul P. Srinivasan, Matthew Tancik, Jonathan T. Barron, Ravi Ramamoorthi, and Ren Ng. 2021. “Nerf: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis.” *Communications of the ACM* 65(1):99–106.
- Müller, Thomas, Alex Evans, Christoph Schied, and Alexander Keller. 2022. “Instant Neural Graphics Primitives with a Multiresolution Hash Encoding.” *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 41(4):1–15.
- Murtiyoso, Arnadi, and Pierre Grussenmeyer. 2023. “Initial Assessment on the Use of State-of-the-Art NeRF Neural Network 3d Reconstruction for Heritage Documentation.” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 48:1113–18.
- Pepe, Massimiliano, Vincenzo S. Alfio, and Domenica Costantino. 2022. “UAV Platforms and the SfM-MVS Approach in the 3D Surveys and Modelling: A Review in the Cultural Heritage Field.” *Applied Sciences* 12(24).
- Recon-3d. 2023. “Recon-3d.” Retrieved March 10, 2024 (<https://www.recon-3d.com/>).
- Rose, David Christian, and Jason Chilvers. 2018. “Agriculture 4.0: Broadening Responsible Innovation in an Era of Smart Farming.” *Frontiers in Sustainable Food Systems* 2:87.
- Scholz, Roland W., Eric J. Bartelsman, Sarah Diefenbach, Lude Franke, Arnim Grunwald, Dirk Helbing, Richard Hill, Lorenz Hilty, Mattias Höjer, and Stefan Klauer. 2018. “Unintended Side Effects of the Digital Transition: European Scientists’ Messages from a Proposition-Based Expert Round Table.” *Sustainability* 10(6):2001.
- Schönberger, J. L., and J. M. Frahm. 2016. “Structure-from-Motion Revisited.” Pp. 4104–13 in *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.
- Shang, Liqiang, and Changming Wang. 2022. “Three-Dimensional Reconstruction and Protection of Mining Heritage Based on Lidar Remote Sensing and Deep Learning” edited by L. Sun. *Mobile Information Systems* 2022:2412394. doi: 10.1155/2022/2412394.
- Shepherd, Mark, James A. Turner, Bruce Small, and David Wheeler. 2020. “Priorities for Science to Overcome Hurdles Thwarting the Full Promise of the ‘Digital Agriculture’ Revolution.” *Journal of the Science of Food and Agriculture* 100(14):5083–92.

- Tang, Jiaxiang, Zhaoxi Chen, Xiaokang Chen, Tengfei Wang, Gang Zeng, and Ziwei Liu. 2024. "LGM: Large Multi-View Gaussian Model for High-Resolution 3D Content Creation." *ArXiv Preprint ArXiv:2402.05054*.
- Wolf, Steven, David Just, and David Zilberman. 2001. "Between Data and Decisions: The Organization of Agricultural Economic Information Systems." *Research Policy* 30(1):121–41.
- Beani Egle. (2019). *Produzione di cartografia tecnica in ambito comunale mediante l'utilizzo di droni*.
- Chin, S. (2019). *Sviluppo di modelli 3D di chiome di vite utilizzando la Structure from Motion per la stima di parametri biometrici e la ripartizione della biomassa*.
- Croce, V., Billi, D., Caroti, G., Piemonte, A., De Luca, L., & Véron, P. (2024). Comparative Assessment of Neural Radiance Fields and Photogrammetry in Digital Heritage: Impact of Varying Image Conditions on 3D Reconstruction. *Remote Sensing*, 16(2), 301.
- Fabio Bottazzo. (2014). *Applicazione della tecnologia LiDAR nell'analisi volumetrica di eventi di colate detritiche in ambiente alpino*.
- Ge, Y., Guo, B., Zha, P., Jiang, S., Jiang, Z., & Li, D. (2024). 3D Reconstruction of Ancient Buildings Using UAV Images and Neural Radiation Field with Depth Supervision. *Remote Sensing*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/rs16030473>
- Gené Mola, J. (2020). *Fruit detection and 3D location using optical sensors and computer vision*. Universitat de Lleida.
- Los, S., Mücher, C. A., Kramer, H., Franke, G. J., & Kamphuis, C. (2023). Estimating body dimensions and weight of cattle on pasture with 3D models from UAV imagery. *Smart Agricultural Technology*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100167>
- Mehedi, I. M., Hanif, M. S., Bilal, M., Vellingiri, M. T., & Palaniswamy, T. (2024). Remote Sensing and Decision Support System Applications in Precision Agriculture: Challenges and Possibilities. *IEEE Access*, 12, 44786–44798. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3380830>
- Milan Nicola. (2012). *Comparazione di differenti tecniche di acquisizione dati per la produzione di DTM per modelli idrogeologici*.
- Rinaudo Fulvio. (2003). *La tecnica laser scanning: applicazioni architettoniche e urbanistiche*.
- Sartini Matteo. (2021). *Tecnologie geomatiche integrate per l'acquisizione e modellazione di monasteri post -bizantini in Albania meridionale*.

Yang, G., Xu, X., Song, L., Zhang, Q., Duan, Y., & Song, H. (2022). *Automated measurement of dairy cows body size via 3D point cloud data analysis*.  
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107218>