



ORTOFOTO AD ALTA RISOLUZIONE PER INDIVIDUAZIONE DI LESIONI STRUTTURALI CON “MAGO”

HIGH RESOLUTION ORTHOPHOTOS FOR THE RECOGNITION OF STRUCTURAL DAMAGES WITH “MAGO”

S. Gagliolo ^a

^a Università degli Studi di Genova, DICCA – Laboratorio di Geodesia, Geomatica e GIS, Via Montallegro 1, 16145 Genoa
sara.gagliolo @edu.unige.it

PAROLE CHIAVE: Ortofoto, Monitoraggio, Lesioni, Struttura, Sicurezza

KEY WORDS: Orthophoto, Monitoring, Damages, Structure, Security

Questo articolo è stato presentato al Premio Giovani Autori SIFET 2019.

RIASSUNTO

Il presente lavoro ha l'obiettivo di illustrare un metodo innovativo per la generazione di ortofoto, identificato dall'acronimo MAGO (Mesh Adattiva per la Generazione di Ortofoto) ed implementato in ambiente C++.

Gli elementi di novità apportati da questo nuovo approccio consentono di superare alcune problematiche tipicamente riscontrabili nell'applicazione di tecniche esistenti. In particolare, i vantaggi di MAGO riguardano: (1) la possibilità di ottenere un'ortofoto alla risoluzione del GSD (Ground Sample Distance), corrispondente alla dimensione del pixel immagine originale; (2) la creazione di una mesh adattiva triangolare, generata a partire dalla nuvola di punti, in grado di rappresentare nel dettaglio la superficie dell'oggetto di interesse, da proiettare sul piano dell'ortofoto.

La procedura è stata applicata al caso studio di un ponte stradale in muratura situato in provincia di Genova, per verificare le sue potenzialità nello studio dello stato fessurativo dell'arcata di valle. Una porzione della lesione maggiormente estesa è stata infatti restituita mediante due ortofoto ad alta risoluzione, generate a partire da nuvole di punti derivanti da rilievo fotogrammetrico e laser scanner. Infine, gli output sono stati analizzati e confrontati sulla base della qualità metrica finale e della fruibilità.

ABSTRACT

The present work aims to show an innovative method for the orthophoto generation, identified with the acronym MAGO (Adaptive Mesh for Orthophoto Generation) and implemented in C++ environment. The innovations produced by this new approach allow to overcome some problems typically observable in the application of the existing techniques. In particular, MAGO strength points are: (1) the possibility to obtain an orthophoto with the GSD (Ground Sample Distance) resolution, corresponding to the dimension of the pixel of the original image; (2) the creation of a triangular adaptive mesh, generated from the point cloud, able to represent the object of interest surface, which is projected on the orthophoto plan, in a detailed way.

The procedure has been applied to the case study of a masonry road bridge in the district of Genoa, to verify its potential in the study concerning the cracking state of the downstream arch. A portion of the wider crack is reproduced by means of high resolution orthophotos, generated starting from photogrammetric and laser scanner cloud points. Finally, the outputs are analyzed and compared, on the basis of the final metrical quality and the user-friendliness.

1. INTRODUZIONE

La disponibilità sempre maggiore di prodotti 3D, facilmente interrogabili e fruibili, non ha sostituito, bensì integrato l'utilizzo di prodotti bidimensionali per la rappresentazione e la descrizione della realtà che ci circonda.

L'obiettivo comune di tali modalità di restituzione è la generazione di prodotti metricamente affidabili. Tra quelli tridimensionali si annoverano: nuvole e *mesh*, rispettivamente costituite da punti e poligoni; DSM (Digital Surface Models), che discretizzano le nuvole di punti stesse attraverso celle tipicamente quadrate. Tra le rappresentazioni 2D utilizzate in ambito architettonico e strutturale, le principali sono piante, prospetti, sezioni e ortofoto.

In particolare le ortofoto, sulle quali è focalizzato il presente lavoro, sono largamente utilizzate per eseguire misure di elevata

precisione e per meglio interpretare la descrizione tematica dell'area rilevata. Esse sono realizzate a partire da immagini dell'oggetto, la cui morfologia può essere descritta attraverso un DSM o da un modello poligonale (*mesh*). Il raggiungimento della più elevata risoluzione possibile è dato dalla dimensione del cosiddetto GSD (Ground Sample Distance), corrispondente alla dimensione del pixel immagine proiettato sulla superficie dell'oggetto, e dal grado di approssimazione nella descrizione geometrica della superficie dell'oggetto mediante la *mesh*, come specificato nel paragrafo seguente.

Le ortofoto sono uno strumento essenziale per lo studio del territorio e del costruito. Le possibilità di effettuare misure precise e, parallelamente, di classificare il contenuto dell'immagine sono fondamentali nel supporto decisionale circa aspetti di produttività (Erlandsson et al., 2019), nel monitoraggio di fenomeni naturali e antropici (Niedzielski et

al., 2018; Nahhas et al., 2019), nell'archiviazione e conservazione del patrimonio culturale (Sammartano e Spanò, 2017; Perfetti et al., 2019), per la sicurezza infrastrutturale (Pérez et al., 2019).

Il presente lavoro descrive un approccio innovativo rispetto alle tecniche attualmente disponibili. Tale metodo, identificato dall'acronimo MAGO (*Mesh* Adattiva per la Generazione di Ortofoto), è stato implementato in ambiente C++, con il supporto delle librerie esistenti Cimg Library¹, Image Magick², e matrix.h³ (Gagliolo et al., 2019).

La procedura consente di generare ortofoto a partire dalla nuvola di punti dell'oggetto (proveniente indifferentemente da rilievo laser scanner o fotogrammetrico) e da un'immagine, di cui siano noti l'orientamento interno ed esterno. La produzione dell'ortofoto è basata su un processo iterativo che dà luogo alla creazione di una *mesh* adattiva, generata considerando una specifica area piana triangolare come intersezione tra il raggio di collinearità e la nuvola di punti. In questo modo, è possibile limitare l'approssimazione e la perdita di definizione tipicamente dovute alla ricostruzione di una *mesh* "globale" dell'oggetto, che risulta più grossolana.

La procedura è applicata ad un caso studio, un ponte stradale in muratura sito in provincia di Genova. L'infrastruttura è di primaria importanza per gli abitanti della zona, in quanto rappresenta la via di comunicazione principale.

Lo stato fessurativo del ponte ha reso necessario eseguire un monitoraggio periodico della struttura per controllare gli eventuali avanzamenti e/o sviluppi delle lesioni. L'analisi condotta in questa sede è focalizzata alla porzione sommitale della principale lesione sull'arcata di valle.

Considerando la molteplicità di dati disponibili derivanti dal rilievo integrato, sono stati effettuati alcuni test della procedura sviluppata in differenti configurazioni al fine di comprendere quale sia il prodotto più idoneo all'analisi della lesione.

La trattazione è organizzata come segue: la procedura ed il *workflow* di MAGO sono descritti nel paragrafo 2, mentre nel paragrafo 3 viene presentato il caso studio. I risultati dei confronti sono argomentati nel paragrafo 4, che è seguito, infine, dalle conclusioni.

2. APPROCCIO E WORKFLOW DI MAGO

Come menzionato nell'introduzione, l'approccio di MAGO risulta innovativo rispetto ai metodi attualmente in uso. Allo stato dell'arte, infatti, sono due le principali problematiche da considerare nella generazione di ortofoto: da un lato, la possibilità di raggiungere la massima risoluzione consentita dall'immagine originale, dell'ordine del suo GSD; dall'altro, il grado di approssimazione con cui è rappresentata la superficie dell'oggetto di interesse, da proiettare sul piano dell'ortofoto.

L'approccio di MAGO è volto a risolvere tali questioni mediante la generazione di una *mesh* adattiva, costituita da specifiche aree piane triangolari i cui vertici sono ottenuti dall'intersezione tra il raggio di collinearità e la nuvola di punti. Su ciascuna di tali superfici viene quindi proiettata la porzione di immagine di competenza alla sua risoluzione originale.

Il *workflow* è articolato nelle seguenti fasi:

1. definizione del piano ortofoto;

2. acquisizione delle immagini e dei parametri di orientamento interno ed esterno provenienti da fonti esterne;
3. definizione delle dimensioni e della risoluzione dell'ortofoto;
4. processo iterativo per la determinazione dei tre punti più idonei alla definizione del piano intersezione tra la nuvola di punti e la retta di collinearità, ottenuta a partire dal pixel immagine considerato;
5. proiezione del colore dei pixel immagine sul piano ortofoto attraverso l'intersezione della retta di collinearità con il piano ottenuto al passo precedente.

2.1 Dati di input e impostazioni

I dati di *input* necessari per il funzionamento di MAGO sono la nuvola di punti descrivente la morfologia della superficie considerata e un'immagine della stessa, con i suoi parametri di orientamento interno ed esterno.

La nuvola di punti può provenire da TLS (Terrestrial Laser Scanner), LIDAR (Light Detection and Ranging) o da fotogrammetria, mentre i parametri di orientamento dell'immagine possono essere stimati con l'uso di un software fotogrammetrico.

All'utente è richiesto di definire il piano ortofoto, attraverso le coordinate di tre punti, e la sua risoluzione, da scegliere in base al GSD dell'immagine originale.

A partire dalla nuvola di punti in *input*, MAGO calcola automaticamente le dimensioni e i limiti dell'ortofoto, come indicato nelle relazioni (1).

$$\frac{X_{MAX} - X_{MIN}}{\text{risoluzione}} = \text{larghezza ortofoto}$$
$$\frac{Y_{MAX} - Y_{MIN}}{\text{risoluzione}} = \text{altezza ortofoto}$$
(1)

Per riordinare e allocare le informazioni dei punti della nuvola e permetterne un accesso facile e veloce, viene realizzata una griglia regolare, con una risoluzione dell'ordine della spaziatura media della nuvola di punti (assegnata come *input*). Tali dati sono utilizzati per la realizzazione dell'ortofoto, mediante i passaggi presentati in modo approfondito nel paragrafo seguente; inoltre, il software è in grado di generare DSM sulla base dei dati preordinati, secondo i criteri della media, della mediana o il massimo dei valori contenuti nella cella considerata.

Infine, se non fosse necessario processare le immagini alla loro risoluzione originale per ottenere l'ortofoto desiderata, è possibile impostare un fattore di riduzione per escludere una percentuale di pixel dal processo di calcolo, accelerandolo.

Gli *input* elencati, sia quelli provenienti da fonti esterne, sia quelli stabiliti dall'utente, possono essere comunicati al software attraverso una semplice interfaccia grafica, rappresentata nella Figura 1.

¹ <http://cimg.eu/>

² <https://imagemagick.org/>

³ <http://matrix.drque.net/>

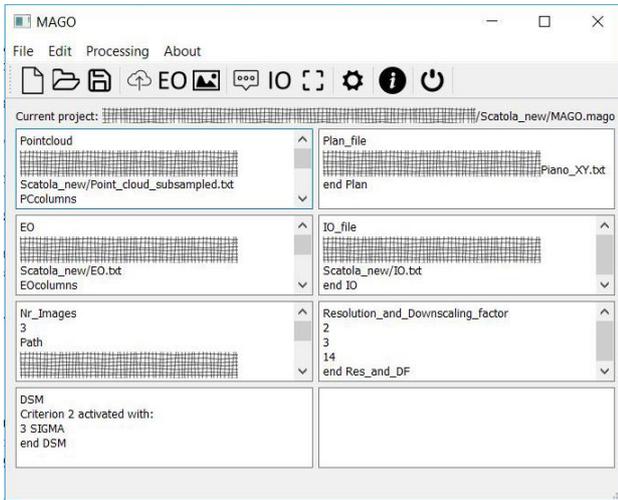


Figura 1. Interfaccia grafica di MAGO.

2.2 Processo iterativo per la produzione di ortofoto

Una volta caricati tutti i dati richiesti come *input*, la procedura per l'ottenimento dell'ortofoto può avere inizio. Le equazioni di collinearità sono applicate ad ogni pixel dell'immagine considerata.

$$\begin{aligned} x &= x_0 - c \frac{r_{11}(X_p - X_0) + r_{12}(Y_p - Y_0) + r_{13}(Z_p - Z_0)}{r_{31}(X_p - X_0) + r_{32}(Y_p - Y_0) + r_{33}(Z_p - Z_0)} \\ y &= y_0 - c \frac{r_{21}(X_p - X_0) + r_{22}(Y_p - Y_0) + r_{23}(Z_p - Z_0)}{r_{31}(X_p - X_0) + r_{32}(Y_p - Y_0) + r_{33}(Z_p - Z_0)} \end{aligned} \quad (2)$$

Tra i parametri delle equazioni di collinearità riportate nell'Equazione (2) espresse in forma canonica, le coordinate immagine (x, y) , i parametri di orientamento interno (distanza focale c , e coordinate del punto principale, x_0, y_0), e i parametri di orientamento esterno (posizione della camera $\underline{X}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$ e componenti r_{ij} della matrice di rotazione di Cardano \mathbf{R}) sono noti; invece, le coordinate del punto nel sistema oggetto $\underline{X}_P = (X_P, Y_P, Z_P)$ sono incognite.

Pertanto, per ogni pixel il sistema di equazioni da risolvere è costituito da due equazioni con tre incognite, rappresentate dalle coordinate del punto nel sistema oggetto. Per trovare la soluzione del sistema, si dà luogo ad un processo iterativo, imponendo come Z_P di primo tentativo Z_{MAX} , ovvero la quota massima dei punti della nuvola. X_P e Y_P sono di conseguenza calcolati dall'intersezione della retta di collinearità e il piano a Z_P costante.

Le coordinate \underline{X}_P così ottenute si collocano all'interno di una cella della griglia, precedentemente costituita per organizzare e riordinare la nuvola di punti per un rapido accesso alle informazioni necessarie per il calcolo.

Se risulta che almeno un punto giace all'interno della cella indagata, si procede nel verificare la distanza in direzione Z rispetto alla Z_P fissata in precedenza. Si assume un valore di soglia δz definito univocamente sulla base della spaziatura della nuvola di punti s fornita in *input* e usata per formare la griglia.

Se il punto si trova nel *range* di tolleranza verticale δz ed ha una distanza dalla retta di collinearità inferiore al GSD, allora la corrispondenza è stata trovata ed il punto stesso viene proiettato sul piano ortofoto.

Se il *range* di tolleranza verticale δz è rispettato, ma il punto si trova ad una distanza maggiore del GSD, inizia la ricerca di due

punti idonei a formare la superficie triangolare adattiva di intersezione tra la nuvola di punti e il raggio di collinearità. La ricerca dei punti avviene all'interno della cella in cui è stato trovato il primo punto e delle sue 8 celle vicine, seguendo i seguenti criteri:

1. la disomogeneità della nuvola fa sì che alcuni punti possano risultare troppo vicini o troppo lontani dal primo ritrovato; se tali punti fossero scelti come idonei, potrebbero comportare una rappresentazione non realistica della superficie. Per evitare ciò, si definisce in planimetria una corona circolare con raggio interno (r_i) ed esterno (r_e) rispettivamente del 40% e 180% della dimensione s e si stabilisce che i punti debbano giacere in tale fascia;
2. per evitare la definizione di piani sub-verticali, è fissato un limite di tolleranza anche in direzione verticale. Il valore di tale vincolo è proporzionale al diametro esterno dell'anello e alla tangente di $\pm 80^\circ$;
3. almeno uno dei punti candidati a formare la *mesh* adattiva deve giacere dalla parte opposta della traccia della retta di collinearità rispetto al primo ritrovato;
4. i vertici devono formare un triangolo la cui proiezione planimetrica abbia un'area di almeno il 20% della dimensione s^2 .

L'intersezione della superficie così definita con la retta di collinearità viene proiettata sul piano ortofoto.

I criteri delineati sono schematizzati nella Figura 2.

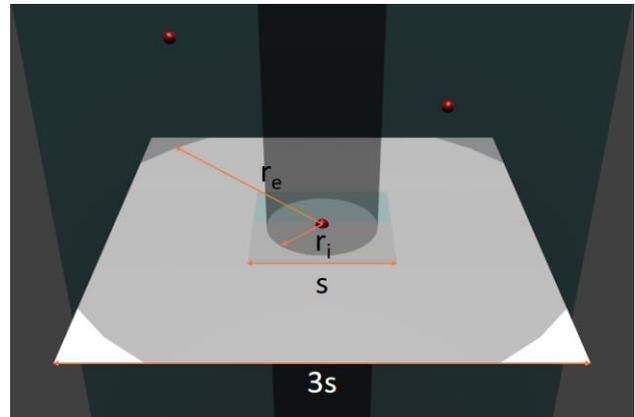


Figura 2. Ricerca dei punti per la definizione della *mesh* adattiva.

Se la cella indagata fosse vuota o vi giacessero punti che non soddisfano la tolleranza δz , Z_P è decurtato automaticamente della quantità s e si ripete la procedura per il nuovo valore di Z_P .

Se nessuna corrispondenza è verificata fintanto che Z_P raggiunge il valore di Z_{MIN} , cioè il minimo valore di quota della nuvola di punti, il pixel viene scartato e la procedura prosegue con l'analisi del successivo, fino alla conclusione dell'intera immagine.

La procedura è riassunta nello schema in Figura 3.

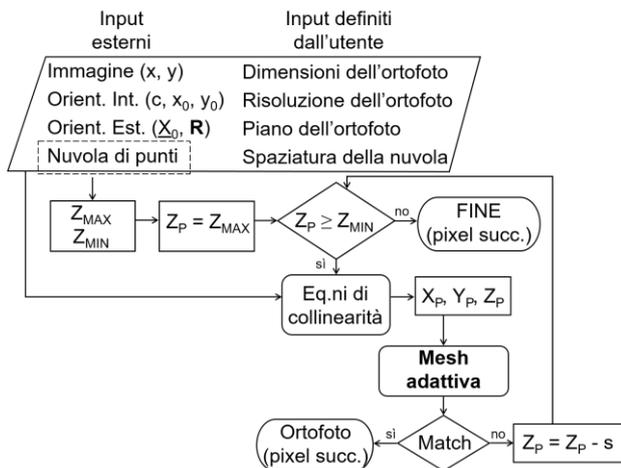


Figura 3. Schema della procedura di MAGO.

3. IL CASO STUDIO

Il ponte analizzato (rappresentato in Figura 4) è sito nell'entroterra di Genova. Nonostante si tratti di una piccola struttura, la sua importanza strategica è dovuta al fatto che è l'unica via di collegamento tra la zona costiera e quella a monte. Da alcuni anni lo sviluppo delle lesioni della struttura destava preoccupazione, sono stati pertanto effettuati monitoraggi periodici e, in tempi recentissimi, sono stati predisposti interventi di consolidamento.

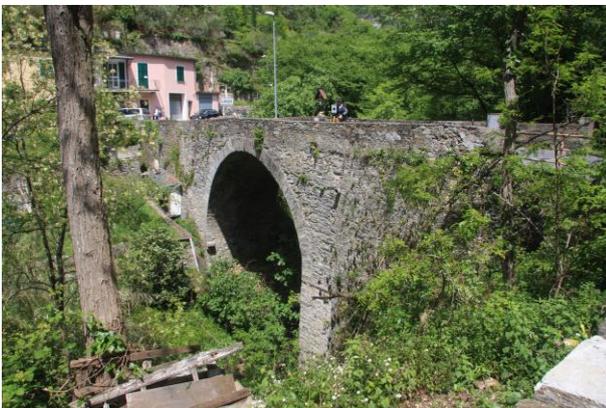


Figura 4. Vista del lato di valle del Ponte.

Le nuvole di punti considerate per l'applicazione della procedura di MAGO sono frutto di un rilievo integrato dell'intera struttura, acquisito mediante Laser Scanner, fotogrammetria e rilievo topografico dei punti di appoggio, svolto con tecnica tradizionale mediante Stazione Totale.

Gli strumenti utilizzati per la campagna di rilievo sono: la fotocamera Canon EOS 40D, il Laser Scanner Z+F Imager@ 5006h e la Stazione Totale Leica TCR703.

La porzione selezionata per le analisi è la parte superiore della principale lesione, situata sul fronte di valle dell'arcata e rappresentata in Figura 5.



Figura 5. Immagine utilizzata per la realizzazione dell'ortofoto; in rosso, la porzione di interesse.

Sono state prodotte due ortofoto, a partire dalla nuvola di punti del Laser Scanner e da quella fotogrammetrica. I due prodotti sono stati confrontati (paragrafo 4) per studiarne le differenze.

Il GSD dell'immagine considerata è di circa 2,5 mm (distanza focale 85 mm, distanza dall'oggetto circa 35 m), mentre la spaziatura media delle nuvole di punti è rispettivamente di 4 mm per quella da Laser Scanner e 6 mm per quella fotogrammetrica. La risoluzione dell'ortofoto è stata fissata in entrambi i casi a 4 mm, confrontabile con la risoluzione della nuvola laser e sufficiente ad apprezzare la lesione oggetto di studio. L'immagine originale è stata trattata nella sua definizione originale, senza l'applicazione di un fattore di riduzione della scala.

Il parametro s , ovvero la spaziatura della griglia per il trattamento della nuvola di punti, è stato fissato a 16 mm per la nuvola fotogrammetrica e 12 mm per quella proveniente dal Laser Scanner. Tale sovradimensionamento è cautelativo perché consente di rilevare un'effettiva mancanza di dato laddove si riscontra assenza di punti nella discretizzazione a maglia regolare s .

Le necessarie elaborazioni fotogrammetriche sono state eseguite con il software Agisoft Photoscan© (ora Metashape©, 2019), mentre la gestione delle nuvole è stata condotta grazie a CloudCompare (2019).

Il modello è stato opportunamente ruotato in modo tale che la superficie del fronte di valle risultasse parallela al piano ortofoto.

Sono in corso ulteriori sviluppi del software per consentire di scegliere liberamente il piano dell'ortofoto.

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

Come menzionato in precedenza, le ortofoto consentono parallelamente all'indagine metrica dell'oggetto anche la sua analisi tematica. Per le nuvole di punti, non sempre è possibile ottenere in modo soddisfacente entrambe le caratteristiche.

In particolare, la nuvola del Laser Scanner (Fig. 6) garantisce una risoluzione geometrica migliore rispetto a quella fotogrammetrica, ma la scala in termini di valori di grigi con cui è rappresentata non permette di riconoscere facilmente gli oggetti; d'altro canto, la nuvola fotogrammetrica (Fig. 7) permette di riconoscere gli elementi grazie al colore, ma la risoluzione ottenibile è tipicamente più grossolana.

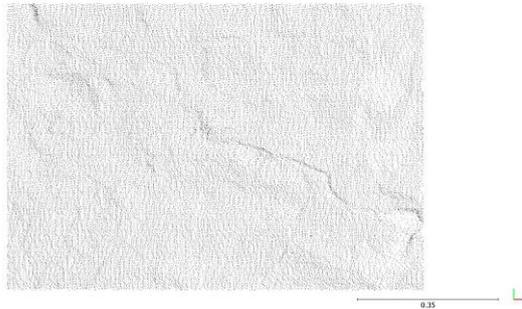


Figura 6. Nuvola Laser Scanner.
Spaziatura 4 mm.

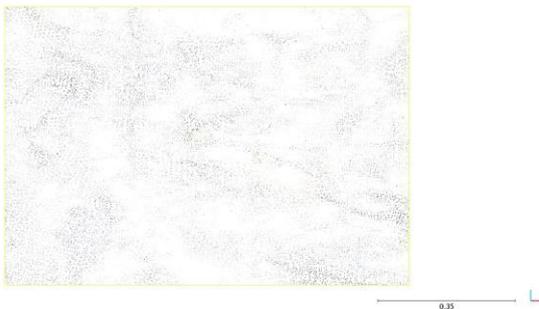


Figura 7. Nuvola fotogrammetrica.
Spaziatura 6 mm.

L'ortofoto ricostruita con MAGO consente di ottenere da entrambe le nuvole in *input* un prodotto ad alta risoluzione. Le ortofoto ottenute rispettivamente dalla nuvola Laser Scanner e da quella fotogrammetrica sono riportate nella Figura 8 e nella Figura 9. Le porzioni di colore nero intenso, presenti nelle Figure 8 e 9, sono dovute ad assenza di dato (spaziatura della nuvola di punti superiore alla dimensione del pixel ortofoto) o a mancata corrispondenza diretta per la proiezione. Attualmente si sta lavorando ad un algoritmo di interpolazione del colore in grado di limitare tali effetti.



Figura 8. Ortofoto ottenuta dalla nuvola Laser Scanner.



Figura 9. Ortofoto ottenuta dalla nuvola fotogrammetrica.

Un dato inatteso è la presenza di un numero visibilmente più elevato di assenze di dato nell'ortofoto proveniente dalla nuvola Laser Scanner, nonostante la sua maggiore densità media rispetto alla nuvola fotogrammetrica.

Per giustificare tale comportamento, si è proceduto all'analisi dei due DSM, riportati Figura 10 per il Laser Scanner e nella Figura 11 per la fotogrammetria.

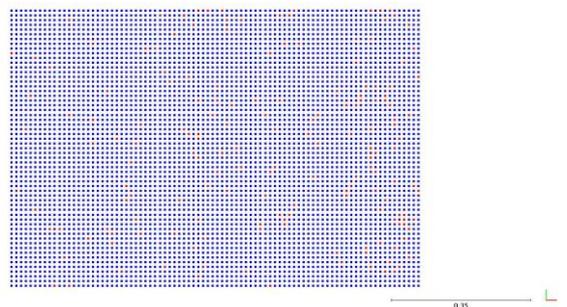


Figura 10. DSM della nuvola Laser Scanner; cella 12 mm.
Le celle in rosso rappresentano buchi isolati.

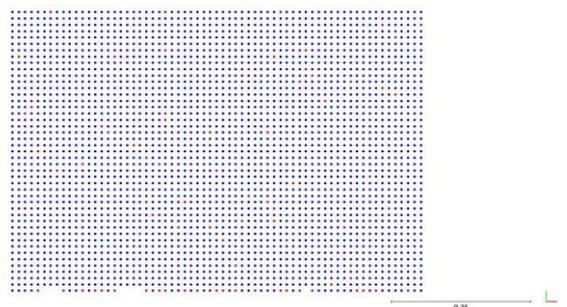


Figura 11. DSM della nuvola fotogrammetrica; cella 16 mm.
Le celle in rosso rappresentano buchi isolati.

Nonostante la scelta della dimensione della griglia s sia stata operata cautelativamente per entrambi i casi, il DSM della nuvola ottenuta da Laser Scanner evidenzia un maggior numero di buchi isolati. Ciò riflette la disomogeneità di distribuzione dei punti, che non è stata sufficientemente compensata dalla creazione di una griglia a maglie molto più larghe della spaziatura media dei punti.

Nella Figura 12, descritta dalla Tabella 1, si riportano dati statistici relativi alle porzioni con assenza di dato delle due ortofoto. Attraverso l'uso del software GIS Open Source

GRASS⁴, sono state calcolate le dimensioni delle aree non ricostruite e la sovrapposizione tra tali aree nelle due ortofoto.

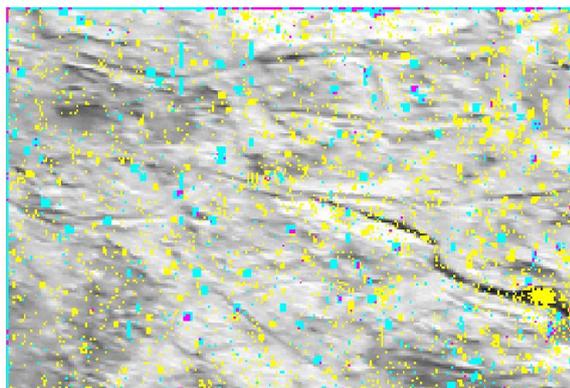


Figura 12. Individuazione delle aree non ricostruite; in giallo le aree non ricostruite a partire dalla nuvola Laser Scanner, in ciano da quella fotogrammetria, in magenta la sovrapposizione delle mancanze di dato per le due tecniche.

Aree non ricostruite	Num. celle		%	
	tot	les	tot	les
solo Laser Scanner (giallo)	3431	173	7.5	31.6
solo fotogramm. (ciano)	1606	6	3.5	1.1
entrambi (magenta)	340	3	0.7	0.5

Tabella 1. Percentuale di ricoprimiento delle aree non ricostruite e numero di celle corrispondente per l'intera ortofoto (tot) e per la sola lesione (les).

Le statistiche riportate confermano quanto era già stato possibile valutare visivamente. Infatti, le aree con assenza di dato nell'ortofoto proveniente dal Laser Scanner sono circa il doppio di quelli evidenziati nell'ortofoto da fotogrammetria. Le aree comuni sono in percentuale esigua e localizzate maggiormente in prossimità dei bordi.

Nonostante i dati di *input* siano stati forniti per ottenere condizioni confrontabili, le significative differenze portano a considerare la diversa natura delle nuvole trattate, piuttosto che la procedura applicata.

Concentrando l'attenzione sulla lesione oggetto di studio, ad esempio, è evidente come questa sia delineata in maniera più completa in Figura 9, grazie all'utilizzo del dato fotogrammetrico.

5. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

Il presente lavoro intende presentare un nuovo approccio per la ricostruzione di ortofoto, attraverso il software MAGO (*Mesh* Adattiva per la Generazione di Ortofoto). Tale metodo consente di ricostruire ortofoto ad alta risoluzione a partire da nuvole di punti, ottenute con tecniche di rilievo differenti, e da un'immagine orientata. L'utilizzo di una *mesh* adattiva, al posto di quella comunemente ricostruita dai software fotogrammetrici, consente di ottenere un prodotto finale che si ritiene di maggior dettaglio. Inoltre, la proiezione dell'immagine alla sua risoluzione originale consente di raggiungere il massimo grado

di dettaglio possibile, diversamente dall'ortofoto tradizionale, usualmente vincolata alla risoluzione del DSM.

La procedura è stata applicata ad un caso studio, per valutare la qualità e la fruibilità del prodotto finale, in relazione alle proprietà di partenza delle nuvole di punti, caratterizzate da una spaziatura media rispettivamente di 4 mm per quella da Laser Scanner e 6 mm per quella fotogrammetrica. La risoluzione delle ortofoto è stata fissata a 4 mm.

Il caso studio analizzato è un ponte stradale in muratura sito in provincia di Genova, del quale si è studiata una porzione della lesione localizzata sull'arcata di valle. L'analisi dei diversi prodotti 2D e 3D ha consentito di formulare le seguenti considerazioni. La nuvola Laser Scanner ottenuta dal rilievo integrato svolto ha una spaziatura media più dettagliata, che consente di apprezzare meglio la geometria dell'oggetto; tuttavia, la rappresentazione in tonalità di grigi non facilita il riconoscimento degli oggetti da esaminare. La nuvola fotogrammetrica è un prodotto meno denso, infatti presenta un numero inferiore di punti e, di conseguenza, consente un grado di risoluzione metrica inferiore; nonostante ciò, la presenza del colore facilita la localizzazione dell'oggetto di interesse.

Le ortofoto ottenute da MAGO, a partire dalle nuvole di punti del Laser Scanner e fotogrammetrica, rappresentano due prodotti con risoluzione metrica confrontabile con la spaziatura media della nuvola Laser Scanner e con il GSD, senza però trascurare l'aspetto tematico.

Le ortofoto ottenute dalle due nuvole sono state confrontate, con risultati inaspettatamente migliori per il dato fotogrammetrico.

Sono state svolte valutazioni statistiche per quantificare l'assenza di dato all'interno delle ortofoto, alla luce del fatto che attualmente il software non effettua interpolazioni per il riempimento degli stessi.

Per perfezionare la procedura, occorrerà implementare metodi di interpolazione che consentano il riempimento delle assenze di dato isolate attualmente presenti sull'ortofoto; ciò è ammissibile in aree con andamento della superficie sufficientemente liscio. Un altro miglioramento in tal senso è la possibilità di generare un ortomosaico, utile ad eliminare le eventuali lacune di dato qualora siano localizzate sul singolo fotogramma. Inoltre sarà necessario focalizzare l'attenzione sull'introduzione di metodi statistici per il filtraggio della nuvola di punti in *input*, così come nella realizzazione di un modulo per scegliere liberamente il piano di proiezione dell'ortofoto.

6. BIBLIOGRAFIA

Agisoft Metashape©, 2019, <http://www.agisoft.com/> (5th March 2019)

CloudCompare, 2019, <http://www.cloudcompare.org/> (5th March 2019)

Erlandsson, R., Stoessel, M., Skånes, H., Wennbom, M., Angerbjörn, A., 2019. An innovative use of orthophotos – possibilities to assess plant productivity from colour infrared aerial orthophotos. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, <https://doi.org/10.1002/rse2.108>

Gagliolo, S., Federici, B., Ferrando, I., Sguerso, D., 2019. MAGO: a new approach for orthophotos production based on adaptive *mesh* reconstruction. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information*

⁴ <https://grass.osgeo.org/>

Sciences, XLII-2/W11, 533-538, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-533-2019>

GRASS GIS, 2019, <https://grass.osgeo.org/> (5th March 2019)

Nahhas, F.H., Shafri, H.Z.M., Sameen, M.I., Pradhan, B., 2018. Deep learning approach for building detection using LiDAR-Orthophoto fusion. *Journal of Sensors* 2018, <https://doi.org/10.1155/2018/7212307>

Niedzielski, T., Spallek, W., Witek-Kasprzak, M., 2018. Automated Snow Extent Mapping Based on Orthophoto Images from Unmanned Aerial Vehicles. *Pure and Applied Geophysics*, Volume 175, pp. 3285–3302. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1843-8>

Pérez, J.A., Gonçalves, G.R., Rangel, J.M.G., Ortega, P.F., 2019. Accuracy and effectiveness of orthophotos obtained from low cost UASs video imagery for traffic accident scenes documentation. *Advances in Engineering Software*, Volume

132, 2019, pp. 47-54, ISSN 0965-9978, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2019.03.010>

Perfetti, L., Fassi, F., Gulsan, H., 2019. Generation of Gigapixel orthophoto for the maintenance of complex buildings. Challenges and lesson learnt. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W9, 605-614, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-605-2019>

Sammartano, G., Spanò, A., 2017. High scale 3D modelling and orthophoto of curved masonries for a multipurpose representation, analysis and assessment. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-5/W1, 245-252, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-245-2017>

Z+F LaserControl®, 2019, <https://www.zf-laser.com/> (5th March 2019)