



CONVENZIONE PER L'ATTUAZIONE DEL PROGETTO DI RICERCA:

“METODI INNOVATIVI PER LA STIMA DEL VOLUME LEGNOSO RITRAIBILE DAI TAGLI BOSCHIVI IN PUGLIA”

Convenzione stipulata in data 17/04/2020, fra:

- Regione Puglia - Sezione Gestione Sostenibile e Tutela delle Risorse Forestali e Naturali;
- Dipartimento di Scienze Agro - Ambientali e Territoriali (DiSAAT) dell'Università degli Studi di Bari. Gruppo di ricerca in Assestamento forestale e Dendrometria.

RELAZIONE FINALE SULL'ATTIVITÀ DI RICERCA

Premessa

Il progetto di ricerca ha come obiettivo la predisposizione di una metodologia per la stima della massa legnosa ritraibile dai tagli boschivi in Puglia, utilizzando tecniche di elaborazione fotogrammetrica su immagini acquisite in aree di saggio.

Tale metodologia ha come obiettivo quello di migliorare le procedure di stima dei parametri dendrometrici da rilevare in aree campione opportunamente prescelte e quindi di costituire un importante supporto ai tecnici forestali incaricati della progettazione di interventi in ambito boschivo e per il personale degli uffici competenti della Regione Puglia, incaricati di effettuare le attività di controllo e di monitoraggio.

Si tratta, inoltre, di migliorare e oggettivizzare le stime dei materiali legnosi ritraibili o derivanti dagli interventi selvicolturali.

Il cronoprogramma delle attività da svolgere, riportato nella *Relazione descrittiva* allegata alla convenzione, ha previsto lo svolgimento delle fasi di seguito elencate, con indicazione delle tempistiche di riferimento.

- Fase 1: Ricognizione delle problematiche inerenti la tematica (2 mesi);
- Fase 2: Rilievi dendrometrici e fotogrammetrici in un congruo numero di aree di saggio di dimensioni idonee in relazione alla densità del popolamento, in boschi campione caratterizzati da differenti tipologie forestali (6 mesi);
- Fase 3: Elaborazione dei dati e stima del volume legnoso presente e prelevabile (3 mesi);
- Fase 4: Divulgazione dei risultati ottenuti (1 mese).

Introduzione

I metodi in uso per la stima del volume degli alberi (N) da prelevare con gli interventi selvicolturali in aree boscate di varie tipologie sono basati sull'applicazione della seguente formula.



$$V = G \times H \times F$$

Vale a dire il prodotto fra l'area basimetrica (G) degli N alberi, l'altezza media degli stessi (H) e il coefficiente di riduzione (F). G viene stimato come somma delle aree basimetriche dei singoli alberi, H attraverso la costruzione della curva ipsometrica o come media delle altezze di un congruo numero di alberi di diametro medio, F può essere stimato applicando studi pregressi (Tavole stereometriche) o direttamente, previo abbattimento di un limitato numero di alberi modello. La stima di quest'ultimo parametro è affetta da un rilevante grado di incertezza che rende i metodi indicati poco affidabili.

I tecnici rilevatori devono quindi avere una notevole competenza nell'utilizzo della strumentazione necessaria che comporta tempi di rilievo anche importanti; non trascurabile è inoltre la notevole soggettività di ogni fase del rilievo dei dati in campo.

Attualmente in Puglia sono state elaborate un numero molto limitato di tavole stereometriche, vale a dire quelle relative al Faggio e al Cerro del Gargano e del Pino d'Aleppo dei rimboschimenti dell'Alta Murgia.

Si pone quindi il problema di individuare metodologie di rilievo dei dati in campo e di successive elaborazioni che ne riducano i tempi e i costi, aumentandone i livelli di oggettività al fine di ottenere delle stime dei parametri dendrometrici e dei volumi le più accurate possibili a costi relativamente contenuti. Tutto questo anche al fine di rendere più immediati i controlli da parte delle autorità competenti.

Nell'ultimo ventennio nel campo forestale sono state sviluppate nuove tecniche di rilievo e metodologie per la stima dei parametri biometrici e per la determinazione del volume degli alberi in piedi basate sull'acquisizione di dati tridimensionali (Point cloud). Si tratta di procedure connesse al Remote sensing (Airborne laser scanning - ALS; Terrestrial laser scanning - TLS; Mobile laser scanning - MLS; Personal laser scanning - PLS) che prevedono l'utilizzo di sensori attivi del tipo Light detection and ranging (LiDAR) e Laser Scanner. Queste applicazioni, basate sull'utilizzo dei sistemi LiDAR, sono state sviluppate (Lim, 2003) parallelamente ai progressi dei Sistemi di Posizionamento Globale (GPS) e a quelli di navigazione inerziale (INS).

Le numerose ricerche condotte nel tempo hanno evidenziato, però, che i sistemi ALS, cioè quelli che prevedono il montaggio dei Laser scanner su aerei, elicotteri o droni, sono generalmente inadatti (Gollob et al., 2020) a derivare informazioni accurate e dettagliate riguardanti i singoli alberi, come ad esempio la posizione dell'albero e il "diameter at breast height" (dbh), in quanto i fusti vengono ricostruiti nelle nuvole di punti solo parzialmente.



I sistemi Laser Scanner Terrestri (TLS), invece, consentono attualmente (Piermattei et al., 2019) di acquisire i point cloud più accurati per la stima dei parametri d'interesse dendrometrico. Si tratta però di strumentazione molto costosa, vincolata a tempi di rilievo e di elaborazione dati molto lunghi e personale tecnico altamente qualificato.

Recentemente sono stati proposti in ambito forestale approcci alternativi all'utilizzo dei TLS, riguardanti l'impiego (Chen, 2019) di Sistemi Mobile Laser Scanning (MLS), Personal Laser Scanning (PLS).

Parallelamente in ambito forestale sono stati proposti (Trochta et al., 2017) numerosi algoritmi, implementati anche in software Open source, che consentono di ottenere dai point cloud i valori di alcuni parametri d'interesse dendrometrico. Il funzionamento di questi algoritmi si basa (Raumonon, 2015) principalmente sul riconoscimento e sulla ricostruzione (segmentation) dei singoli elementi arborei di un popolamento forestale, compreso in plot o in aree di studio.

Ancora più recenti sono i sistemi di generazione ed elaborazione dei point cloud in ambiente forestale basati sull'utilizzo di tecniche fotogrammetriche (Iglhaut, 2019), con gli algoritmi della Structure from Motion (SfM).

Il Gruppo di ricerca in Assestamento forestale e Dendrometria, coordinato dalla scrivente, ha da anni intrapreso l'esplorazione di queste ultime nuove tecniche di rilievo e di elaborazione dei dati (Marzulli et al., 2020).

Attività svolte per l'attuazione della ricerca fino ad aprile 2021

Fase 1

Durante questa fase è stata analizzata la tematica oggetto del progetto di ricerca, effettuando un'approfondita ricerca bibliografica sugli studi condotti dalla comunità scientifica al riguardo:

- dell'utilizzo di sistemi Laser scanner terrestri per la ricostruzione tridimensionale di popolamenti forestali;
- dell'impiego di tecniche di elaborazione fotogrammetrica, basate sulla computer vision e sull'utilizzo degli algoritmi della Structure from Motion (Piermattei et al., l.c.), impiegate per la ricostruzione tridimensionale di popolamenti forestali;
- dell'impiego di metodologie per l'elaborazione dei point cloud, finalizzate alla stima di parametri dendrometrici e dei volumi legnosi dei popolamenti forestali.

Per quanto riguarda gli aspetti fotogrammetrici (computer vision) sono stati consultati i contributi scientifici pubblicati all'incirca nell'ultimo decennio. Le prime ricerche relative

all'utilizzo di queste tecniche di elaborazione in ambito forestale sono infatti relativamente recenti (Dandois, 2010).

Gli articoli scientifici di riferimento sono elencati nella Bibliografia consultata.

In questa fase sono stati inoltre individuati i software open source attualmente disponibili per l'elaborazione dei point cloud riferiti a popolamenti forestali. Tali software consentono di determinare i valori di alcuni parametri dendrometrici e di stimare i volumi legnosi.

I link dei software di riferimento sono i seguenti:

- <https://www.3dforest.eu/> (3D FOREST)
- <http://gis.tuzvo.sk/dendrocloud/> (DendroCloud)

Fase 2

Durante questa fase sono state individuate n. 3 aree di studio nell'ambito del rimboschimento di conifere mediterranee di Mercadante, di proprietà regionale (Figura n. 1).

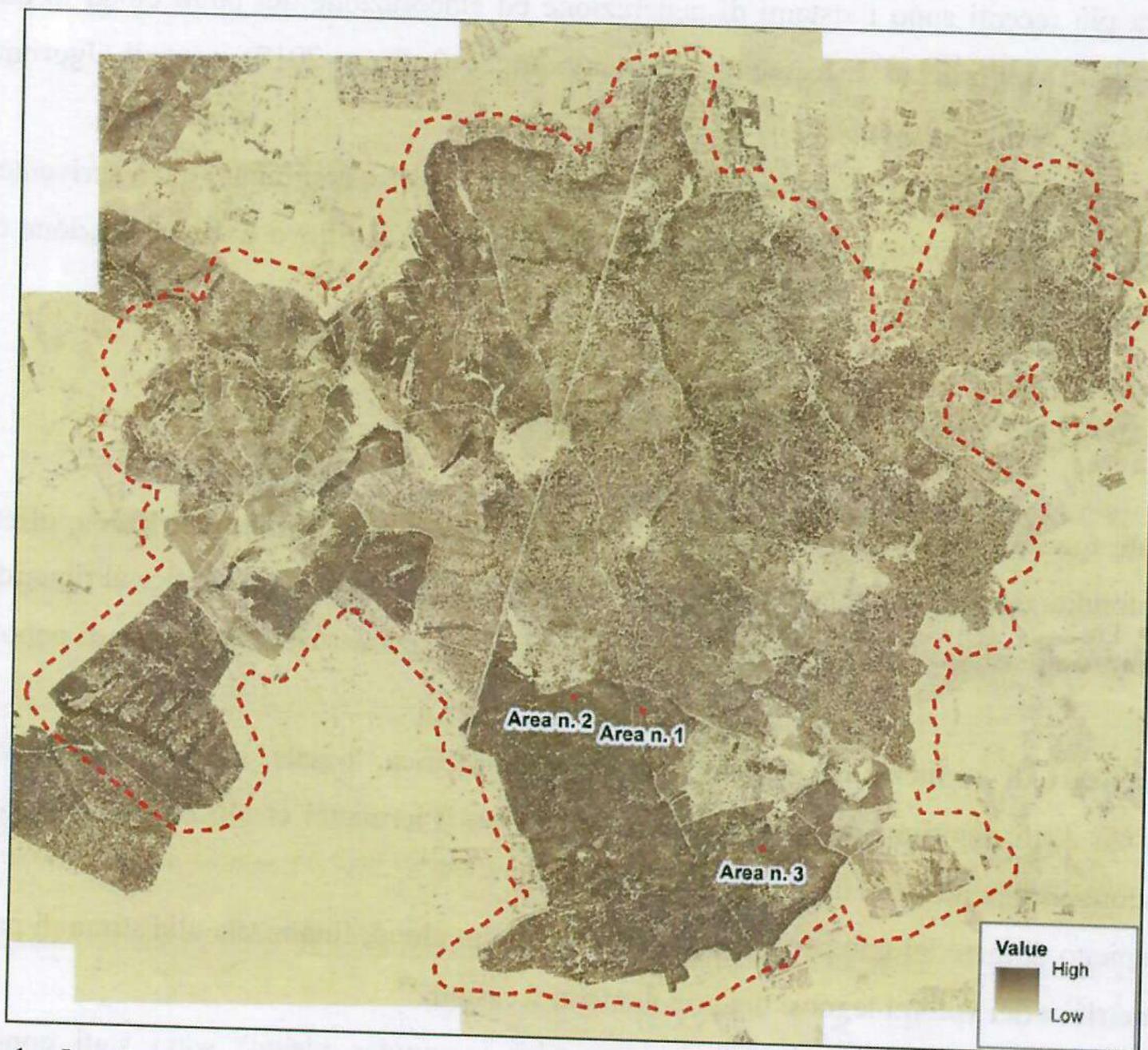


Figura n. 1 - Localizzazione delle n. 3 aree di studio nell'ambito del rimboschimento di conifere mediterranee di "Mercadante". Lo strato informativo di base è costituito dal Digital Surface Model (DSM), ottenuto con rilievo aereo



Laser Scanner (Base cartografica: Ministero dell'Ambiente - Geoportale nazionale).

Le aree n. 1 e n. 3 corrispondono ad aree di studio precedentemente individuate dal gruppo di ricerca in Assestamento forestale e Dendrometria per lo svolgimento di attività di monitoraggio nell'ambito degli *Studi di Pianificazione assestamentale dei boschi di proprietà della Regione Puglia gestiti dall'ARIF Puglia*.

Le aree, di forma quadrata e della superficie di 900 m² (30 m x 30 m), sono state individuate in popolamenti arborei caratterizzata da differente densità e con un grado di copertura del popolamento arbustivo variabile (Foto n. 1, 2 e 3).

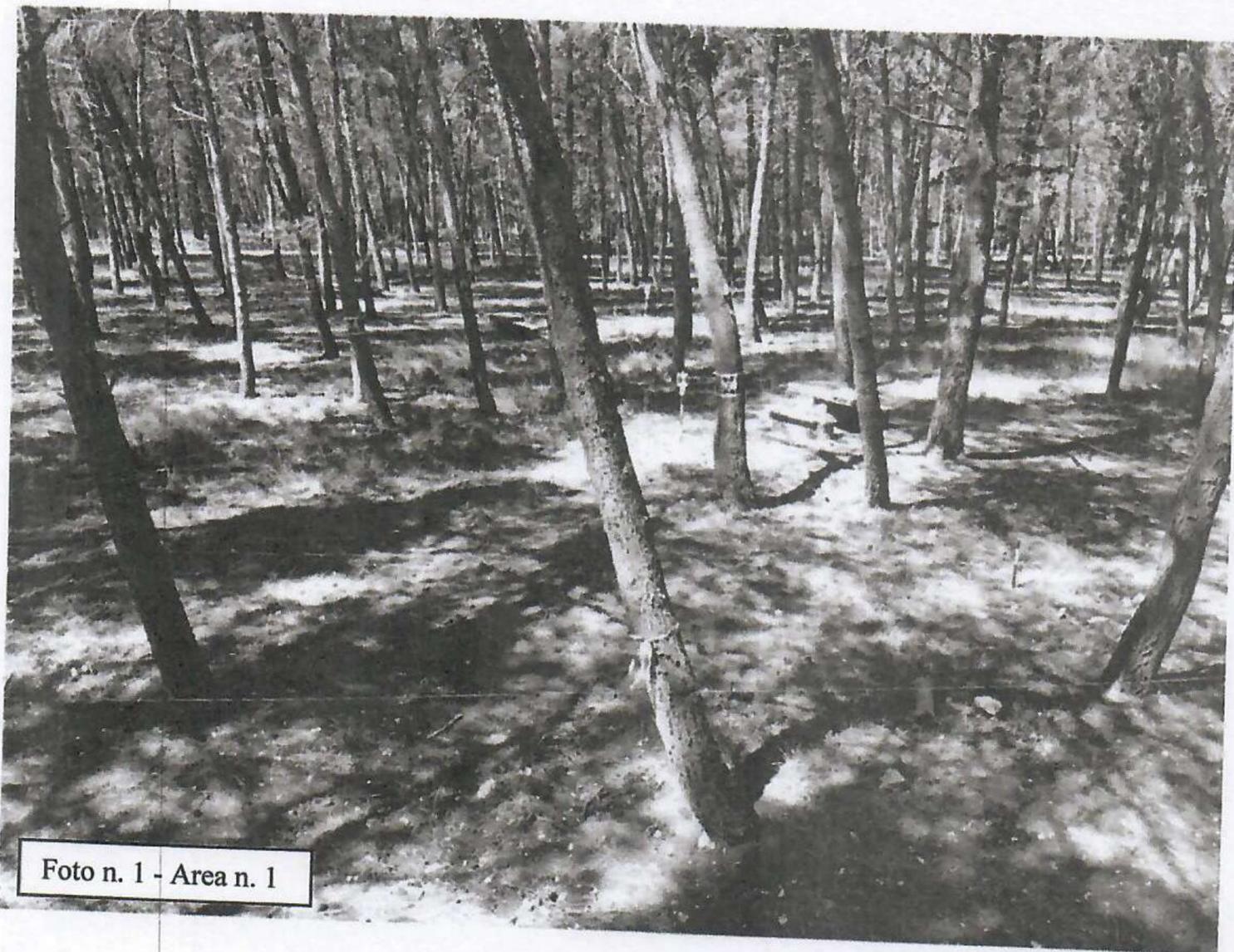


Foto n. 1 - Area n. 1





In tali aree sono state effettuate le seguenti attività:

- rilievi biometrici, con strumenti dendrometrici;
- rilievi fotogrammetrici. In particolare questa attività è stata preceduta da una fase di preparazione del sito con disposizione di target e di marker sugli alberi.

Le attività delineate sono state effettuate durante la fase emergenziale del Covid 19. Ciò non ha consentito di individuare ulteriori aree di studio nelle altre tipologie di bosco previste dal progetto vista l'impossibilità di effettuare operazioni in campo in sicurezza, in relazione:

- alla circolazione fuori provincia;
- alla necessità di coinvolgere operatori per lo svolgimento delle attività di preparazione dei siti per i rilievi fotogrammetrici e per quelli biometrici.

I dettagli tecnici-operativi dei rilievi fotogrammetrici effettuati sono in fase di pubblicazione su rivista scientifica, per cui saranno esplicitati subito dopo la pubblicazione dell'articolo.

I popolamenti forestali sono stati preliminarmente esaminati elaborando i point cloud derivanti da rilievi effettuati nelle n. 3 aree di studio con un Manual Laser Scanner. L'utilizzo di questo tipo di strumentazione in ambito forestale è stato oggetto di sperimentazione nell'ambito di specifici progetti di ricerca (Chen et al., 2019; Gollob et al., 2020).

L'analisi preliminare dei dati così rilevati, effettuata in collaborazione con il dr. Emanuele Barca (Statistico dell'IRSA-CNR di Bari) ha avuto l'obiettivo di valutare la variabilità del *diameter at breast height* (dbh) - diametro a 1,30 m da terra - nei popolamenti interessati al fine di dimensionare il campione di riferimento per le operazioni di validazione dei risultati delle elaborazioni fotogrammetriche.

Rilievi Laser scanner

Il rilievo è stato effettuato con un Mobile Laser Scanner Zeb Horizon della GeoSlam (Foto n. 4), in collaborazione con la Crisel srl. Le specifiche tecniche del MLS sono riportate nella tabella n. 1.

L'acquisizione dei dati con il MLS (Foto n. 4 e 5) è stata effettuata muovendosi inizialmente all'esterno del perimetro dell'area e successivamente all'interno della stessa, seguendo lo schema riportato nella Figura n. 2.

I dati acquisiti sono stati elaborati con il software Open-source 3DForest. Il funzionamento del software si basa su uno specifico algoritmo messo a punto da un gruppo di ricerca della Repubblica Ceca (Trochta et al., l.c.) del Department of Forest Ecology of The Silva Tarouca Research Institute - Department of Geoinformation Technologies of Mendel University in Brno.



Il software 3D Forest consente di ottenere dai dati laser scanner alcuni parametri riguardanti i singoli elementi arborei, quali: posizione dell'albero, altezza dendrometrica, diametro a 1,30 m da terra, volume, ecc.

Range	100m (features <40m)
Protection class	IP54
Processing	Post
Data logger carrier	Backpack
Scanner weight	1.3kg
Colourised point cloud	✓ Improved
Intensity	✓
Referenced imagery	✓
Scanner points per second	300,000
No. of sensors	16
Automated scanner start	✓
UAV compatibility	High
360° camera compatible	✓
Relative accuracy	1 - 3cm
Raw data file size	100-200MB a minute

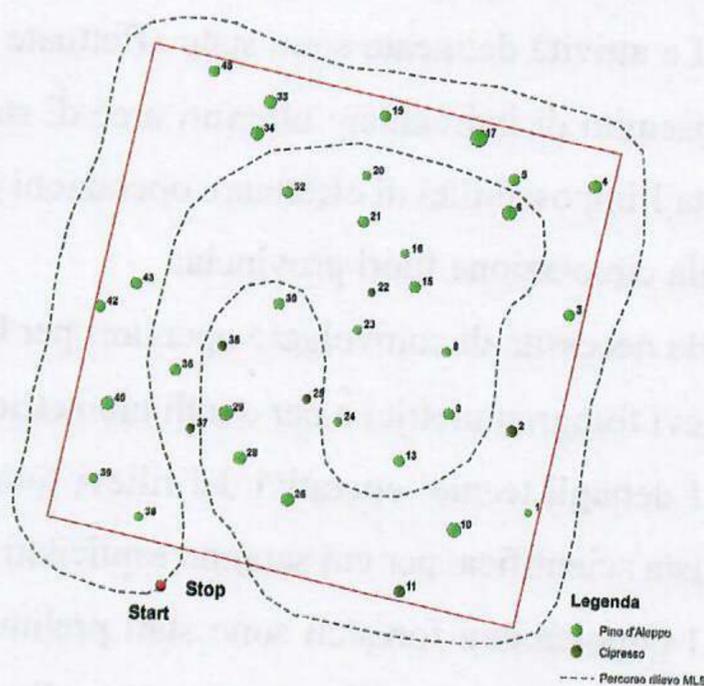


Tabella n. 1- Technical specification of Zeb Horizon.



Figura n. 2 - Schema di rilievo con MLS.



Foto n. 4 e 5 - Il Mobile Laser Scanner (Zeb Horizon - GeoSlam) utilizzato durante i rilievi.



Il processo di elaborazione con 3D Forest (3D Forest workflow) prevede che la nuvola di punti acquisita con il MLS (Base cloud) venga separata in due parti: Terrain cloud e Vegetation cloud.

Il passo successivo consiste nella segmentazione dei singoli alberi a partire dal Vegetation cloud.

A ogni elemento arboreo corrisponderà quindi un singolo point cloud dal quale sarà possibile ottenere una serie di parametri di interesse forestale.

I risultati delle elaborazioni effettuate nell'area di studio n. 2 sono riportati, a titolo di esempio, nelle seguenti rappresentazioni grafiche e nella tabella n. 2.

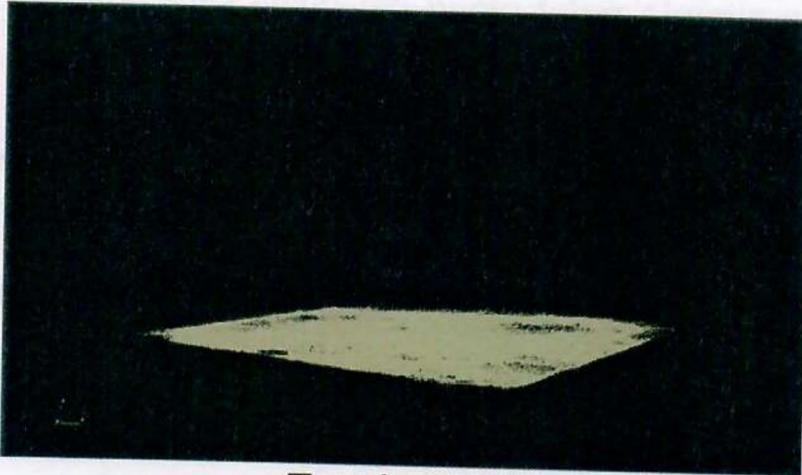
Questa procedura ha consentito di calcolare il coefficiente di variazione (CV) relativo ai parametri dimensionali del popolamento presente nell'area di studio e quindi di dimensionare il campione di riferimento per la validazione del point cloud fotogrammetrico.

Nell'area n. 2 sono stati così individuati n. 22 elementi arborei sui quali sono stati rilevati in campo due diametri ortogonali del fusto (il primo orientato a Nord) e la circonferenza a differenti altezze da terra, a 1,30, 2,00 e 4,00 m. Queste sezioni sono state materializzate in campo con l'apposizione di marker costituiti da nastro adesivo di colore bianco.

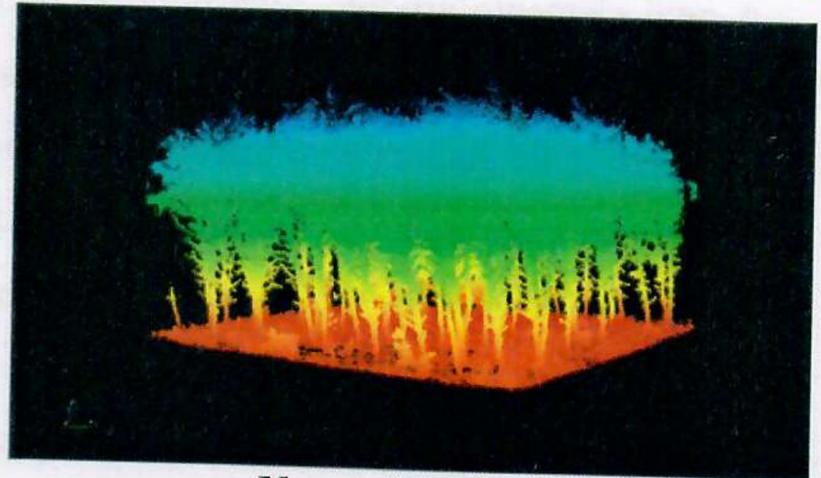
Sono stati quindi eseguiti rilievi fotogrammetrici con strumentazione adeguata, di cui si è riferito in fase di presentazione a rivista scientifica internazionale.



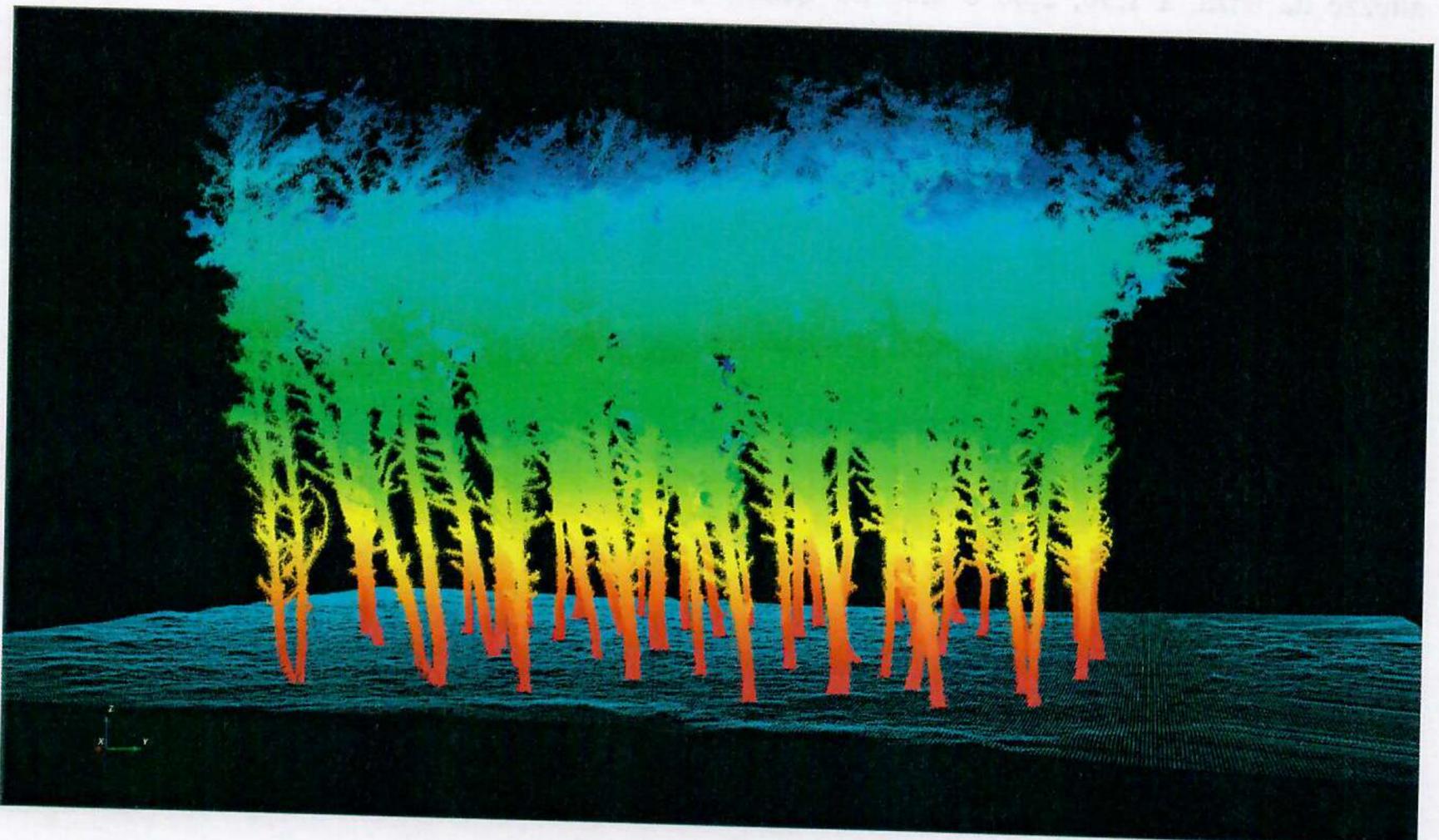
3D Forest workflow nell'area di studio n. 2



Terrain cloud



Vegetation cloud



Risultati della procedura di segmentazione



Cloud_name	Albero n.	Specie	X_coord_pos	Y_coord_pos	Z_coord_pos	DBH_LSR cm
ID69.pcd	1	P. d'Aleppo	2.944.440	1.056.491	447.660	21,54
ID61.pcd	2	P. d'Aleppo	2.941.959	1.056.006	447.558	21,66
ID25.pcd	3	P. d'Aleppo	2.937.666	1.057.562	447.493	26,81
ID35.pcd	4	P. d'Aleppo	2.932.054	1.057.834	447.350	36,74
ID85.pcd	5	P. d'Aleppo	2.926.320	1.057.027	447.238	34,64
ID4.pcd	6	Cipresso	2.918.823	1.057.292	446.909	15,51
ID16.pcd	7	P. d'Aleppo	2.920.525	1.055.030	446.961	22,68
ID8.pcd	8	P. d'Aleppo	2.919.061	1.051.178	446.928	26,79
ID63.pcd	9	P. d'Aleppo	2.923.225	1.050.611	447.058	22,29
ID13.pcd	10	P. d'Aleppo	2.925.591	1.053.065	447.150	25,47
ID72.pcd	11	P. d'Aleppo	2.930.067	1.051.066	447.267	36,88
ID93.pcd	12	P. d'Aleppo	2.931.356	1.055.394	447.253	27,04
Albero_13.pcd	13	P. d'Aleppo	2.932.814	1.052.358	447.351	22,15
Albero_14.pcd	14	P. d'Aleppo	2.932.822	1.051.819	447.316	33,17
ID11.pcd	15	P. d'Aleppo	2.936.558	1.049.566	447.435	34,79
ID26.pcd	16	P. d'Aleppo	2.939.333	1.051.399	447.449	20,05
ID60.pcd	17	P. d'Aleppo	2.942.285	1.052.776	447.579	27,22
ID64.pcd	18	P. d'Aleppo	2.945.576	1.053.925	447.679	25,44
ID86.pcd	19	P. d'Aleppo	2.944.422	1.050.853	447.748	39,98
ID9.pcd	20	P. d'Aleppo	2.946.325	1.048.642	447.688	26,05
ID70.pcd	21	P. d'Aleppo	2.943.240	1.044.030	447.620	34,36
ID53.pcd	22	P. d'Aleppo	2.941.312	1.045.672	447.551	21,34
ID14.pcd	23	P. d'Aleppo	2.938.668	1.048.049	447.454	25,16
ID67.pcd	24	P. d'Aleppo	2.935.498	1.042.332	447.461	46,14
ID47.pcd	25	P. d'Aleppo	2.928.965	1.042.708	447.212	34,82
ID59.pcd	26	P. d'Aleppo	2.927.789	1.045.807	447.130	33,11
ID78.pcd	27	P. d'Aleppo	2.922.606	1.045.463	446.965	33,64
ID73.pcd	28	P. d'Aleppo	2.919.322	1.048.460	446.949	35,88
ID57.pcd	29	P. d'Aleppo	2.923.018	1.042.437	446.930	22,07
ID32.pcd	30	P. d'Aleppo	2.926.410	1.040.478	447.106	26,84
ID41.pcd	31	Cipresso	2.921.010	1.036.647	446.895	19,86
ID79.pcd	32	P. d'Aleppo	2.924.343	1.034.960	447.180	47,40
ID36.pcd	33	P. d'Aleppo	2.928.461	1.033.990	447.243	37,20
Albero_34.pcd	34	P. d'Aleppo	2.929.854	1.038.835	447.219	30,96
ID90.pcd	35	P. d'Aleppo	2.933.100	1.037.391	447.342	25,11
ID43.pcd	36	P. d'Aleppo	2.932.023	1.032.974	447.318	21,40
ID62.pcd	37	P. d'Aleppo	2.934.965	1.030.134	447.526	42,17
ID91.pcd	38	P. d'Aleppo	2.936.909	1.036.605	447.489	30,67
ID75.pcd	39	P. d'Aleppo	2.938.000	1.032.167	447.559	25,43
ID54.pcd	40	P. d'Aleppo	2.939.416	1.037.438	447.553	31,40
ID82.pcd	41	P. d'Aleppo	2.938.548	1.041.054	447.521	23,90
ID34.pcd	42	P. d'Aleppo	2.942.010	1.039.602	447.651	26,43
Albero_43.pcd	43	P. d'Aleppo	2.946.615	1.041.818	447.684	24,00
Albero_44.pcd	44	P. d'Aleppo	2.946.843	1.039.170	447.777	33,85
Albero_45.pcd	45	P. d'Aleppo	2.946.632	1.038.672	447.785	26,98
Albero_46.pcd	46	P. d'Aleppo	2.948.066	1.035.160	447.839	22,31
Albero_47.pcd	47	P. d'Aleppo	2.948.594	1.035.092	447.942	24,63

Tabella n. 2 - Dati relativi ai n. 47 alberi segmentati nell'area di studio n. 2.

Nella tabella sono riportate per ogni albero le coordinate (X, Y e Z), corrispondenti al centro della base dell'albero, nonché il valore del diametro a 1,30 m da terra (dbh), stimato considerando (Trochta et al., l.c.) un sottoinsieme della nuvola di punti corrispondente a una sezione compresa fra 1,25 e 1,35 m da terra.



Fase 3

In questa fase sono state effettuate le elaborazioni fotogrammetriche con le immagini acquisite nelle aree di studio.

Il software utilizzato è Pix4D Mapper.

Esso implementa un flusso di lavoro automatizzato per immagini terrestri, acquisite con fotocamere, o aeree, scattate con aeromobili a pilotaggio remoto (APR).

Una dettagliata descrizione del flusso di lavoro in Pix4D Mapper è riportata nello studio di Küng et al. (2011) e, più in generale, in quello di Iglhaut (2019).

La figura n. 3 rappresenta la ricostruzione tridimensionale del popolamento arboreo dell'area di studio n. 2. Dopo l'elaborazione fotogrammetrica i point cloud elaborati sono stati esportati in formato .LAS.



Figura n. 3 - Ricostruzione tridimensionale del popolamento arboreo dell'area n.2.

Nella figura n. 4 sono riportate le ricostruzioni tridimensionali di uno stesso albero del campione di riferimento, ottenute utilizzando diverse combinazioni di parametri nel software Pix4D e livelli di densificazione crescenti della nuvola di punti.



Nella figura sono ben visibili i marker posizionati a diverse altezze sugli elementi arborei che costituiscono il campione di riferimento per la validazione della metodologia proposta.

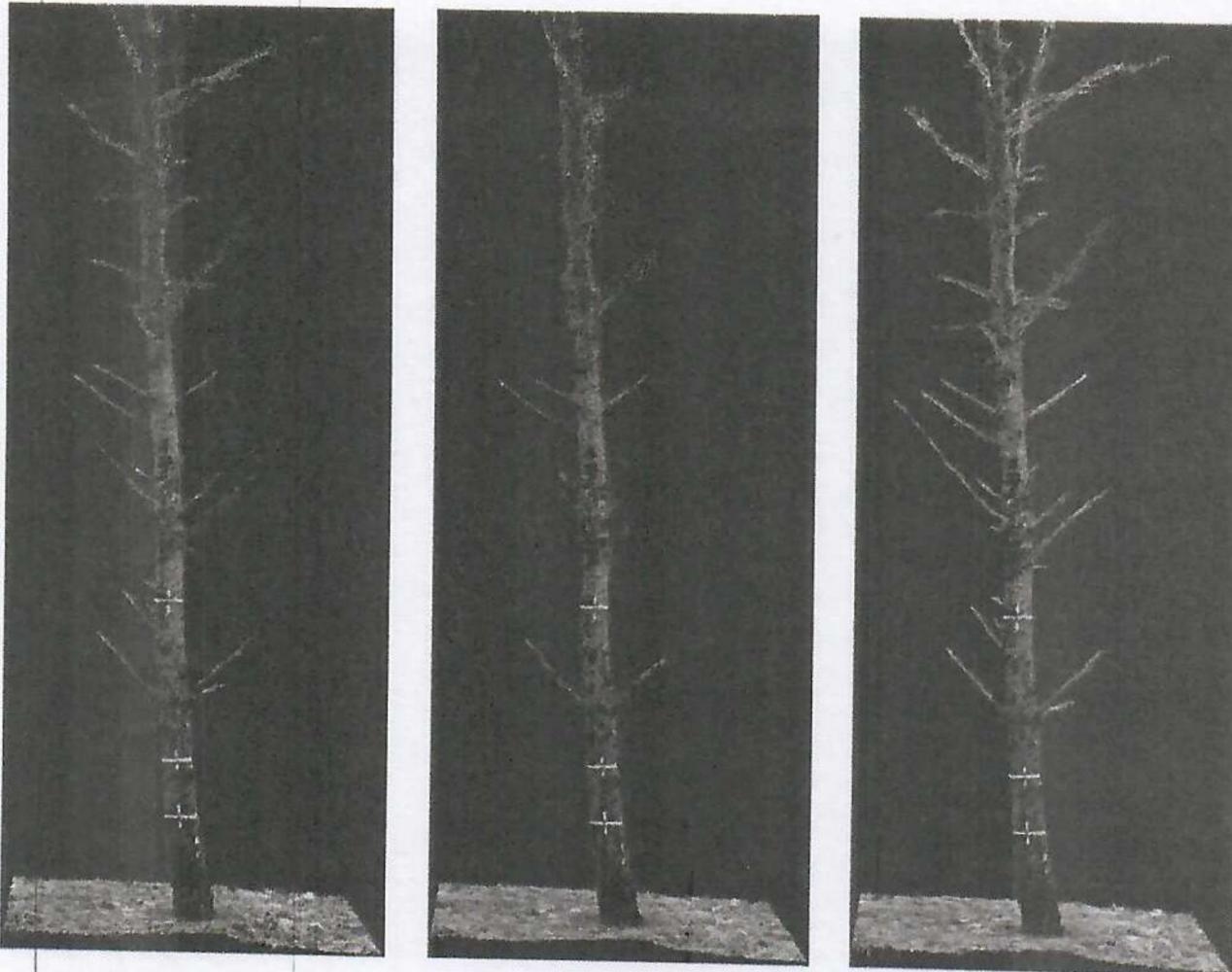


Figura n. 4

I tempi di rilievo delle immagini utilizzate per l'elaborazione fotogrammetrica variano fra 20 e 30 minuti, mentre la tempistica necessaria per preparare l'area di studio (identificazione del perimetro, distribuzione dei Manual Tie Point e definizione delle direzioni per l'acquisizione delle immagini) varia fra 60 e 80 minuti.

I tempi di elaborazione fotogrammetrica, effettuate con un PC con processore Intel i7 (32GB di Ram), sono variabili fra 2 e 7 ore, in relazione al numero di immagini selezionate.

I point cloud ottenuti sono compatibili con il software Open-source 3DForest, precedentemente descritto, i cui algoritmi consentono di effettuare le seguenti operazioni (Trochta et al., l.c.):

- distinzione del point cloud di riferimento in *Terrain cloud* e *Vegetation cloud*;
- segmentazione del *Vegetation cloud* nei singoli elementi arborei che costituiscono il popolamento rilevato;
- stima del valore dei seguenti parametri d'interesse dendrometrico:
 - *Tree position*, con identificazione delle coordinate X, Y e Z relative alla base di ciascun elemento arboreo;

- *Diameters at Breast Height (DBH)*, corrispondente al diametro a 1,30 m da terra;
- *Tree Height (TH)*, definita come la differenza fra il punto più alto della nuvola di punti dell'albero e la posizione di base dello stesso;
- *Volume dei singoli alberi*, in relazione alla porzione di fusto ricostruita tridimensionalmente.

Il software ha consentito, inoltre, di stimare ulteriori parametri riguardanti l'inclinazione degli alberi e il volume delle loro chiome.

Il prodotto finale di questa attività di ricerca è una metodologia innovativa di rilievo per la stima dei parametri dendrometrici e dei volumi degli alberi in piedi che consente di generare, con tempi contenuti e quindi costi moderati, ricostruzioni tridimensionali compatibili con software open source. Tali software fin'ora sono stati esclusivamente utilizzati per l'elaborazione, in campo forestale, di nuvole di punti derivanti da rilievi con sensori attivi (Laser scanner).

Tutti i dettagli relativi alle procedure di elaborazione fotogrammetrica e alla procedura di acquisizione delle immagini sono esplicitati nell'articolo in fase di pubblicazione su rivista scientifica internazionale.

Si evidenzia al riguardo che nello stesso articolo viene citata la fonte del finanziamento e il progetto di ricerca specifico.

A completamento dell'attività di ricerca condotta è stato effettuato un ulteriore studio che ha consentito di testare le potenzialità del sistema di elaborazione fotogrammetrico per generare ortomosaici georeferenziati a partire da foto aeree storiche.

Le immagini aeree d'archivio sono elementi essenziali per lo studio delle comunità forestali in relazione all'esame delle forme di gestione attuali e pregresse, il cui risultato è correlato all'accrescimento degli alberi presenti, considerati singolarmente o in gruppo, nonché dell'evoluzione del paesaggio nell'ambito della pianificazione e gestione del territorio.

La metodologia proposta, basata sull'introduzione dell'approccio geostatistico, prevede la spazializzazione degli errori nell'ambito della procedura di ortorettifica e della mosaicatura delle foto aeree.

L'area di indagine prescelta è quella della parte occidentale del Parco regionale Terra della Gravine che presenta una grande variabilità morfologica e vegetazionale.

I risultati dell'attività di ricerca sono contenuti nel seguente articolo scientifico:

Persia M., Barca E., Greco R., Marzulli M.I., Tartarino P. – 2020; *Archival Aerial Images Georeferencing: a Geostatistically-Based Approach for Improving Orthophoto Accuracy with*



Minimal Number of Ground Control Points. Remote Sens. 2020, 12, 2232;
doi:10.3390/rs12142232.

Bari, ottobre 2021

Il Responsabile scientifico
Prof. Patrizia Tartarino

Bibliografia consultata

- Akpo H.A., Atindogbé G., Obiakara M.C., Gbedolo M.A., Laly F.G., Lejeune P., Fonton N.H., 2020 - Accuracy of tree stem circumference estimation using close range photogrammetry: does point-based stem disk thickness matter ? *Trees, Forests and People* 2 (2020) 100019. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2020.100019>
- Alidoost F., Arefi, H., 2017 - Comparison of Uas-Based Photogrammetry Software for 3d Point Cloud Generation: A Survey over a Historical Site. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-4/W4, 55-61. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-55-2017>
- Bauwens S., Fayolle A., Gourlet-Fleury S., Ndjele L.M., Mengal C., Lejeune P., 2017 - Terrestrial photogrammetry: a non destructive method formodelling irregularly shaped tropical tree trunks. *Methods in Ecology and Evolution*, 8, 460 - 471. doi: 10.1111/2041-210X.12670
- Berveglieri A., Tommaselli A., Liang X., Honkavaara E., 2017 - Photogrammetric measurement of tree stems from vertical fisheye images. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 32, 8, 737-747. doi: 10.1080/02827581.2016.1273381
- Burt A., Disney MI, Raunonen P., Armston J., Calders K., Lewis P., 2013 – Rapid characterisation of forest structure from TLS and 3D modelling. 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium-IGARSS
- Chen S., Liu H., Feng Z., Shen C., Chen P., 2019 - Applicability of personal laser scanning in forestry inventory. *PLoS ONE* 14(2): e0211392. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211392>
- Colomina I., Molina P., 2014 - Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92, 79-97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Corona P., Chianucci F., Quatrini V., Civitarese V., Clementel F., Costa C., Floris A., Menesatti P., Puletti N., Sperandio G., Verani S., Turco R., Bernardini V., Plutino M., Scrinzi G., 2017 - Precision forestry: riferimenti concettuali, strumenti e prospettive di diffusione in Italia. *Forest@* 14, 1-21. doi: 10.3832/efor2285-014
- Dandois J.P., Ellis E.C., 2010 - Remote sensing of vegetation structure using Computer Vision. *Remote Sens.*, 2, 1157-1176. doi:10.3390/rs2041157
- Dandois J.P., Ellis E.C., 2013 - High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using Computer Vision. *Remote Sensing of Environment* 136, 259-276. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.005>
- Disney M.I., Boni Vicari M., Burt A., Calders K., Lewis S.L., Raunonen P., Wilkes P., 2018 - Weighing trees with lasers: advances, challenges and opportunities. *Interface Focus* 8: 20170048. <http://dx.doi.org/10.1098/rsfs.2017.0048>



- Eltner A., Sofia G., 2020 - Structure from motion photogrammetric technique. Chapter in *Developments in Earth Surface Processes* - January 2020.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00001-1>
- Forsmo J., Anderson K., Macleod C., Wilkinson M.E., DeBell L., Brazier R.E., 2019 - Structure from motion photogrammetry in ecology: does the choice of software matter ? *Ecology and Evolution*, 9, 12964-12979. doi: 10.1002/ece3.5443
- Frey J., Kovach K., Stemmler S., Koch B., 2018 - UAV Photogrammetry of Forests as a Vulnerable Process. A Sensitivity Analysis for a Structure from Motion RGB-Image Pipeline. *Remote Sens.*, 10, 912. doi:10.3390/rs10060912
- Fritz A., Kattenborn T., Koch B., 2013 - Uav-based Photogrammetric point clouds - Tree stem mapping in open stands in comparison to terrestrial laser scanner point cloud. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-1/W2, 2013
UAV-g2013, 4 - 6 September 2013, Rostock, Germany.
- Goodbody T.R.H., Coops N.C., Tompalski P., Crawford P., Day K.J.K., 2017 - Updating residual stem volume estimates using ALS- and UAVacquired stereo-photogrammetric point clouds, *International Journal of Remote Sensing*, 38:8-10 2938-2953.
doi: 10.1080/01431161.2016.1219425
- Goodbody T.R.H., Coops N.C., White J.C., 2019 - Digital Aerial Photogrammetry for Updating Area-Based Forest Inventories: A Review of Opportunities, Challenges, and Future Directions. *Remote sensing* (J Suarez, Section Editor). <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00087-2>
- Gollob C., Ritter T., Nothdurft A., 2020 - Forest Inventory with Long Range and High - Speed Personal Laser Scanning (PLS) and simultaneous localization and mapping (SLAM) Technology. *Remote Sens.*, 12, 1509. doi:10.3390/rs12091509.
- Huang H., Zhang H., Chen C., Tang L., 2018 - Three - dimensional digitization of the arid land plant *Haloxylon ammodendron* using a consumer - grade camera. *Ecology and Evolution*;8, 5891 - 5899. doi: 10.1002/ece3.4126
- Hunčaga M., Chudá J., Tomašík J. Slámová M., Koreň M., Chudý F., 2020 - The Comparison of Stem Curve Accuracy Determined from Point Clouds Acquired by Different Terrestrial Remote Sensing Methods. *Remote Sens.*, 12, 2739. doi:10.3390/rs12172739
- Iglhaut J., Cabo C., Puliti S., Piermattei L., O'Connor J., Rosette J., 2019 - Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: a Review. *Remote Sensing* (J Suarez, Section Editor).
<https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3>
- Kattenborn T., Hernández J., Lopatin J., Kattenborn G., Fassnacht F.E. – Pilot study on the retrieval of DBH and diameter distribution of deciduous forest stands using cast shadows in UAV-Based orthomosaics. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume IV-1, 2018, ISPRS TC I Mid-term Symposium “Innovative Sensing - From Sensors to Methods and Applications”, 10-12 October 2018, Karlsruhe, German.



<https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-1-93-2018>

Kellner J.R., Armston J., Birrer M., Cushman K.C., Duncanson L., Eck C., Fallegger C., Imbach B., Král K., Krůček M., Trochta J., Vrška T., Zraggen C., 2019 - New opportunities for Forest Remote Sensing through Ultra-High-Density Drone Lidar. *Surveys in Geophysics*, 40, 959 - 977.

<https://doi.org/10.1007/s10712-019-09529-9>

Krůček M., Král K., Cushman KC, Missarov A., Kellner J.R., 2020 - Supervised segmentation of Ultra-High-Density Drone Lidar for large - area mapping of individual trees. *Remote Sens.*, 12, 3260. doi:10.3390/rs12193260

Küng O., Strecha C., Beyeler A., Zufferey J-C., Floreano D., Fua P. Gervais F., 2011 - The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVIII-1/C22, 2011. ISPRS Zurich 2011 Workshop, 14-16 September 2011, Zurich, Switzerland. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-125-2011>

Liang X., Jaakkola A., Wang Y., Hyypä J., Honkavaara E., Liu J. and Kaartinen H., 2014 - The use of a hand-held camera for individual tree 3D mapping in forest sample plots. *Remote Sens.*, 6, 6587-6603. doi:10.3390/rs6076587

Liang X., Wang Y., Jaakkola A., Kukko A., Kaartinen H., Hyypä J., Honkavaara E., Liu J., 2015 - Forest data collection using terrestrial image-based point clouds from a handheld camera compared to terrestrial and personal laser scanning. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote sensing*, 53, 9. doi: 10.1109/TGRS.2015.2417316

Liang X., Hyypä J., Kaartinen H., Lehtomäki M., Pyörälä J., Pfeifer N., Holopainen M., Brolly G., Francesco P., Hackenberg J., Huang H., Jo H.W., Katoh M., Liu L., Mokroš M., Morel J., Olofsson K., Poveda-Lopez J., Trochta J., Wang D., Wang J., Xi Z., Yang B., Zheng G., Kankare V., Luoma V., Yu X., Chen L., Vastaranta M., Saarinen N., Wang Y., 2018 - International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 144, 137 - 179. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.06.021>

Lim K., Treitz P., Wulder M., St-Ongec B., Flood M., 2003 - LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography* 27,1, 88-106. doi: 10.1191/0309133303pp360ra

Liu J., Feng Z., Yang L., Mannan A., Khan T. U., Zhao Z., Cheng Z., 2018 - Extraction of sample plot parameters from 3D Point Cloud Reconstruction Based on combined RTK and CCD continuous photography. *Remote Sens.*, 10, 1299. doi:10.3390/rs10081299

Marzulli M. I., Raunonen P., Greco R., Persia M., Tartarino P., 2020 - Estimating tree stem diameters and volume from smartphone photogrammetric point clouds. *Forestry*, 93, 411 - 429. doi:10.1093/forestry/cpz067

Mokroš M., Výboštok J., Tomašík J., Grznárová A., Valent P., Slavík M., Ján Merganič J., 2018 - High precision individual tree diameter and perimeter estimation from Close-Range Photogrammetry. *Forests*, 9, 696. doi:10.3390/f9110696



- Mokroš M., Liang X., Surový P., Valent P., Čerňava J., Chudý F., Tunák D., Saloň S., Merganič J., 2018 - Evaluation of Close-Range Photogrammetry image collection methods for estimating tree diameters. *Int. J. Geo-Inf.*, 7, 93. doi:10.3390/ijgi7030093
- Miller J., Morgenroth J., Gomez C., 2015 - 3D modelling of individual trees using a handheld camera: Accuracy of height, diameter and volume estimates. *Urban Forestry & Urban Greening* 14, 932 - 940. doi: 10.1016/j.ufug.2015.09.001
- Mikita T., Janata P., Surový P., 2016- Forest stand inventory based on combined aerial and terrestrial Close-Range Photogrammetry. *Forests* 7, 165. doi:10.3390/f7080165
- Morgenroth J., Gomez C., 2014 - Assessment of tree structure using a 3D image analysis technique - A proof of concept. *Urban Forestry & Urban Greening* 13, 198-203.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2013.10.005>
- Nyimbili P.H., Demirel H., Şeker D.Z., Erden T., 2016 - Structure from Motion (SfM) - Approaches and Applications. International Scientific Conference on applied sciences. 27-30 September 2016 - Antalya/Turkey.
- Panagiotidis D., Surový P., Kuželka K., 2016 - Accuracy of Structure from Motion models in comparison with terrestrial laser scanner for the analysis of DBH and height influence on error behaviour. *Journal of Forest Science*, 62, 8, 357-365. doi: 10.17221/92/2015-JFS
- Piermattei L., Karel W., Wang D., Wieser M., Mokroš M., Surový P., Kore M., Tomašík J., Pfeifer N., Hollaus M., 2019 - Terrestrial Structure from Motion Photogrammetry for Deriving Forest Inventory Data. *Remote Sens.*, 11, 950. doi:10.3390/rs11080950
- Puliti S., Ørka H.O., Gobakken T., Næsset E., 2015 - Inventory of Small Forest Areas Using an Unmanned Aerial System. *Remote Sens.*, 7, 9632-9654. doi:10.3390/rs70809632
- Puliti S., Ene L.T., Gobakken T., Næsset E., 2017 - Use of partial-coverage UAV data in sampling for large scale forest inventories. *Remote Sensing of Environment* 194, 115-126.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.019>
- Puliti S., Dash J.P., Watt M.S., Breidenbach J., Pearse G.D., 2019 - A comparison of UAV laser scanning, photogrammetry and airborne laser scanning for precision inventory of small-forest properties. *Forestry*, 00, 1-13. doi:10.1093/forestry/cpz057
- Puliti S., Breidenbach B., Astrup R., 2020 - Estimation of Forest Growing Stock Volume with UAV Laser Scanning Data: Can it Be Done without Field Data ? *Remote Sens.*, 12, 1245. doi:10.3390/rs12081245
- Remondino F., Nocerino E., Toschi I., Menna F., 2017 - Critical review of automated photogrammetric processing of large datasets. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-2/W5, 2017. 26th International CIPA Symposium 2017, 28 August-01 September 2017, Ottawa, Canada. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-591-2017



Raumonon P., Kaasalainen M., Åkerblom M., Kaasalainen S., Kaartinen H., Vastaranta M., 2013 - Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data. *Remote Sens*, 5 (2), 491-520.

doi:10.3390/rs5020491

Raumonon P., Casella E., Calders K., Murphy S., Åkerblom M., Kaasalainen M., 2015 - Massive scale tree modelling from TLS data. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-3/W4, 2015 PIA15+HRIGI15 – Joint ISPRS conference 2015, 25–27 March 2015, Munich, Germany. doi:10.5194/isprsannals-II-3-W4-189-2015

Spreitzer G., Tunnicliffe J., Friedrich H., 2020 - Large wood (LW) 3D accumulation mapping and assessment using structure from Motion photogrammetry in the laboratory. *Journal of Hydrology*, 581, 124430.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124430>

Surový P., Yoshimoto A., Panagiotidis D., 2016 - Accuracy of reconstruction of the tree stem surface using terrestrial Close-Range Photogrammetry. *Remote Sens*. 8, 123. doi:10.3390/rs8020123

Trochta J., Krůček M., Vrška T., Král K., 2017 - 3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LIDAR. *PLoS ONE* 12(5): e0176871.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176871>

Wallace L., Lucieer A., Malenovsky Z., Turner D., Vopěnka P., 2016 - Assessment of Forest Structure Using Two UA Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Forests*, 7, 62. doi:10.3390/f7030062

Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M., 2012 - 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

White J., Wulder M.A., Vastaranta M., Coops N.C., Pitt D., Woods M., 2013 - The Utility of Image Based Point Clouds for Forest Inventory: A Comparison with Airborne Laser Scanning. *Forests*, 4, 518-536. doi:10.3390/f4030518

White J., Coops N., Wulder M., Vastaranta M., Hilker T., Tompalski P., 2016 - Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventories: A Review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 42:5, 619-641. doi: 10.1080/07038992.2016.1207484

