

Monitoraggio RPAS delle dune embrionali di Rosolina Mare (Alto Adriatico)

Yuri Taddia¹, Corinne Corbau², Elena Zambello¹, Valentina Russo,
Alberto Pellegrinelli¹, Paolo Russo¹ e Umberto Simeoni²

¹Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara, via Saragat, 1 – 44122 Ferrara,
e-mail yuri.taddia@unife.it, elena.zambello@unife.it, alberto.pellegrinelli@unife.it paolo.russo@unife.it

²Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara, via Saragat, 1 – 44122 Ferrara,
e-mail corinne.corbau@unife.it, umberto.simeoni@unife.it, ing.valentinarusso@gmail.com

Riassunto

In questo lavoro è presentato lo studio dell'evoluzione geomorfologica di un complesso sistema di dune embrionali nel litorale veneto, nel tratto compreso tra le località di Rosolina Mare e Porto Caleri. Il monitoraggio è stato eseguito per mezzo di un sistema aereo a pilotaggio remoto (RPAS). In particolare sono mostrati i risultati ottenuti dal confronto dei primi due rilievi eseguiti rispettivamente nei mesi di novembre 2015 e marzo 2016. L'acquisizione del dato aerofotogrammetrico è avvenuta utilizzando un DJI Phantom 2 ed un DJI Phantom 3, dotati di fotocamere in assetto nadirale. Le immagini sono state realizzate con una sovrapposizione pari a 80% nella direzione di volo e pari a 60% in quella trasversale. Allo scopo di georiferire le immagini nel sistema di riferimento internazionale ETRF2000(2008.0) sono stati disposti a terra appositi target, rilevati tramite strumentazione GNSS in modalità NRTK (Network Real Time Kinematic), ben visibili nelle immagini e che racchiudono l'area monitorata. Con l'elaborazione delle immagini acquisite è stato costruito un modello tridimensionale, sfruttando i principi della *Structure from Motion* (SfM) ed utilizzando il software Agisoft PhotoScan. Sono state ottenute sia le nubi dense di punti sia le ortofoto relative a ciascuno dei rilievi eseguiti. Inoltre, applicando un algoritmo basato sul riconoscimento delle pendenze, sono stati riconosciuti i punti appartenenti alla vegetazione. Dai modelli digitali di elevazione del terreno (DEM) sono stati ricavati i profili trasversali e longitudinali della spiaggia, la mappatura delle morfologie legate all'ingressione marina ed all'azione eolica; infine dal confronto dei DEM è stato computato il bilancio sedimentario dell'area.

Parole chiave: evoluzione geomorfologica, foredunes, Sistema Aereo a Pilotaggio Remoto (SAPR), Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Structure from Motion (SfM), Agisoft PhotoScan

Abstract

This work concerns the study of the geomorphological evolution of a complex system of embryonic dunes in the Veneto coast between the towns of Rosolina Mare and Porto Caleri, by monitoring over time performed by the relief through a remotely piloted aircraft system (RPAS).

In particular it shows the results obtained from the comparison of the first two surveys carried out, in the months of November 2015 and March 2016.

The acquisition of the aerial photogrammetric data occurred performing some flights with a DJI Phantom 2 and a DJI Phantom 3 with cameras in nadir arrangement, ensuring an overlap equal to 80% in the flight direction and a 60% laterally. In order to refer our survey in the international reference system (frame) ETRF2000(2008.0), appropriate targets (well visible in the images) were placed on the ground in order to almost completely enclose the monitored area within them; these targets were detected by GNSS devices in NRTK mode (Network Real Time Kinematic).

The processing of captured images consisted in the reconstruction of a three-dimensional model using the principles of the Structure from Motion; the Agisoft PhotoScan software was used to perform this kind of process. Both the dense clouds of points and orthophotos relative to each survey performed were obtained.

In particular it has been possible to classify the points distinguishing between those actually belonging to the ground and those who are part of the vegetation by the application of an algorithm based on the slope detection. Digital terrain elevation models (DEMs) were then generated, from which it was possible to extract a lot of information, from the reconstruction of longitudinal and cross sections profiles to the mapping of marine ingression or eolic channels; through their comparison was possible to analyze changes in terms of erosion, sedimentation and wind provision.

Finally, thanks to high resolution orthophotos, it was possible to classify the various species of vegetation present, further information can improve the knowledge of the complex study of the subject dune system.

Keywords: *embryo dunes, geomorphological evolution, foredunes, Remotely Piloted Aircraft System (RPAS), Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Structure from Motion (SfM), Agisoft PhotoScan*

Premessa

L'ambiente costiero sabbioso è in rapida e continua evoluzione ed è facilmente influenzato da molti fattori naturali e antropici. Le spiagge presentano spesso un sistema di dune vegetate che svolge una moltitudine di diverse e preziose funzioni per l'ecosistema: protezione contro l'ingressione del mare durante le mareggiate; riserva di sedimenti per mitigare l'erosione degli arenili; nicchia ecologica per flora e fauna. In un contesto evolutivo naturale le avandune sono precedute da dune embrionali che presentano una elevata dinamica. Proprio a causa dell'importanza di queste ultime ed allo scopo di seguirne e comprenderne l'evoluzione, in questo studio si illustra una tecnica basata sulla fotogrammetria aerea da drone (Gonçalves e Henriques, 2015), tecnica innovativa ed a basso costo (Westoby et al, 2012).

Il sito oggetto del monitoraggio (Fig. 1) è la parte meridionale (3 km di lunghezza) di Rosolina Mare, nella zona di Porto Caleri. La spiaggia è ampia fino ad un centinaio di metri ed è delimitata verso terra da un'articolata fascia dunale, costituita da dune fossili stabilizzate, avandune vegetate e dune embrionali. L'ambiente retrodunale è caratterizzato dalla presenza di depressioni infradunali in cui le acque meteoriche si raccolgono consentendo lo sviluppo di una particolare vegetazione igrofila. Le dune stabilizzate sono ricoperte da una macchia di piante cespugliose che precede spazialmente le formazioni arboree, il bosco di leccio o le pinete di origine artificiale (Regione Veneto, 2011). L'appartenenza di questo tratto costiero al "Giardino Botanico Litoraneo" di Porto Caleri, esteso circa 23 ha, garantisce la conservazione ed evoluzione naturale di questi ambienti dunali.

Negli ultimi 50 anni il litorale meridionale di Rosolina Mare, in cui è situato il tratto di spiaggia in

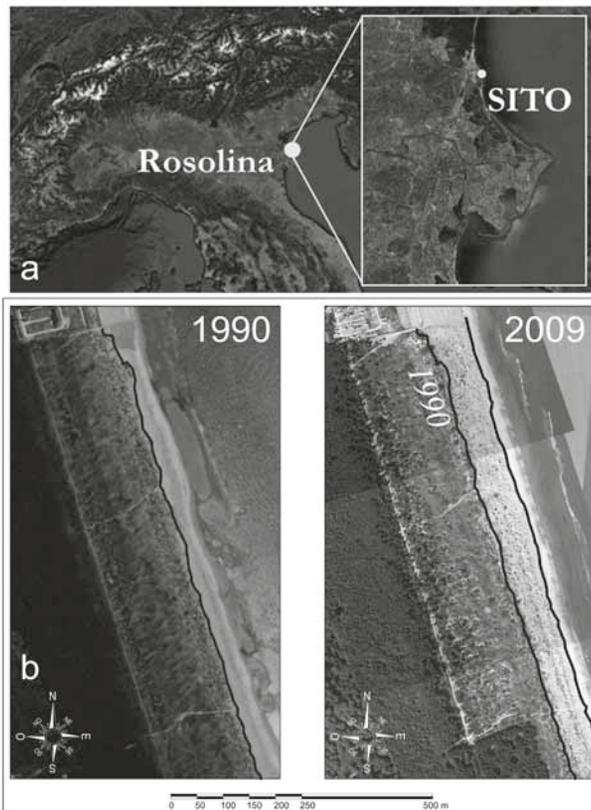


Figura 1. a) inquadramento geografico dell'area di studio; b) progredazione del limite delle dune embrionali nel periodo 1990-2009.

esame, è stato caratterizzato da una significativa progradazione della linea di riva, con valori massimi di 5 metri all'anno e presenta pertanto un evidente avanzamento della linea di costa. In Figura 1 è possibile osservare l'avanzamento del limite delle dune embrionali nell'arco di circa venti anni, da fotografie aeree ed immagini satellitari; tipologie di indagine basate sul telerilevamento, spesso condotte con riferimento all'evoluzione della linea di costa, sono note in letteratura (Alesheikh et al, 2007). Tale fenomeno di progradazione è tutt'ora attivo.

Tecnica di rilievo adottata

Allo scopo di rilevare e ricostruire la morfologia del sistema di dune, si è utilizzato il rilevamento aerofotogrammetrico da drone (Casella et al, 2016). Tale scelta è stata dettata dalle potenzialità offerte da tale tecnica quali la rapidità nell'acquisizione dei singoli fotogrammi, la possibilità di ottenere immagini ad elevatissima risoluzione (Wulder et al, 2004), con dimensioni del pixel a terra (o, più correttamente, di Ground Sample Distance) comprese tra 1 e 2 centimetri, nonché il basso costo. In particolare sono stati utilizzati un DJI Phantom 2 e un DJI Phantom 3 equipaggiati rispettivamente con fotocamere Panasonic Lumix DMC-GM1 con sensore RGB da 16 Megapixel e DJI FC300X con sensore RGB da 12 Megapixel.

L'intero rilievo è stato inquadrato all'interno del sistema di riferimento internazionale ETRF2000(2008.0), materializzato, in Italia, dalla Rete Dinamica Nazionale (RDN): sono stati infatti disposti quattordici target (Fig. 2), distribuiti sul terreno in maniera tale da racchiudere pressoché completamente al loro interno la zona oggetto di studio (Fig. 3). I target, ben visibili nelle immagini aeree, sono stati rilevati con strumentazione GNSS in modalità NRTK (Network Real Time Kinematic). Le precisioni raggiungibili attraverso un rilievo cinematico "stop and go" con correzioni trasmesse in tempo reale da una rete di stazioni permanenti (in particolare quella ItalPoS) sono infatti sufficienti e pienamente compatibili con le precisioni di un modello tridimensionale da fotogrammetria aerea; viene in tal modo eliminata anche la necessità di un post-processing per la determinazione delle coordinate plano-altimetriche dei target.

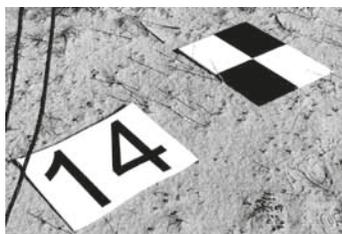


Figura 2. Esempio di target.

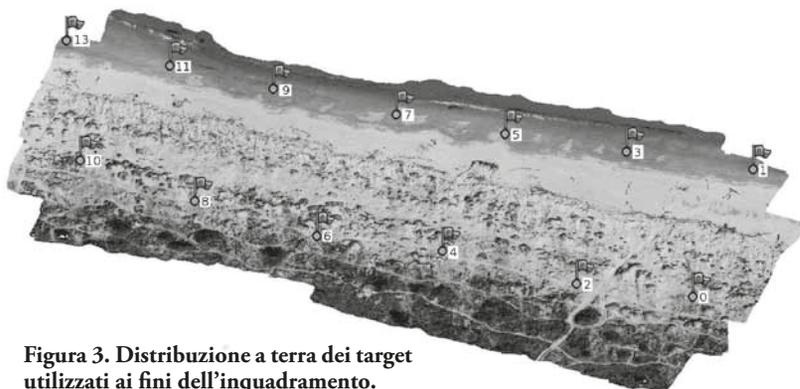


Figura 3. Distribuzione a terra dei target utilizzati ai fini dell'inquadramento.

Per eseguire l'acquisizione delle immagini, sono stati preparati opportuni piani di volo per ciascuna missione: a causa dell'estensione della zona, della quota di volo adottata (al fine di avere un GSD, come detto, compreso tra 1 e 2 centimetri) e dell'autonomia del drone legata alla capacità delle batterie, è stato necessario effettuare tre voli per ciascun rilievo. I principali parametri con cui è stato impostato ogni piano di volo sono i seguenti: quota di volo 40 metri, ricoprimento longitudinale 80%, ricoprimento trasversale 60%, velocità circa 3 m/s, fotocamera in assetto nadirale. Le impostazioni della fotocamera sono state invece modificate in funzione della luminosità al momento del volo.

Elaborazione delle immagini e ricostruzione del modello 3D

Acquisito l'intero set di immagini per il rilievo complessivo della zona oggetto del monitoraggio, le immagini sono state elaborate seguendo i principi della *Structure from Motion* (Mancini et al, 2013). Si tratta di un

insieme di tecniche sviluppate nell'ambito della disciplina della *computer vision*, implementate con successo all'interno della fotogrammetria digitale, con cui è possibile ricostruire una geometria tridimensionale mediante opportune sequenze di immagini (bidimensionali). Per effettuare questa operazione ci si è serviti del software Agisoft PhotoScan.

Il primo passo consiste nell'orientare i singoli fotogrammi nello spazio, in maniera tale da ricostruire la geometria della presa aerea (Fig. 4), sfruttando gli algoritmi di matching automatico e inserendo i Ground Control Points (GCPs), ovvero i target di coordinate note. Lo scarto quadratico medio (RMS) sull'orientamento è pari a 3.6 cm (valore minimo dei residui 1.1 cm, valore massimo dei residui 6.3 cm) per il rilievo di novembre e 1.9cm (residuo minimo 0.5 cm, residuo massimo 3.2 cm) per il rilievo di marzo.

Successivamente il software genera inizialmente una nube costituita dai soli punti omologhi individuati durante il matching stesso, mentre il risultato finale del processo di ricostruzione del modello tridimensionale consiste in una nuvola densa di punti (dense cloud) georeferenziata (Harwin e Lucieer, 2012) nello spazio. Tale nuvola di punti, tuttavia, segue fedelmente ciò che risulta visibile nelle immagini, compresa la vegetazione, la cui geometria va a falsare quella del terreno. Per eliminare questa problematica, è stato impiegato un algoritmo (presente all'interno del software Agisoft PhotoScan) in grado di riconoscere le variazioni di pendenza (slope detection) e procedere ad una classificazione di ciascun punto della nube, stabilendo se esso appartenga al terreno oppure no.

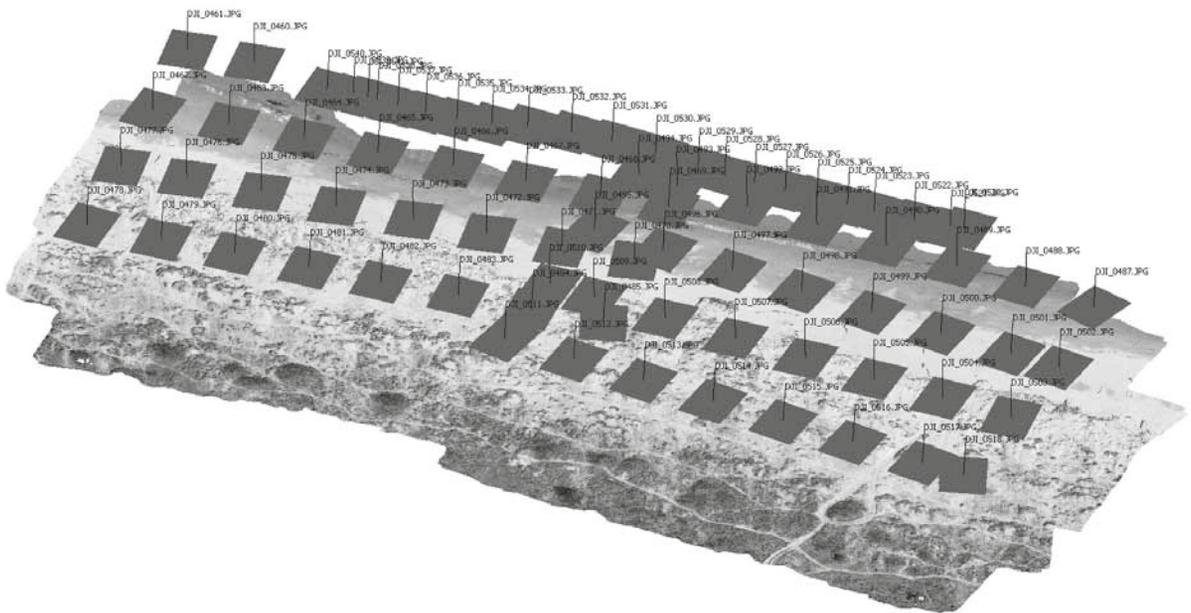


Figura 4. Ricostruzione della geometria di presa.

Tale algoritmo consiste di due fasi: nella prima, una volta individuate sul modello celle di prestabilite dimensioni (5 metri \times 5 metri), vengono assunti come punti certamente appartenenti al terreno quelli di quota minima tra tutti i punti appartenenti ad ogni cella, costruendo, di fatto, un modello digitale di elevazione del terreno (DEM) di massima; nella fase successiva si procede a classificare come appartenenti al terreno tutti quei punti in cui la pendenza del modello non superi un valore prestabilito (soglia) rispetto a punti già classificati come terreno, ovviamente iniziando il processo sulla base dei punti individuati nella fase precedente (Fig. 5).

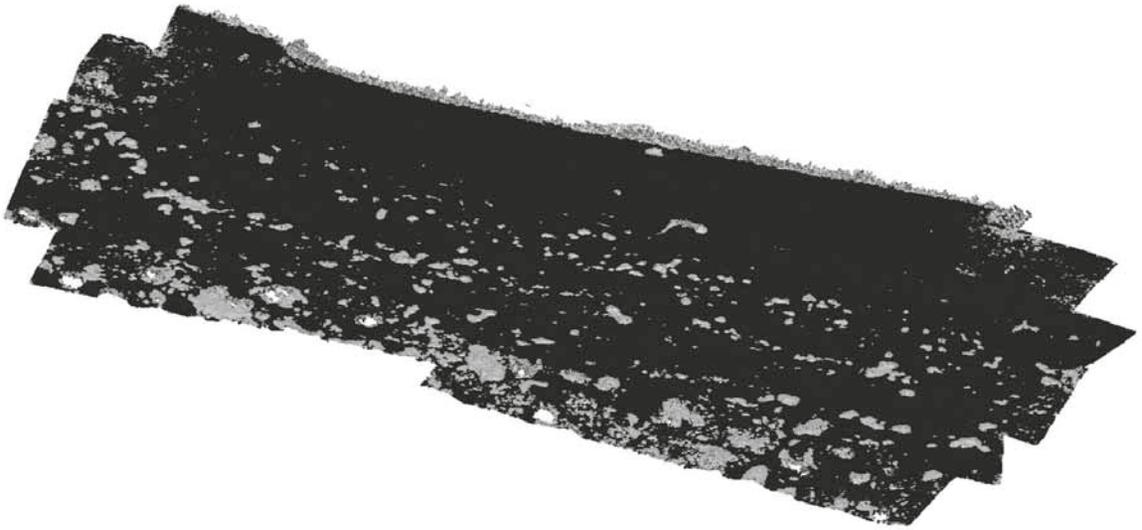


Figura 5. Classificazione dei punti appartenenti al terreno: in tonalità più scura i punti della classe “ground”, in tonalità chiara quelli non classificati.

Generazione del Modello Digitale di Elevazione del terreno (DEM)

Per ricostruire un modello più fedele alla reale morfologia del sistema di dune, poiché in corrispondenza della vegetazione non è possibile avere informazioni circa il terreno sottostante dalla nube di punti, sono stati rilevati contemporaneamente alle fasi di volo e acquisizione delle immagini una serie di punti in corrispondenza della vegetazione. Il rilievo è avvenuto con le stesse modalità adottate per i target, quindi in NRTK. Il dato è stato quindi utilizzato per integrare il modello tridimensionale (Fig. 6).

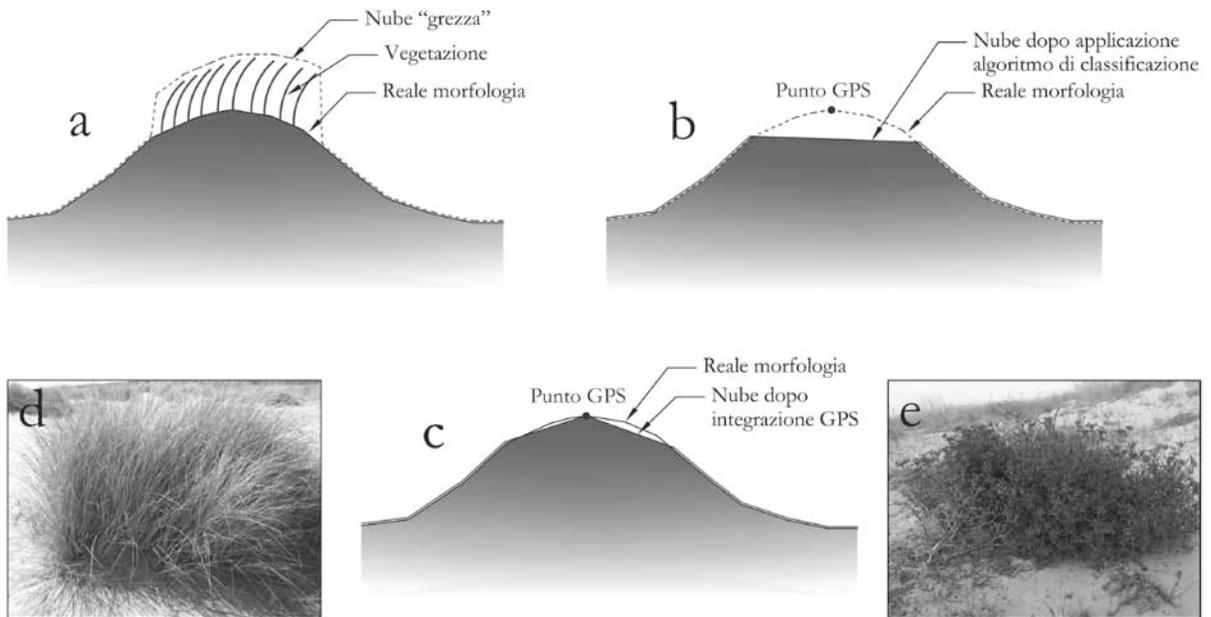


Figura 6. (a): Nuvola di punti “grezza”; (b): Applicazione dell’algoritmo di classificazione dei punti appartenenti al terreno; (c): Integrazione della nube con punti appositamente rilevati in NRTK in corrispondenza della vegetazione; (d): *Ammophila arenaria*; (e): *Echinophora spinosa*.

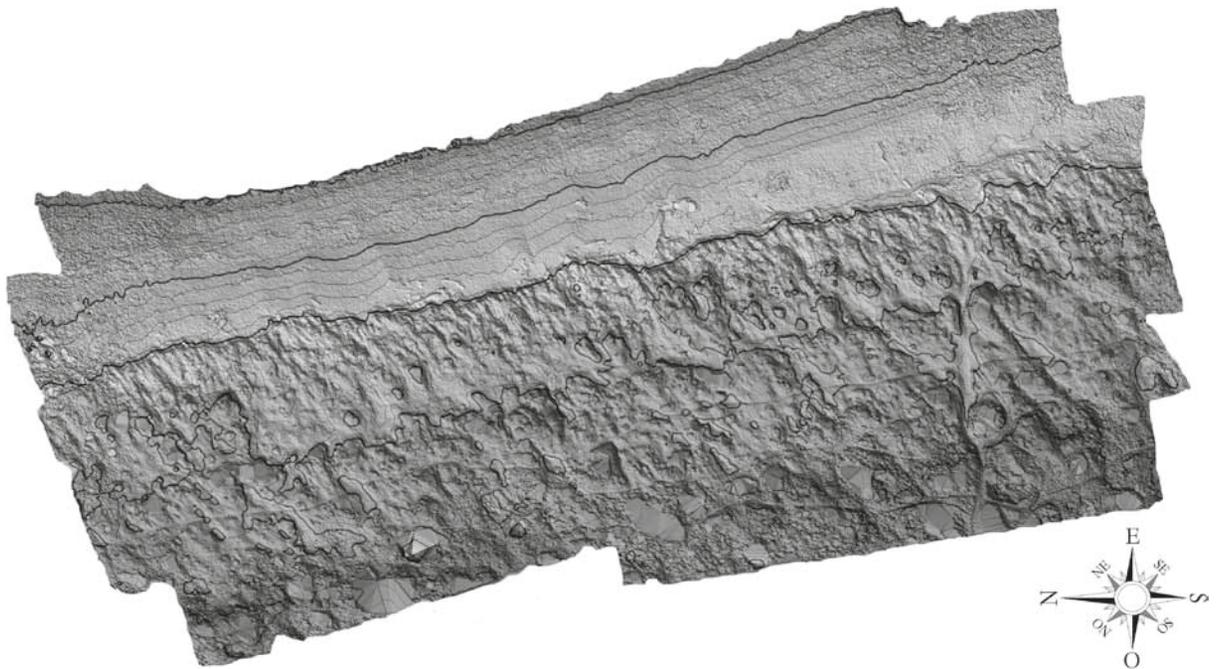


Figura 7. Modello Digitale di Elevazione del sistema di dune.

Da tale modello 3D è stato ricavato un Modello Digitale di Elevazione del terreno (DEM) con risoluzione del pixel pari a 4 cm, dal quale è possibile interpretare la morfologia del sistema di dune. Tale operazione è consistita dapprima nella creazione di una superficie attraverso una rete di triangoli (TIN) e successivamente nella generazione del DEM attraverso una procedura di interpolazione (Fig. 7). Il tutto è stato effettuato in ambiente GIS.

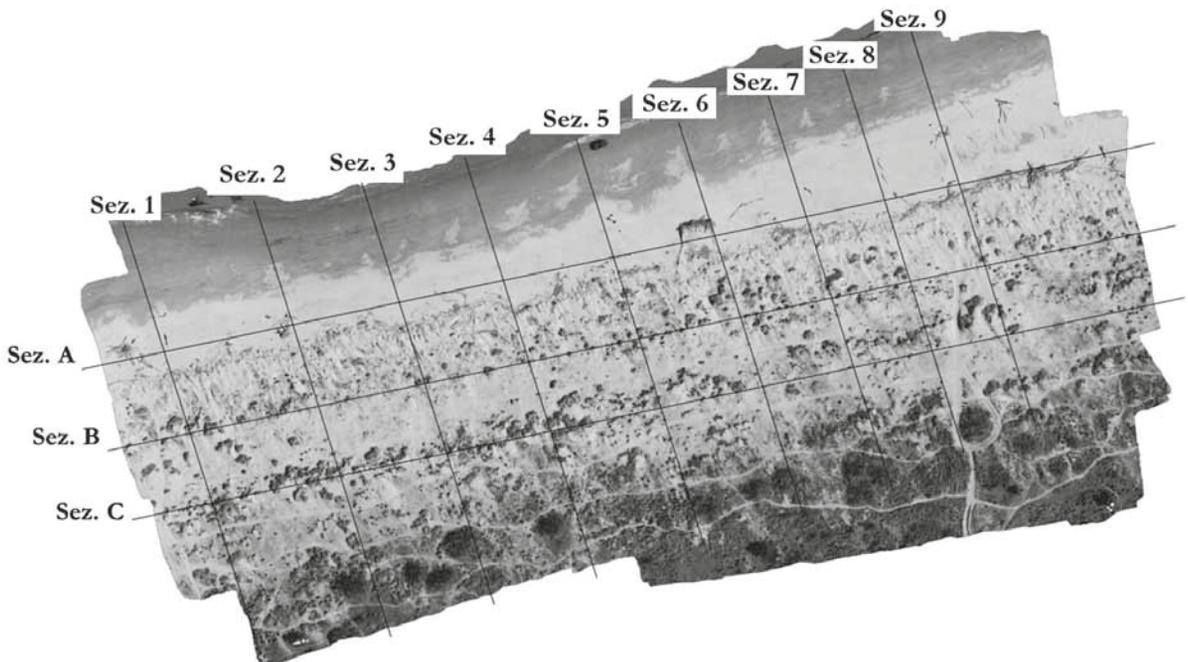


Figura 8. Sezioni longitudinali e trasversali in corrispondenza delle quali sono stati estratti i profili.

Utilizzando quest'ultimo modello, inoltre, è stato possibile estrarre i profili trasversali e longitudinali in corrispondenza di alcune sezioni (Fig. 8).

Validazione del modello

Il modello di elevazione del terreno è stato validato, per accertarne l'accuratezza (Hugenholtz et al, 2013), attraverso il confronto delle quote in corrispondenza di un set di punti appositamente rilevati (Fig. 9). Ancora una volta il rilievo di tali punti è stato fatto contemporaneamente alle operazioni di volo ed in modalità NRTK, ovviamente in maniera del tutto indipendente rispetto ai punti già utilizzati per l'integrazione della nube. Il confronto è stato effettuato avvalendosi del software CloudCompare. Sono emersi alcuni effetti sistematici, tuttavia la precisione è risultata essere molto buona, con un valore di deviazione standard pari 3.1 cm.

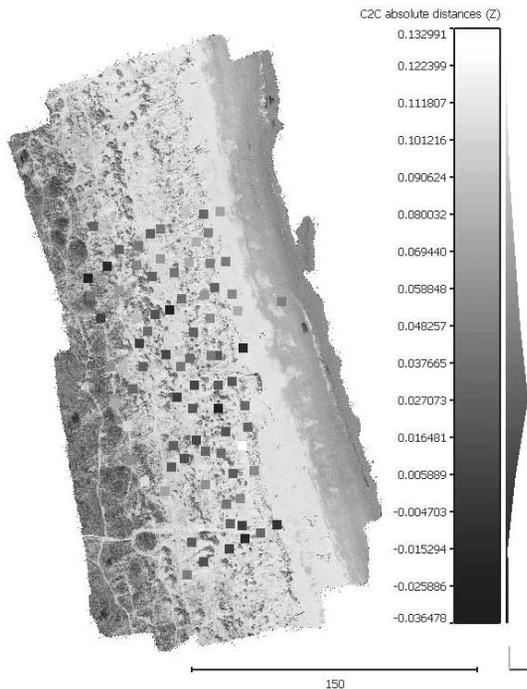


Figura 9. Validazione del DEM attraverso il confronto delle quote con un set di punti appositamente rilevato.

Confronto tra i due DEM

Generati i modelli digitali di elevazione del terreno per entrambi i rilievi, eseguiti rispettivamente nei mesi di novembre 2015 e marzo 2016, dopo aver proceduto alla loro validazione, essi sono stati direttamente confrontati per analizzare le variazioni geomorfologiche del sistema di dune. Tale confronto è stato effettuato sia attraverso la realizzazione di una mappa contenente le indicazioni circa le differenze di quota (Fig. 10), sia attraverso la sovrapposizione dei profili tracciati in corrispondenza delle sopra citate sezioni trasversali e longitudinali (Fig. 11).

Generazione delle ortofoto ad altissima risoluzione e mappatura della vegetazione

Dal modello tridimensionale, attraverso il set di immagini fotografiche acquisito durante i voli aerofotogrammetrici, è stato possibile elaborare ortofoto ad elevatissima risoluzione: si tratta di immagini dall'alto dell'intera zona monitorata, con risoluzione geometrica pari a 1-2 centimetri. Ciò ha permesso di realizzare una mappa delle differenti tipologie di vegetazione presente nell'ambiente costiero, unitamente alla classificazione dei materiali (ad esempio legnosi) depositati sulla spiaggia dal mare durante gli eventi di mareggiata (Fig. 12).

Legenda

confronto_marzo_novembre

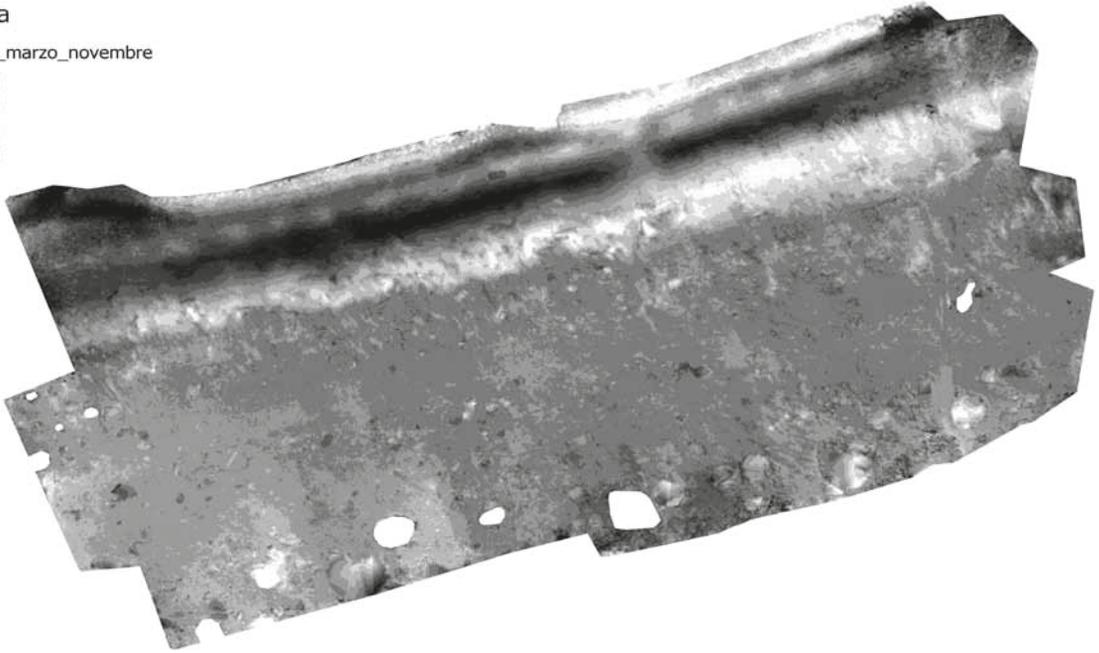
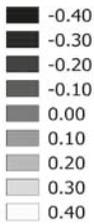


Figura 10. Confronto tra i modelli del terreno di novembre 2015 e marzo 2016.

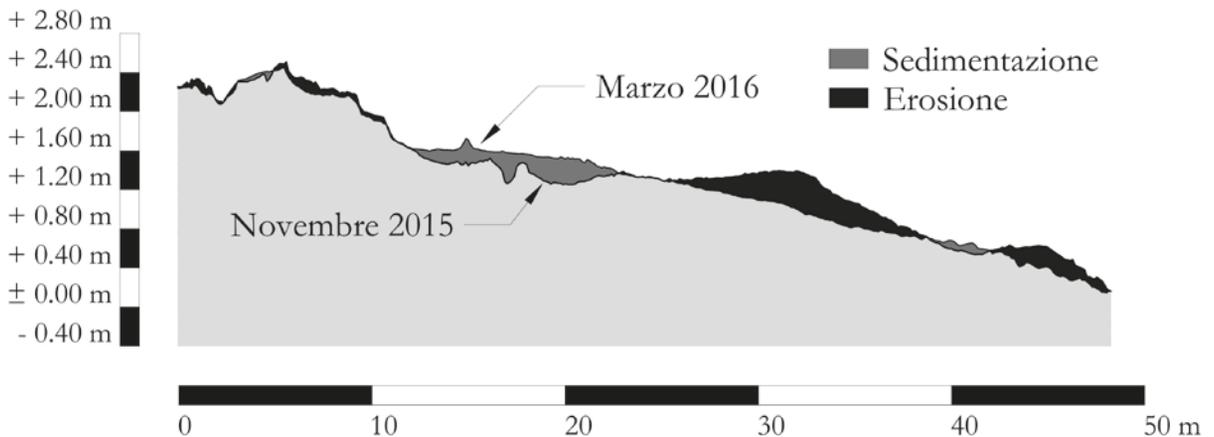


Figura 11. Esempio qualitativo di confronto tra i profili di novembre 2015 e marzo 2016.

La conoscenza della distribuzione spazio-temporale della singola specie botanica consente una migliore caratterizzazione dei limiti di ogni stadio di crescita e formazione della duna e permette di meglio comprendere l'evoluzione del sistema.

Primi risultati ottenuti

Da un punto di vista della tecnica di rilievo, il valore contenuto dei residui sull'orientamento (residuo massimo 6.3 cm, scarto quadratico medio massimo 3.6 cm) mostra come le precisioni raggiungibili attraverso l'impiego simultaneo della Structure from Motion e di strumentazione GNSS (in modalità NRTK) per l'inquadramento e l'integrazione dei dati mancanti nella nube di punti, siano compatibili con le dimensioni tipiche nella geomorfologia di un ambiente costiero dunale.

Legenda

| | |
|---|-----------------------|
|  | Ammophila arenaria |
|  | Arundo donax |
|  | Biomasse spiagciate |
|  | Cakile maritima |
|  | Echinophora spinosa |
|  | Eryngium maritimum |
|  | Fiori gialli |
|  | Inula crithmoides |
|  | Legna |
|  | Oenothera biennis |
|  | Vegetazione arbustiva |
|  | Xanthium orientale |
|  | Altro |

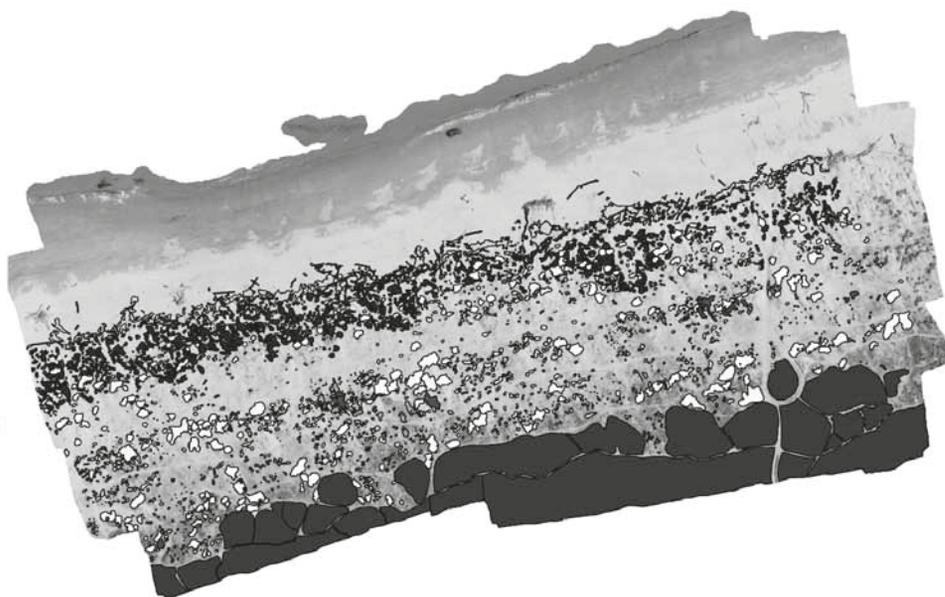


Figura 12. Realizzazione di una mappa della vegetazione grazie alle ortofoto ad altissima risoluzione.

L'analisi preliminare dei rilievi svolti ha rivelato la presenza di un complesso sistema di dune caratterizzato da:

- una parte superiore della spiaggia (circa 1.50-2.00 metri s.l.m.), costituita da isolate dune embrionali e dune coalescenti che si sviluppano lungo una sezione trasversale di circa 20-30 metri;
- una “depressione interdunale” di circa 10-20 metri;
- un secondo campo con una successione di avandune ben sviluppate.

I rilievi e le analisi condotte consentono di individuare nell'area delle dune embrionali 5 differenti zone (Fig. 13) caratterizzate dalla presenza di:

- 1) Dune embrionali poste ad una quota di circa 2 m sul l.m.m., a circa 50 metri della linea di riva, e coperte dalla prima vegetazione pioniera. Queste dune sono alte circa 0.4 m, con un'asse maggiore di circa 8 m ed una pendenza del fianco verso mare di circa 7°.
- 2) Dune embrionali vegetate dall'*Ammophila arenaria*, di dimensioni maggiori rispetto alle precedenti (asse maggiore 12 m, altezza 0.65 m) e una pendenza del fianco verso mare attorno a 6°. Successivamente si osserva una zona con scarsa vegetazione, ampia circa 15 m, caratterizzata da piccole increspature (ripples) eoliche.
- 3) Dune embrionali, ubicate a circa 85 m dalla linea di riva, relativamente stabilizzate dalla vegetazione; alte circa 0.60 m, con asse maggiore di circa 10 m e pendenza del fianco verso mare tra 6° e 9°.
- 4-5) Dune embrionali fissate dalla vegetazione con asse maggiore di 12-15 metri; altezza tra 0.70 m e 1.00 m e pendenza del fianco verso mare variabile tra 4° e 9°.

Inoltre i risultati mostrano che le dune embrionali più interne (gruppi 4 e 5) sono più strutturate e vegetate in confronto ai gruppi 1 e 2. D'altra parte risulta evidente come negli ultimi anni ci sia stata una progradazione della linea di riva. Si può quindi ipotizzare uno spostamento del sistema con la formazione di nuove embryo-dune. Infine, il bilancio dei sedimenti mostra una variazione pari a ± 0.30 m sulla spiaggia (bilancio negativo) e zone con dune incipienti (bilancio positivo), mentre si osserva stabilità o limitato accrescimento nella zona verso l'entroterra.

Conclusioni

Questo studio mostra come i sistemi a pilotaggio remoto possano essere utilizzati con successo nel rappresentare la distribuzione spaziale di dune embrionali costiere e nel monitoraggio del loro sviluppo. Tale tecnica consente

infatti di coniugare la precisione di un rilievo aerofotogrammetrico con il basso costo derivante dall'impiego dei droni. La semplicità di utilizzo, la rapidità e l'estrema versatilità sono altri punti di forza di questo sistema.

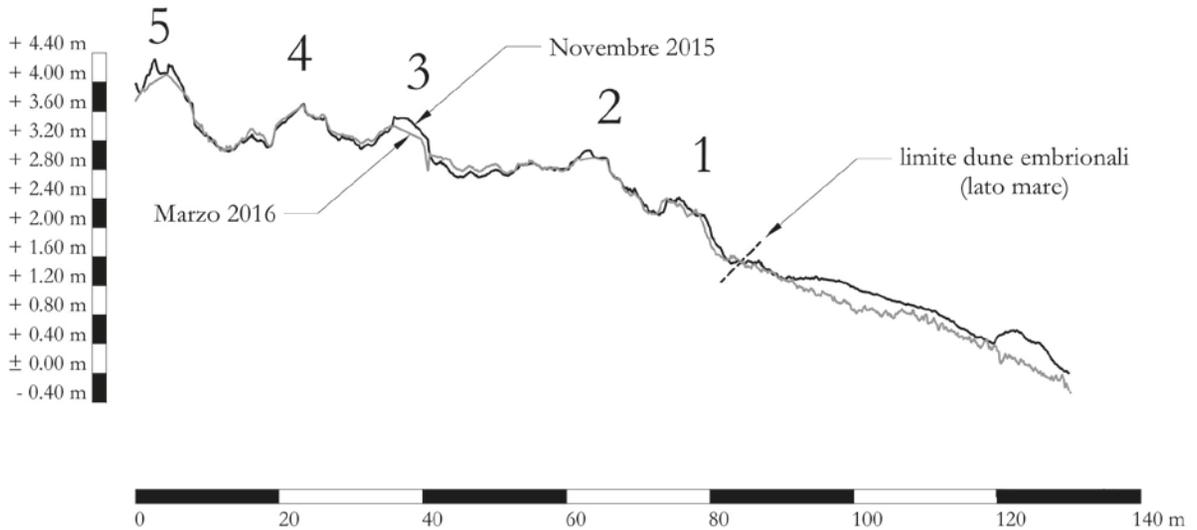


Figura 13. Confronto tra i rilievi effettuati lungo un profilo trasversale, con indicazione delle 5 differenti zone individuate.

Contrariamente ad un rilievo dei profili di sezioni trasversali con strumentazioni GNSS in modalità cinematica, la generazione di un modello di elevazione consente, a posteriori, l'estrazione di qualunque profilo in corrispondenza di qualsivoglia sezione. Inoltre l'impiego di sistemi a pilotaggio remoto non ha alcun impatto sull'ambiente costiero né sul sistema di dune, contribuendo a preservarne la loro completa integrità. Un altro significativo vantaggio di questo metodo è risultata essere la possibilità di ottenere informazioni sulla vegetazione (un fattore che influenza fortemente l'evoluzione delle dune costiere) grazie alla generazione di ortofoto ad elevatissima risoluzione.

L'uso delle ortofoto consente di raccogliere contemporaneamente dati di tipo fisico e biologico, nonché di analizzare la loro interazione, al fine di migliorare la gestione dei sistemi dunali costieri. Il nostro studio ha consentito una valutazione preliminare delle capacità di questa tecnica per la mappatura topografica e il rilevamento delle caratteristiche geomorfologiche delle dune embrionali.

Bibliografia

- Alesheikh A. A., Ghorbanali A., Nouri N., 2007. *Coastline change detection using remote sensing. International Journal of Environmental Science & Technology*, 4: 61-66.
- Casella E., Rovere A., Pedroncini A., Stark Colin P., Casella M., Ferrari M., Firpo M., 2016. *Drones as tools for monitoring beach topography changes in the Ligurian Sea (NW Mediterranean)*. *Geo-Marine Letters*, 36: 151-163.
- Gonçalves J.A., Henriques R., 2015. *UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas*. *SPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104:101-111.
- Harwin S., Lucieer A., 2012. *Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery*. *Remote Sensing*, 4: 1573-1599.
- Hughenoltz C. H., Whitehead K., W. Brown O. W., Barchyn T. E., J. Moorman B. J., LeClair A., Riddell K., Hamilton T., 2013. *Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model*. *Geomorphology*,

194: 16-24.

- Mancini F., Dubbini M., Gattelli M., Stecchi F., Fabbri S., Gabbianelli G., 2013. *Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments*. *Remote Sensing*, 5: 6880-6898.
- Regione Veneto, 2011, *Rapporto Ambientale*. 01 VASROS Quadro Ambientale. 158 pp.
- 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.
- Wulder M. A., Hall R. J., Coops N. C., Franklin S. E., 2004. *High Spatial Resolution Remotely Sensed Data for Ecosystem Characterization*. *BioScience*, 54: 511-521.

Ricevuto il 30/08/2016; accettato 22/03/2017

