Fotogrammetria UAV low-cost e open source per il controllo tecnico-ambientale di cantieri produttivi: applicazione al caso dello stabilimento AL.MAR. di Acireale

Marco Leone[1], Patrizia Spicuzza[1], Massimiliano Russo[1], Giovanni Castorina[2], Stefano Avanzato[3]

[1] Studio Tecnico Leone, studio.tecnico.leone@gmail.com
[2] AL.MAR. di Castorina Luigi Alberto S.r.l., marealmarsrl@gmail.com
[3] Ingegneria Costruzioni Colombrita, stefano.avanzato@costruzionicolombrita.it

Abstract. Nel presente lavoro viene testata una procedura per il confronto di DSM multitemporali ottenuti da rilievi UAV low-cost, attraverso il caso studio del cantiere AL.MAR. di Acireale. La piattaforma open source WebODM utilizzata ha consentito l'elaborazione fotogrammetrica delle immagini, mentre la procedura Multitemporal Raster Volume Comparison (MRVC), sviluppata in ambiente GIS e Python, ha permesso di quantificare le variazioni altimetriche e i volumi di scavo e riporto a supporto dei SAL.

Parole chiave: WebODM, MRVC, UAV, DSM, open source, volumi di scavo.

1 Introduzione

Il controllo tecnico-ambientale dei cantieri produttivi richiede strumenti capaci di documentare le trasformazioni morfologiche del terreno, verificare l'avanzamento delle lavorazioni e fornire riscontri quantitativi sui volumi movimentati.

La fotogrammetria mediante UAV consente acquisizioni periodiche ad alta risoluzione, con tempi e costi contenuti. La diffusione di droni consumer ha progressivamente ridotto i costi di acquisizione dei dati, mentre l'impiego di software specialistici proprietari può ancora rappresentare una voce economica significativa per studi professionali e piccole imprese.

Un contributo importante all'accessibilità di queste tecnologie è rappresentato da WebODM, piattaforma open source per l'elaborazione fotogrammetrica delle immagini acquisite mediante UAV. Dal 6 aprile 2026, WebODM ha intrapreso un percorso di sviluppo autonomo rispetto a OpenDroneMap, introducendo un motore di elaborazione dedicato, denominato ODX [7]. Questa evoluzione rappresenta un ulteriore passo verso la diffusione di strumenti fotogrammetrici aperti, capaci di produrre ortofoto, nuvole di punti e modelli digitali della superficie, favorendo l'interoperabilità dei dati e il contenimento dei costi di elaborazione.

Il presente lavoro esamina l'applicazione della fotogrammetria UAV low-cost al monitoraggio tecnico-ambientale del cantiere dello stabilimento AL.MAR. di Acireale (CT), mediante acquisizioni effettuate con un drone consumer DJI Mavic Air di prima generazione, introdotto sul mercato nel 2018.



Fig. 1. UAV DJI Mavic Air

L'esperienza si inserisce nel percorso di sperimentazione già avviato nell'impiego di UAV non professionali per applicazioni ingegneristiche, con particolare riferimento al rilievo fotogrammetrico a supporto della modellazione idraulica presentato alla Conferenza Nazionale ASITA del 2019 [8].

Nell'ambito dello studio è stata sviluppata una procedura denominata Multitemporal Raster Volume Comparison (MRVC), finalizzata al confronto di modelli digitali della superficie (DSM) acquisiti in differenti fasi di lavorazione. La metodologia integra strumenti GIS e script Python per l'analisi delle variazioni altimetriche e il calcolo automatico dei volumi di scavo e riporto, fornendo un supporto quantitativo alla documentazione tecnico-contabile degli stati di avanzamento dei lavori (SAL). L'obiettivo del contributo è illustrare le potenzialità di una filiera tecnologica basata sull'integrazione tra UAV consumer, elaborazione fotogrammetrica open source mediante WebODM e procedura MRVC.

Le elaborazioni fotogrammetriche di confronto del caso studio sono state effettuate mediante Agisoft Metashape Professional, utilizzato come riferimento per le attività di controllo.

2 Area di studio e dati disponibili

Il caso studio riguarda il cantiere dello stabilimento AL.MAR. ad Acireale (CT), interessato da bonifica, livellamento, sbancamenti e realizzazione delle fondazioni.

La metodologia proposta è articolata in tre fasi: acquisizione delle immagini mediante UAV consumer, elaborazione fotogrammetrica con WebODM e confronto volumetrico dei DSM attraverso lo script Python Multitemporal Raster Volume Comparison (MRVC).

I rilievi UAV consumer sono stati organizzati in una fase A, con cinque acquisizioni progressive AR1–AR5, e una successiva fase B relativa agli scavi per le fondazioni. Il confronto multi temporale riguarda i DSM AR1-5 e il DSM BR1.

I dati elaborati comprendono DSM, ortofoto georeferenziate, report fotogrammetrici, perimetri di analisi e documentazione tecnico-contabile. I raster sono riferiti a WGS 84 / UTM zona 33N (EPSG:32633). Il poligono di controllo si estende per circa 6.025 m², ma la superficie effettivamente confrontabile è limitata alla copertura comune dei due modelli. I materiali di scavo depositati in aree esterne alla copertura del rilievo della fase A non sono stati quantificati direttamente mediante il confronto differenziale dei DSM AR5–BR1, in assenza di una superficie altimetrica iniziale di riferimento.

Tali depositi saranno pertanto valutati separatamente ai fini della ricostruzione del bilancio complessivo dei materiali movimentati.

Le acquisizioni della fase A sono state elaborate ottenendo ortofoto e modelli digitali della superficie ad alta risoluzione spaziale.

Le campagne hanno prodotto mediamente circa 400 immagini per rilievo, con GSD di 6,00 mm/pixel e risoluzione spaziale del DSM di 0,80 cm/pixel. È riportato un RMSE complessivo sui punti di controllo di circa 4,00 cm, da considerare nell'interpretazione metrica dei risultati.

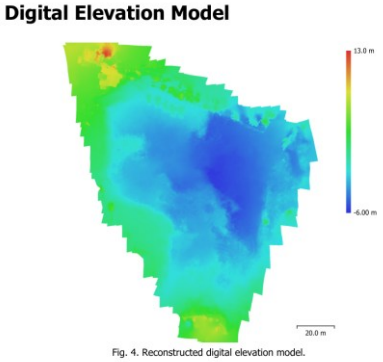

Fig. 2. Modello digitale di elevazioni - Fase A (rapporto Metashape 8 febbraio 2026)

3 Metodologia MRVC (Multitemporal Raster Volume Comparison)

La metodologia proposta prevede l'acquisizione fotogrammetrica, la ricostruzione di ortofoto e DSM e il confronto quantitativo fra differenti epoche di rilievo.

3.1 Acquisizione ed elaborazione fotogrammetrica con WebODM

Le riprese sono state effettuate con DJI Mavic Air di prima generazione, dotato di fotocamera da 12 MP, sensore CMOS da 1/2,3" e risoluzione fotografica di 4056 × 3040 pixel. La pianificazione dei voli è stata svolta mediante Map Pilot, per definire le traiettorie di volo e la sovrapposizione delle immagini. Sono state effettuate riprese con quota di 20-25 m e sovrapposizioni dell'80% longitudinale e del 70% trasversale.

WebODM ha consentito di gestire il processo fotogrammetrico dalla serie d'immagini alla nuvola di punti, all'ortofoto e al DSM. Successivamente l'esportazione dei prodotti georeferenziati ha permesso la successiva elaborazione in ambiente GIS e Python.

Per il caso applicativo, i DSM sottoposti ad analisi MRVC derivano anche da "Agisoft Metashape Professional" assunto quale riferimento tecnico di controllo.

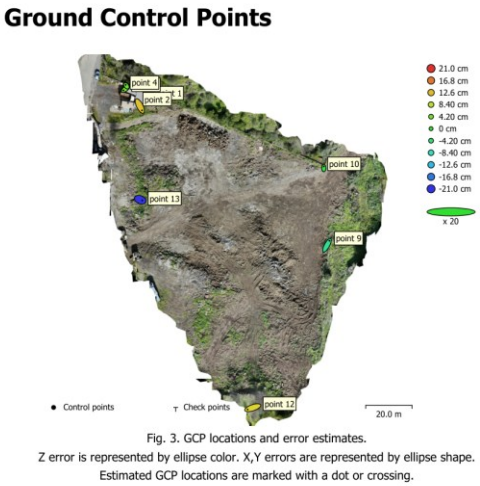

Fig. 3. Distribuzione dei punti di controllo e residui altimetrici nel report - fase A.

3.2 Sviluppo dello script Python MRVC con il supporto dell'intelligenza artificiale

Lo sviluppo dello script Python Multitemporal Raster Volume Comparison (MRVC) si è avvalso delle potenzialità offerte dall'intelligenza artificiale generativa quale strumento di supporto alla programmazione e all'implementazione degli algoritmi di elaborazione raster. Nello specifico, è stato utilizzato ChatGPT, sviluppato da OpenAI, per la scrittura del codice Python. Tale approccio ha consentito di tradurre le operazioni di analisi geospaziale in una procedura computazionale automatizzata.

Lo script MRVC è stato sviluppato con l'obiettivo di automatizzare il confronto altimetrico tra modelli digitali della superficie acquisiti in epoche successive, consentendo la quantificazione distinta dei volumi di scavo e riporto e la produzione di elaborati cartografici e risultati numerici a supporto del monitoraggio e della contabilizzazione delle lavorazioni.

La procedura MRVC è stata articolata in sei operazioni: (i) lettura dei DSM georeferenziati in formato GeoTIFF; (ii) verifica del sistema di riferimento, della risoluzione e dell'allineamento delle griglie, con eventuale ricampionamento; (iii) definizione del dominio comune mediante maschere delle celle valide e del poligono di analisi; (iv) eventuale correzione del dislivello sistematico stimato su superfici stabili; (v) calcolo della differenza altimetrica cella per cella e applicazione della

soglia di significatività; (vi) integrazione dei contributi volumetrici ed esportazione della mappa differenziale e del rapporto quantitativo.

Il dominio di analisi Ω è stato individuato mediante l'intersezione fra il poligono di analisi e le celle valide dei due DSM, preventivamente riferiti alla medesima griglia. Per ogni cella *i* è stata calcolata la differenza altimetrica $\Delta h_i = zAR5_{,i} - zBR1_{,i}$, assumendo valori positivi per gli abbassamenti del terreno (scavi) e negativi per gli innalzamenti (riporti). È stata adottata una soglia di significatività $\tau = 0{,}30$ m, al fine di selezionare le variazioni altimetriche considerate rilevanti. I volumi sono stati determinati integrando le differenze altimetriche selezionate rispetto all'area planimetrica delle celle.

$V_scavo = \Sigma_\{i \in \Omega,\ \Delta h_i > \tau\}\ (\Delta h_i \cdot A_i)$
$V_riporto = \Sigma_\{i \in \Omega,\ \Delta h_i < -\tau\}\ (-\Delta h_i \cdot A_i)$

Le due componenti volumetriche sono state quantificate separatamente, mentre il volume netto di scavo è stato ottenuto sottraendo il volume dei riporti da quello complessivo degli scavi.

Nel confronto AR5–BR1 è stato stimato un volume netto di scavo pari a circa 9.162 m³. Di seguito è riportato un estratto illustrativo del codice Python MRVC, riferito a DSM già allineati sulla medesima griglia:

```
valid = np.isfinite(z0) & np.isfinite(z1) & mask
dh = z0 - z1
V_scavo = np.sum(dh[valid & (dh > tau)]) * area_cella
V_riporto = np.sum(-dh[valid & (dh < -tau)]) * area_cella
V_netto = V_scavo - V_riporto
```

L'attendibilità della stima volumetrica viene considerata in relazione all'accuratezza altimetrica dei DSM, alla qualità della registrazione geometrica e alle eventuali interpolazioni necessarie per la ricostruzione delle superfici.

3.3 Scavo, riporto e gestione delle aree non confrontabili

Le aree prive di copertura comune, inclusa quella di deposito a nord-est, sono escluse dal calcolo differenziale: senza superficie iniziale non è possibile quantificare direttamente il materiale accumulato. MRVC restituisce variazioni geometriche in banco, non un bilancio di massa né il volume sciolto trasportato. La riproducibilità richiede la conservazione dei DSM, delle maschere, delle impostazioni di griglia e soglia e dei parametri di registrazione.

È prevista l'integrazione della procedura in un'applicazione dedicata, da distribuire con licenza open source attraverso il sito https://www.marealmar.it/.

4 Risultati del caso applicativo

L'applicazione della procedura Multitemporal Raster Volume Comparison (MRVC) al cantiere AL.MAR. ha consentito di ricostruire le principali trasformazioni morfologiche intervenute durante le successive fasi di sbancamento e preparazione delle fondazioni.

Il confronto tra i modelli digitali della superficie AR5 e BR1, esteso a un'area di analisi di circa 6.025 m², ha evidenziato le variazioni altimetriche negative, riconducibili alle operazioni di scavo. Applicando una soglia di significatività di 0,30 m, sono stati stimati circa 9.244 m³ di scavo e 82 m³ di riporto, corrispondenti a un volume netto di scavo di circa 9.162 m³. Ai fini della documentazione tecnico-contabile del primo SAL della fase B è stato adottato un valore prudenziale di circa 9.200 m³.

La rappresentazione cartografica delle differenze altimetriche evidenzia un abbassamento particolarmente marcato nel settore meridionale del lotto, interessato dalle operazioni di scavo del banco lavico. La distribuzione spaziale delle variazioni permette di individuare le aree maggiormente trasformate e di associare le quantità volumetriche alle effettive lavorazioni eseguite.

Un ulteriore riscontro è fornito dalla documentazione relativa al SAL del periodo 29 gennaio–5 febbraio 2026, riferito alla precedente fase A. In tale occasione, il rilievo fotogrammetrico ha consentito di documentare una movimentazione complessiva di circa 2.523 m³, con quantità contabili di 2.300 m³ di scavo e 200 m³ di riporto. Il materiale sciolto è stato stimato in circa 2.669 m³, corrispondenti a 137 viaggi di trasporto. Il rapporto tra volume sciolto e volume di scavo in banco restituisce un coefficiente operativo di scompattamento pari a circa 1,16.

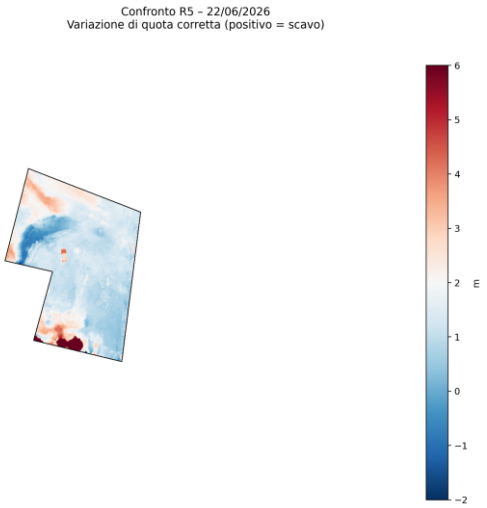

Fig. 4. Mappa delle differenze altimetriche AR5–BR1

L'ultimo riscontro tecnico è stato ottenuto dall'analisi comparativa con il giornale dei lavori relativo al periodo 12 maggio–1 luglio 2026, nel quale risultano annotate quantità operative complessive pari a circa 12.415 m³. Lo scostamento rispetto al volume geometrico di scavo, stimato mediante analisi differenziale dei DSM in circa 9.240 m³, è attribuibile alla diversa natura delle grandezze considerate e ai rispettivi domini di misurazione. Le quantità registrate dall'impresa comprendono infatti operazioni di estrazione, movimentazione interna e lavorazioni accessorie, mentre il metodo MRVC quantifica esclusivamente le variazioni volumetriche comprese nel dominio spaziale comune ai rilievi AR5 e BR1. L'analisi fotogrammetrica ha pertanto consentito di determinare un volume geometrico indipendente dalle stime operative di cantiere, fornendo un riferimento quantitativo oggettivo a supporto della contabilizzazione del primo SAL della fase B.

Nel complesso, i risultati ottenuti evidenziano la validità applicativa della metodologia proposta, dimostrando come l'integrazione tra rilievi UAV, elaborazione fotogrammetrica open source e analisi volumetrica mediante MRVC possa fornire riscontri quantitativi utili e tecnicamente coerenti con le esigenze di monitoraggio e contabilizzazione delle lavorazioni di cantiere.

5 Conclusioni

L'esperienza condotta presso il cantiere dello stabilimento AL.MAR. di Acireale ha evidenziato le potenzialità della fotogrammetria open source con droni consumer, anche di prima generazione, per il monitoraggio delle trasformazioni morfologiche del terreno e per il supporto alle attività di verifica tecnico-contabile.

L'elaborazione delle immagini eseguita mediante la piattaforma open source WebODM disponibile all'indirizzo https://webodm.org, ha consentito di ricostruire nuvole di punti, ortofoto e modelli digitali della superficie, rendendo disponibili dati georeferenziati per le successive analisi in ambiente GIS.

La disponibilità del codice sorgente, l'interoperabilità dei formati e l'evoluzione autonoma della piattaforma avviata nell'aprile 2026 [7] ne confermano l'interesse per applicazioni di monitoraggio periodico, anche in contesti professionali caratterizzati da risorse economiche e strumentali limitate. Il riferimento tecnico impiegato per le verifiche delle elaborazioni fotogrammetriche è stato Agisoft Metashape Professional.

Per automatizzare il confronto altimetrico fra DSM acquisiti in epoche successive è stato sviluppato, mediante ChatGPT basato sul modello GPT-6 di OpenAI, lo script Python Multitemporal Raster Volume Comparison (MRVC), mediante il quale è stata eseguita l'integrazione delle operazioni di allineamento delle griglie, la delimitazione delle superfici confrontabili, la gestione dei dati non validi e l'applicazione delle soglie altimetriche. Ciò ha consentito di quantificare separatamente i volumi di scavo e riporto e il confronto con la documentazione giornaliera delle lavorazioni ha ulteriormente evidenziato l'utilità dell'analisi fotogrammetrica quale strumento di riscontro quantitativo indipendente dalle stime operative dell'impresa.

Pur considerando le incertezze proprie delle ricostruzioni tridimensionali e le limitazioni derivanti dalla copertura spaziale dei rilievi, i risultati ottenuti confermano

l'efficacia applicativa della metodologia nel documentare l'evoluzione morfologica del cantiere e nel fornire elementi oggettivi a supporto della contabilizzazione dei lavori.

Gli sviluppi successivi riguarderanno l'integrazione delle funzionalità MRVC in un'applicazione dedicata, destinata alla distribuzione con licenza open source attraverso il sito https://www.marealmar.it.

Nel complesso, l'integrazione fra acquisizioni UAV low-cost, elaborazione fotogrammetrica mediante WebODM e analisi volumetrica automatizzata con MRVC ha dimostrato la concreta applicabilità di una procedura tecnologica accessibile per il controllo tecnico-ambientale dei cantieri produttivi, con particolare riferimento alla documentazione delle trasformazioni del terreno e alla quantificazione delle lavorazioni eseguite.

Riferimenti bibliografici

1. OpenDroneMap contributors. OpenDroneMap, progetto open source per la fotogrammetria da immagini aeree. https://www.opendronemap.org/.
2. Schönberger, J.L., Frahm, J.-M. (2016). Structure-from-Motion Revisited. Proceedings CVPR, 4104–4113.
3. James, M.R., Robson, S. (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: accuracy and geoscience application. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 117, F03017.
4. Documentazione tecnica AL.MAR. (2026). Stato avanzamento lavori.
5. Agisoft LLC (2026). Metashape Processing Report, 8 febbraio 2026 (rapporto tecnico di campagna, 9 pp.).
6. WebODM contributors. WebODM, interfaccia e strumenti per elaborazioni fotogrammetriche UAV. https://webodm.org/.
7. Toffanin, P. (2026). WebODM has officially decoupled from OpenDroneMap, 6 aprile 2026. https://webodm.org/blog/announcement/
8. Laudani Fichera, D., Pulvirenti, G., Spicuzza, P., Leone, M., Vecchio Nicosia, F. (2019). Il rilievo fotogrammetrico da SAPR a supporto della modellazione idraulica. XXIII Conferenza Nazionale ASITA, Trieste, 12–14 novembre 2019.