



MONITORAGGIO MULTISPETTRALE DA APR DI ALGHE SOMMERSE IN ACQUE BASSE NELLA SACCA DI GORO

MULTISPECTRAL UAV MONITORING OF SUBMERGED SEAWEED IN SHALLOW WATER IN THE LAGOON OF GORO

Y. Taddia^a, P. Russo^a, S. Lovo^b, A. Pellegrinelli^a

^a Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara, 44122 Ferrara - (yuri.taddia, paolo.russo, alberto.pellegrinelli)@unife.it

^b ARPAE, Struttura Oceanografica Daphne, 44124 Ferrara – slovo@arpae.it

PAROLE CHIAVE: Aeromobili a Pilotaggio Remoto (APR), Camera Multispettrale, Ambiente Costiero Lagunare, Calibrazione Radiometrica, Monitoraggio Algale

KEY WORDS: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), Multispectral Camera, Coastal Lagoon Environment, Radiometric Calibration, Submerged Seaweed Monitoring

Questo articolo è il sunto tradotto in italiano della versione sottomessa allo Special Issue “The Impact of Innovative and Emerging Technologies on the Surveying Activities” della rivista APPLIED GEOMATICS collegato al convegno SIFET 2018.

RIASSUNTO

Per un territorio costiero, la fioritura algale in acque basse costituisce un serio problema sia per l'economia del turismo balneare sia per le attività economiche legate alla coltivazione di molluschi (quali le vongole). Un eccesso di fioritura può, infatti, portare rapidamente a condizioni di anossia con la conseguente morte dei molluschi. Il telerilevamento da satellite o da aeromobile è spesso utilizzato nel monitoraggio delle alghe ma, negli ultimi anni, interessanti sviluppi si sono avuti grazie alla disponibilità di Aeromobili a Pilotaggio Remoto (APR) equipaggiati con camere multispettrali leggere ed a basso costo. Tali sistemi permettono di acquisire informazioni spettrali dettagliate con bande molto strette consentendo un'analisi della fioritura algale ad elevate risoluzioni, sia geometriche che spettrali. In questo lavoro è stato testato l'uso della camera multispettrale MicaSense RedEdge-M montata su un drone DJI Phantom 3 PRO nella mappatura, quantificazione e monitoraggio delle alghe sommerse, analizzando, in particolar modo, l'importanza dei dati di calibrazione radiometrica (non utilizzati o utilizzati solo parzialmente nelle applicazioni di monitoraggio ambientale). Il caso di studio si trova nella Sacca di Goro (Emilia-Romagna, Italia) e rappresenta una zona di grande rilevanza economica per l'allevamento di vongole. Le immagini digitali acquisite in due voli successivi, a distanza di 39 giorni l'uno dall'altro e ad una quota di 70 m, sono state processate sia mediante il software Agisoft PhotoScan Professional che attraverso Pix4D Mapper Pro. I risultati del lavoro confermano che il monitoraggio algale in un ambiente costiero e di laguna, attraverso l'impiego di una camera multispettrale montata su APR, è possibile, ma per raggiungere risultati accurati ed affidabili, risulta fondamentale l'applicazione della calibrazione radiometrica basata sui dati del sensore di irradianza ambientale acquisiti durante il volo e sulle immagini del pannello a riflettanza nota appositamente acquisite prima e dopo ogni volo con APR.

ABSTRACT

The sudden algal bloom in shallow water may be a serious problem for sea coastal economy based on clams farming because it leads quickly to anoxia conditions with the consequent death of the mollusks. In order to detect the rise of algae, normally the satellite remote sensing is used, exploiting the higher response in the near infrared wavelengths. A recent progress in monitoring this phenomenon derives from the availability of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) equipped with lightweight multispectral cameras. Such technique makes it possible to acquire detailed spectral information with narrow bands attaining an assessment of the algal bloom at both high geometric and radiometric resolutions. In this work, we tested the MicaSense RedEdge-M multispectral camera mounted on a DJI Phantom 3 Professional aircraft to map submerged seaweeds and assess their evolution. In fact the spread of seaweeds is very rapid, therefore it is particularly important to predict it in advance, by detecting the seaweeds when they are still submerged. The case study is the lagoon of Goro (Northern Adriatic Sea, Italy), a crucial environment for the clams farming characterized by a balance particularly delicate because of both the freshwater coming from the Po River and the saltwater ingression caused by the tidal cycles of the Adriatic Sea. The digital images acquired in two subsequent flights were processed either with Agisoft PhotoScan PRO and Pix4D Mapper Pro. All the tests performed in this study confirm that the monitoring over time with a multispectral lightweight camera mounted on a UAV is possible, but the solely application of a proper radiometric calibration (using a Downwelling Light Sensor and a known reflectance panel) gives the most accurate and reliable results.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni il fenomeno di eutrofizzazione è aumentato fortemente nel mar Adriatico settentrionale, in particolare nei

pressi del delta del Po. L'acqua dolce proveniente dalle bocche fluviali fornisce infatti un elevato apporto di nutrienti che facilitano la crescita delle alghe. Conseguentemente, un limitato aumento della temperatura dell'acqua durante la stagione estiva

può rapidamente portare ad una fioritura praticamente incontrollata con effetto dannoso, finanche tossico, sulla fauna ittica e, più in generale, sulla vita degli organismi acquatici (Hallegraeff, 2003). Le zone in cui sono presenti allevamenti di molluschi risultano particolarmente vulnerabili alle conseguenti condizioni di anossia che possono instaurarsi qualora la biomassa algale inizi il processo di decomposizione. L'economia della maggior parte dei piccoli paesi situati attorno al delta del fiume Po dipende fortemente dalle attività di pesca e acquacoltura e risulta pertanto seriamente minacciata dai processi di eutrofizzazione. L'Agenzia Regionale per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia dell'Emilia-Romagna (ARPAE) monitora costantemente le aree strategiche allo scopo di prevenire l'insorgere di tali condizioni. Una serie di ricognizioni vengono periodicamente effettuate attraverso l'uso di piccole imbarcazioni alla ricerca delle prime alghe affioranti in superficie. Anche la qualità dell'acqua viene inoltre monitorata mediante l'utilizzo di sonde multiparametriche in grado di fornire informazioni sulla quantità di ossigeno disciolto nell'acqua, nonché sulla temperatura e salinità dell'acqua stessa. Nonostante questi considerevoli sforzi risulta tuttavia arduo effettuare un monitoraggio sin dalle prime fasi di crescita subacquea. La distribuzione spaziale delle zone in cui la crescita è più rapida varia infatti di anno in anno ed è pertanto solamente attraverso un monitoraggio precoce, effettuato quando l'alga risulta essere ancora sommersa, che si potrebbero effettuare interventi di rimozione tempestivi prima dell'insorgere di condizioni potenzialmente dannose alla fauna ittica.

L'uso di immagini satellitari rappresenta ancor oggi la fonte primaria di informazioni per il telerilevamento nel campo della mappatura algale, ma il limitato numero di bande spettrali (meno di dieci) e la frequente ricorrenza di pixel misti dovuta alla scarsa risoluzione geometrica ($1\div 5$ m/pixel) rendono poco accurato il monitoraggio (Hossain et al., 2015; Wicaksono et al., 2017). I recenti sviluppi in campo di tecnologie per Aeromobili a Pilotaggio Remoto (APR), con una sempre maggiore miniaturizzazione dei sensori, hanno aumentato le potenzialità di impiego di questi nuovi sistemi. Inoltre, l'elevata risoluzione geometrica delle immagini combinata ad algoritmi di Structure from Motion (SfM) ha aperto la strada a molteplici applicazioni di ricerca basate sull'acquisizione dati da APR. La ricostruzione di accurati modelli digitali, sia del terreno che di superfici, con conseguente estrazione di curve di livello e creazione di mesh e modelli tridimensionali texturizzati, sono tipici esempi di prodotti finali ottenibili attraverso un approccio di tipo SfM (Nex e Remondino, 2014). L'abbinamento di APR e camere multispettrali a risoluzione centimetrica offre molteplici possibilità di impiego anche all'interno di campi quali l'agricoltura di precisione e la gestione boschiva (Candiago et al., 2015). In ambito costiero, esempi di applicazioni presenti in letteratura riguardano l'identificazione di fasce costiere e linee di erosione (Papakonstantinou et al., 2016), la caratterizzazione bidimensionale e tridimensionale di spiagge e sistemi di dune (Mancini et al., 2013; Taddia et al., 2019), nonché il monitoraggio della proliferazione algale (Kislik et al., 2018; Duffy et al., 2018).

In questo lavoro abbiamo testato l'uso di un sistema multispettrale a basso costo formato da un drone DJI Phantom 3 Professional equipaggiato con una camera multispettrale MicaSense RedEdge-M per il rilevamento delle alghe sommerse. Esso è stato condotto in un ambiente lagunare caratterizzato da acque basse e calme con un'escursione di marea limitata a poche decine di centimetri. In tali condizioni l'uso di APR si rivela essere particolarmente indicato.

Al fine di calcolare valori di effettiva riflettanza a partire dai Digital Number (DN) delle immagini acquisite dalla camera, la calibrazione radiometrica rappresenta un passaggio

indispensabile. Recentemente diversi articoli presenti in letteratura hanno indagato l'importanza della calibrazione radiometrica sia per camere multispettrali che iperspettrali (Hakala et al. 2018; Honkavaara, Khoramshahi 2018, Deng et al. 2018b). La determinazione della radianza rilevata dal sensore rappresenta il primo passaggio per effettuare la conversione da Digital Number a riflettanza. Il calcolo della radianza, che permette di ottenere il reale flusso di energia rilevato dal sensore multispettrale, può essere effettuato considerando variabili quali la sensibilità ISO impostata al tempo dello scatto, il tempo di esposizione, la dark current e il vignetting (von Bueren et al. 2015; Aasen et al. 2018; MicaSense 2018). Mentre, il successivo calcolo della riflettanza, può essere effettuato sia usando le misure di irradianza fatte da un sensore apposito detto Downwelling Light Sensor (DLS), sia utilizzando un pannello a riflettanza nota. Ad esempio, Hakala et al. (2018) hanno proposto un metodo per calcolare direttamente la riflettanza di superficie a terra da piattaforme UAV sfruttando sia le misure di radianza effettuate da un sensore iperspettrale che le misure di irradianza derivanti da uno spettrometro. Tuttavia, all'interno della loro ricerca gli stessi autori evidenziano come una rotazione del sensore di irradianza rispetto al piano orizzontale possa notevolmente influenzare l'accuratezza nella misura della reale irradianza. L'uso di pannelli a riflettanza nota consente invece di risolvere questa tipologia di problematiche.

La ricostruzione di informazioni spettrali a livello del singolo pixel coinvolge necessariamente la registrazione (sovrapposizione) delle immagini acquisite da ciascuna ottica del sensore multispettrale. Per tale ragione Jhan et al. (2016) hanno studiato le problematiche legate ad una accurata registrazione band-to-band di immagini acquisite attraverso sensori multi-ottica, proponendo una procedura di orto-rettifica. Oggigiorno l'approccio certamente più comune e diffuso per gestire dataset di immagini, anche multispettrali consiste nell'utilizzare tecniche di Structure from Motion (SfM) per generare un unico ortomosaico per ogni banda spettrale. Tuttavia, uno stesso oggetto può essere caratterizzato da valori di riflettanza leggermente differenti in immagini diverse. Honkavaara e Khoramshahi (2018) hanno pertanto ricercato un approccio per sopperire alla mancanza di coerenza dei valori di riflettanza che possono talvolta essere calcolati nelle zone di sovrapposizione delle varie immagini, proponendo infine una tecnica di ottimizzazione globale per la correzione radiometrica dell'intero blocco fotogrammetrico.

Deng et al. (2018a) hanno inoltre studiato l'effetto della risoluzione spaziale sul rendimento delle acquisizioni iperspettrali da APR in termini sia geometrici che radiometrici. In particolar modo per quanto riguarda le immagini dei pannelli a riflettanza nota, la zona attorno ad essi può influenzare significativamente la risposta spettrale del pannello stesso. Per questa ragione gli autori hanno proposto dei metodi per scegliere opportunamente la risoluzione spaziale da APR allo scopo di migliorare l'efficienza delle operazioni di rilevamento. Nonostante ciò, nell'ambito della nostra ricerca le immagini del pannello a riflettanza nota non sono mai state acquisite durante i voli aerofotogrammetrici, bensì sempre subito prima e subito dopo la loro esecuzione mantenendo la camera multispettrale ad una distanza mai superiore al metro dal pannello, garantendo dunque un'elevata copertura (in termini di pixel) dell'area del pannello stesso sull'immagine di calibrazione.

Sebbene molteplici approcci per una rigorosa ed avanzata calibrazione radiometrica siano stati recentemente proposti in letteratura, quali quelli illustrati sopra, nell'ambito del nostro lavoro abbiamo utilizzato una procedura semplificata, basata in particolare, su due dei più comuni software di SfM (Agisoft PhotoScan Professional e Pix4D Mapper Pro) attualmente

disponibili. Entrambi, nelle ultime versioni, hanno introdotto la possibilità di applicare correzioni radiometriche direttamente all'interno del flusso di elaborazione utilizzando in modalità più o meno automatica il pannello a riflettanza nota ed i dati del DLS. Conseguentemente, sono state anche sinteticamente valutate le differenze riscontrabili nell'uso dei due diversi software nella creazione degli ortomosaici multispettrali radiometricamente calibrati, come scopo secondario della ricerca. Al termine di questa analisi preliminare si è quindi proceduto all'effettivo rilevamento e quantificazione delle alghe sommerse attraverso due distinte tecniche:

- un semplice calcolo di un indice spettrale rappresentativo della vegetazione (NDVI);
- una classificazione supervisionata condotta con un algoritmo pixel-based standard e ben noto nel settore del telerilevamento basato sul principio di massima verosimiglianza (Richards et al. 2006). Questa procedura è stata svolta in ambiente software ENVI.

Come era prevedibile, la classificazione supervisionata ha fornito risultati più attendibili rispetto alla semplice procedura di rilevamento algale basata sul calcolo di un indice spettrale ed è stato inoltre possibile applicarla a maggiori estensioni all'interno dei siti monitorati, anche con profondità d'acqua variabili.

Infine, un'ultima analisi condotta, è consistita nell'indagare se una procedura di classificazione supervisionata possa essere in grado di sopperire ad un'eventuale mancanza di calibrazione radiometriche del dataset di immagini acquisite.

2. IL CASO DI STUDIO

La Sacca di Goro, sito scelto per il monitoraggio delle alghe, è situata nel mar Adriatico settentrionale nei pressi del delta del fiume Po. Questo particolare ambiente lagunare è caratterizzato da acque basse (fino a 1.5 metri di profondità) e da una elevata idrodinamica che porta ad una continua evoluzione della linea di costa causata dal conseguente trasporto (solido) di sedimento sabbioso (Corbau et al., 2016).

Grazie alle sue caratteristiche tipicamente lagunari, la Sacca di Goro è particolarmente adatta all'allevamento di molluschi. Essa costituisce un'area di grande importanza per la riproduzione delle vongole e, conseguentemente, per il loro allevamento. Questa attività rappresenta un'importante fonte di reddito per la comunità locale (Goro). Durante la calda stagione estiva, ed in particolar modo nelle zone evidenziate (in rosso) in Figura 1, l'improvvisa e pressoché incontrollata crescita delle alghe, facilitata da un'elevata temperatura dell'acqua, può rapidamente portare a condizioni di anossia estremamente dannose ed anche letali per i molluschi.

Allo scopo di prevenire l'insorgere di tale fenomeno, una costante attività di monitoraggio viene condotta mediante ricognizioni a bordo di piccoli motoscafi da parte di Arpa-E Emilia-Romagna. In particolare, essa consiste nella ricerca di alghe affioranti in superficie e viene effettuata ad intervalli di tempo sempre più brevi quanto maggiore è la temperatura dell'acqua rilevata. Ciononostante, la presenza di alghe affioranti rappresenta già un evidente segno di uno stato di fioritura e sviluppo algale particolarmente avanzato. Per evitare l'instaurarsi di condizioni di anossia in tali situazioni, è necessario intraprendere tempestivamente delle contromisure quali la rimozione delle alghe affiorate prima che inizino il processo di decomposizione.

Attualmente, un'attività di prevenzione attraverso un'adeguata tecnica di monitoraggio e l'adozione di misure atte al miglioramento della qualità dell'acqua sembrano rappresentare l'approccio più idoneo. Il rilevamento delle alghe sommerse, in uno stato di crescita ancora del tutto subacqueo, costituisce una

soluzione poco dispendiosa se effettuata attraverso l'uso di APR e consente un più ampio margine temporale per la pianificazione delle azioni atte a mitigare e prevenire l'insorgere di condizioni dannose all'allevamento di molluschi.

3. METODOLOGIA

L'impiego di APR negli ultimi anni ha interessato un sempre maggior numero di applicazioni. Nel campo del telerilevamento, essi si configurano come un efficace strumento di acquisizione in grado di fornire elevate risoluzioni geometriche e ricostruire modelli accurati attraverso tecniche fotogrammetriche digitali. Inoltre, gli APR rappresentano anche una soluzione tecnologica caratterizzata da costi operativi estremamente contenuti.



Figura 1. Aree rilevate all'interno della Sacca di Goro.

La recente disponibilità sul mercato di camere multispettrali leggere ha esteso il campo di applicazione degli APR ad ambiti ancora tradizionalmente legati al telerilevamento satellitare, grazie alla presenza di bande spettrali aggiuntive rispetto a quelle classiche della luce visibile.

Questa capacità di acquisire nuove ed ulteriori informazioni, tra cui quelle nelle lunghezze d'onda del vicino infrarosso (circa 840 nm) e del cosiddetto "red edge" (circa 717 nm), rende possibile la mappatura ad alta risoluzione della copertura vegetale al suolo.

Per queste ragioni il rilevamento delle alghe è stato effettuato attraverso l'uso della camera MicaSense RedEdge-M (costo indicativo di circa 5.000 euro) montata su un drone DJI Phantom 3 PRO (Fig. 2).

La RedEdge-M ha cinque distinte bande spettrali di acquisizione. Essa è in grado di rilevare la radiazione elettromagnetica nelle regioni del blu, verde, rosso, red edge e vicino infrarosso (Tabella 1) grazie a filtri passa-banda interposti tra il sensore di ciascuna ottica e l'obiettivo. La presenza di un global shutter consente inoltre di minimizzare le problematiche relative ad un possibile sfocamento (effetto mosso) delle immagini.

Le correzioni radiometriche sono applicate sia mediante l'uso di un pannello a riflettanza nota sia attraverso i dati registrati da un

senso di irradianza ambientale (DLS). Il primo è un pannello costituito da un materiale con un comportamento quasi-lambertiano le cui caratteristiche di risposta spettrale vengono fornite dalla MicaSense tramite procedure di calibrazione svolte in laboratorio; immagini del pannello devono essere prese manualmente, ad una distanza di circa 1 metro, all'inizio ed alla fine di ogni volo APR (Fig. 3). Il secondo (DLS) misura invece l'effettiva quantità di luce incidente e risulta particolarmente utile per monitorare le variazioni di irradianza durante l'acquisizione, consentendo di riportare ogni volo a condizioni "standard" ed, in tal modo, confrontare i dati in maniera omogenea nel tempo.

I principali vantaggi e svantaggi dei metodi di calibrazione radiometrica basati sull'uso di un singolo dispositivo (DLS, pannello a riflettanza nota) o entrambi, sono brevemente riassunti in Tabella 2.

MicaSense RedEdge-M		
Peso	170 g incluso DLS	
Dimensioni	94 mm × 63 mm × 46 mm	
Consumo Energetico	4.2V-15.8V, 4W nominali, 8W picco	
Bande Spettrali	Blu	Lunghezza d'onda centrale: 475 nm Larghezza di banda FWHM: 20nm
	Verde	Lunghezza d'onda centrale: 560 nm Larghezza di banda FWHM: 20nm
	Rosso	Lunghezza d'onda centrale: 668 nm Larghezza di banda FWHM: 10nm
	Red Edge	Lunghezza d'onda centrale: 717 nm Bandwith FWHM: 10nm
	NIR	Lunghezza d'onda centrale: 840 nm Larghezza di banda FWHM: 40nm
Ground Sample Distance (GSD)	8 cm a 120 m	

Tabella 1. Specifiche tecniche della camera multispettrale MicaSense RedEdge-M.

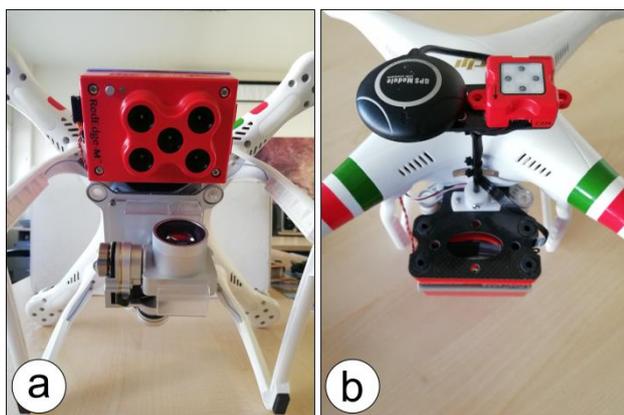


Figura 2. (a): Camera multispettrale MicaSense RedEdge-M montata su DJI Phantom 3 Professional; (b): Dettaglio sul sensore di irradianza ambientale DLS e antenna GNSS.

La combinazione delle misure di irradianza condotte dal DLS con le misure di radianza effettuate dai sensori che compongono la camera multispettrale rende pertanto possibile calcolare valori di riflettanza attraverso l'impiego di immagini acquisite da APR. Il rapporto tra la radiazione riflessa (misurata dalla

camera) e quella incidente (misurata dal DLS) fornisce un dato di riflettanza, anche se è bene far presente che i due sensori hanno angoli di campo sensibilmente diversi in quanto il DLS misura la radiazione proveniente dall'intero emisfero (Hakala et al. 2018) mentre la camera possiede un angolo di campo estremamente limitato (in particolare se si pensa al singolo pixel).



Figura 3. Esempio di immagini del pannello di riflettanza nota, una per ogni banda della RedEdge-M, acquisite manualmente all'inizio ed alla fine di ogni volo APR.

Nonostante dunque sia possibile utilizzare le misurazioni condotte attraverso un DLS per calcolare un dato in riflettanza, è certamente l'impiego di un pannello a riflettanza nota che consente di raggiungere le più elevate accuratèzze e precisioni, soprattutto quando combinato ad un DLS. Ciò è dovuto al fatto che solo con un pannello risulta possibile ricavare direttamente la relazione tra radianza e riflettanza sulla porzione di immagine che ritrae il pannello stesso ed estendere questo legame a tutta la rimanente parte di immagine, finanche all'intero dataset di immagini acquisite. In una tale situazione il DLS può fornire dati utili a monitorare eventuali variazioni di irradianza tra il momento in cui è stata acquisita l'immagine del pannello e l'istante in cui è stata acquisita ogni altra immagine, lavorando così in una sorta di maniera "differenziale" o "relativa".

Riassumendo, si può dunque affermare che il principale vantaggio del solo DLS consiste nel fatto di effettuare misure continue di irradianza che vengono registrate nei metadati Exif di ogni immagine in maniera del tutto automatica. Tuttavia, l'irradianza calcolata attraverso queste sole misure risulta meno accurata rispetto all'uso di un pannello a riflettanza nota.

Qualora nessun DLS sia disponibile, l'uso del solo pannello consente invece di calcolare comunque valori di riflettanza affidabili e precisi, sebbene in questo caso l'operatore ha l'onere aggiuntivo di acquisire almeno un'immagine del pannello stesso. Inoltre in questo caso non è in alcun modo possibile tenere conto di variazioni dell'effettiva irradianza durante il volo. L'uso combinato di DLS e pannello a riflettanza nota combina i vantaggi dei due singoli dispositivi, consentendo il calcolo di un dato in riflettanza accurato in ogni istante del volo aerofotogrammetrico multispettrale, anche nel caso del passaggio di nuvole. Oltre al DLS, la camera multispettrale è inoltre interfacciata con un dispositivo GNSS standard che fornisce informazioni utili ad una grossolana georeferenziazione delle singole immagini. Anche in questo caso le coordinate vengono inseriti all'interno dei metadati Exif dell'immagine.

Per il monitoraggio sono state quindi scelte due distinte zone all'interno della Sacca di Goro, entrambe situate in prossimità del cosiddetto "Scanno di Goro": una lunga e sottile striscia sabbiosa in continua evoluzione. Questa zona è infatti quella che risulta maggiormente affetta dal fenomeno dell'eutrofizzazione nei mesi estivi. Nelle due zone prese in esame sono state individuate due distinte specie di alga: *Ulva* nel primo sito (Fig. 4a) ed *Enteromorpha* nel secondo (Fig. 4b). I rilievi multispettrali sono stati effettuati mediante due ripetizioni in ciascun sito, per un totale di quattro distinti voli. Il primo rilevamento si è svolto il 25 maggio 2018 e ha mostrato la presenza di alghe sommersive in uno stato di crescita iniziale. La successiva ripetizione del rilievo, effettuata il 3 luglio 2018, ha evidenziato un notevole aumento di copertura algale sommersa, ancora non affiorante in superficie eccetto per le alghe spiagghiate sulla riva.

Metodo	Vantaggi	Svantaggi
DLS	Misure di irradianza nei metadati Exif.	Riflettanza non molto accurata.
Pannello a riflettanza nota	Riflettanza molto accurata.	L'operatore deve ricordarsi di acquisire le immagini del pannello all'inizio ed al termine di ogni volo Le variazioni di irradianza non possono essere tenute in considerazione
DLS + Pannello a riflettanza nota	Riflettanza molto accurata. Le variazioni di irradianza possono essere tenute in considerazione.	Leggero aumento del costo del sistema dovuto a due diversi dispositivi.

Tabella 2. Vantaggi e svantaggi dei differenti metodi di calibrazione radiometrica.

Allo scopo di rilevare entrambi i siti sono stati impostati piani di volo ad una quota di 70 metri

In tal modo è stato possibile garantire una risoluzione geometrica (GSD) di circa 5 centimetri per le immagini multispettrali acquisite con la camera MicaSense RedEdge-M.

Inoltre, per garantire un'adeguata sovrapposizione tra le immagini stesse, sono stati impostati ricoprimenti longitudinale e trasversale rispettivamente pari a 80% e 70%. Questi parametri sono calcolati autonomamente dall'applicazione che gestisce il piano di volo con riferimento alla camera RGB nativa montata sul DJI Phantom 3 PRO (non usata in questa ricerca) tuttavia, i rispettivi ricoprimenti effettivi per la RedEdge-M non differiscono significativamente dai valori precedentemente menzionati. I tempi di volo sono stati sempre, per ogni volo, al di sotto dei 15 minuti.

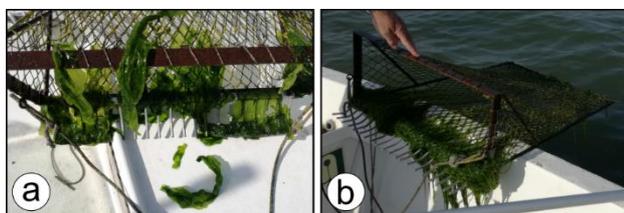


Figura 4. (a): *Ulva* rilevata nel sito 1 tramite rastrellamento; (b): *Enteromorpha* rilevata nel sito 2 tramite rastrellamento.

Un set di punti di appoggio è stato infine utilizzato per la georeferenziazione del blocco fotogrammetrico. I punti sono stati materializzati mediante pannelli in legno ed il loro centro è stato rilevato con ricevitori GNSS geodetici a doppia frequenza in NRTK (Network Real Time Kinematics) nel sistema ETRS89-ETRF2000 (2008.0).

Tutti i dataset di immagini sono stati elaborati sia con il software Agisoft PhotoScan Professional che con Pix4D Mapper Pro. Alcune problematiche sono state riscontrate durante la procedura di allineamento delle immagini, in particolare:

- mancanza di punti omologhi sulle immagini acquisite a mare, a meno delle increspature ondose che però il più delle volte forniscono corrispondenza errate;
- presenza di riflessi situati sempre nella stessa area immagine produce corrispondenze che, ancora una volta, risultano errate.

Le immagini affette da queste problematiche sono evidenziate in Figura 5 e in Figura 6. Gli algoritmi di filtraggio degli outliers, tuttavia, sono generalmente in grado di eliminare le corrispondenze erronee; per contro, l'allineamento delle immagini a mare senza alcun lembo di terra emersa ai bordi è risultato praticamente impossibile. Diversi approcci sono stati seguiti per gestire le prese multispettrali. Quello più semplice è consistito nell'utilizzare le immagini così come direttamente acquisite, senza pertanto applicare alcuna correzione radiometrica, mentre il più rigoroso ha previsto l'uso combinato

delle informazioni fornite dal sensore DLS e dal pannello a riflettanza nota. Il flusso di lavoro secondo le varie opzioni seguite è riassunto nella Figura 7.



Figura 5. Piano di volo nel sito 1. In rosso le immagini che non è stato possibile allineare.

È importante sottolineare come Agisoft Photoscan Professional non consenta di ottenere alcun valore di riflettanza, ma solamente Digital Numbers radiometricamente corretti. Al contrario, Pix4D Mapper Pro converte i Digital Number in valori di radianza e/o riflettanza ogniqualvolta venga applicata una procedura di correzione del dato acquisito (calibrazione). L'opzione "camera only" consente di calcolare un valore di radianza tenendo conto di parametri quali dark current, tempo di esposizione, vignetting, valore ISO. L'uso dei dati del sensore DLS e/o delle immagini di un pannello a riflettanza nota consentono di convertire tale valore in un dato di riflettanza (dunque compreso tra 0 e 1).

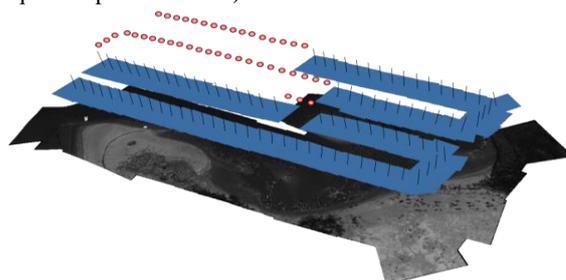


Figura 6. Piano di volo nel sito 2. In rosso le immagini che non è stato possibile allineare.

Come detto, il primo approccio seguito per il rilevamento delle alghe sommerse è consistito nel calcolo dell'indice NDVI. Poiché questo indice è in una forma già normalizzata, nulla di fatto cambia se al posto della formula in riflettanza

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (1)$$

si utilizza la formula in Digital Number

$$NDVI = \frac{DN_{NIR} - DN_{red}}{DN_{NIR} + DN_{red}} \quad (2)$$

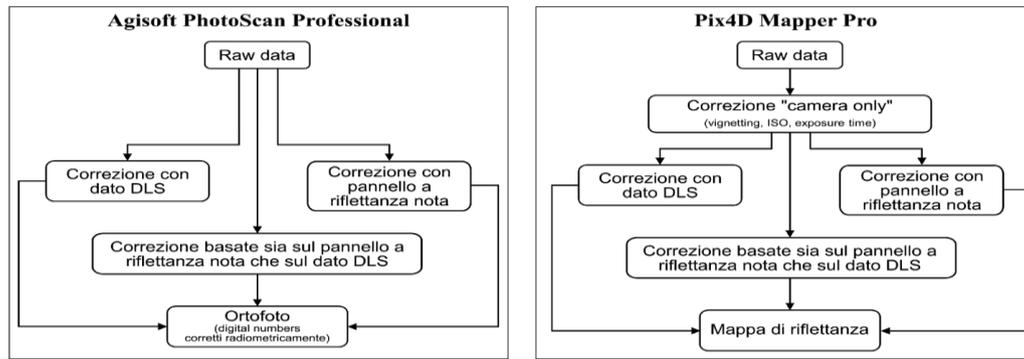


Figura 7. Schematizzazione dei diversi approcci per l'applicazione di correzioni radiometriche all'interno dei due software usati.

Per studiare l'importanza della calibrazione radiometrica sono state identificate quattro distinte aree caratterizzate da una copertura omogenea su ciascuna ortofoto:

1. vegetazione sulla spiaggia;
2. acqua profonda (1÷1.5 m);
3. sabbia asciutta;
4. acqua bassa con alga sommersa.

Si noti come in questo contesto la terminologia "acqua profonda" vada intesa in termini relativi rispetto alle regioni in cui l'acqua era significativamente più bassa, ed in cui era presente anche una certa copertura algale subacquea. L'esatta collocazione ed estensione delle varie aree è mostrata in Figura 8. Ciascuna area, individuata attraverso appositi poligoni, è stata usata come maschera per l'estrazione delle informazioni nelle varie singole bande spettrali e per calcolare conseguentemente l'indice NDVI.

Questa operazione è stata eseguita per entrambi i rilevamenti (maggio e luglio), su entrambi i siti, per ciascun software usato (Agisoft PhotoScan Professional e Pix4D Mapper Pro) e per tutti gli approcci illustrati in Figura 7. Un totale di 36 distinti progetti è stato quindi creato per questo tipo di analisi.

I dati estratti dalle ortofoto e/o dalle mappe di riflettanza in corrispondenza delle varie aree sono stati analizzati in termini

di istogrammi di frequenza per comprenderne la distribuzione dei valori. Questa operazione è stata effettuata in ambiente MATLAB®, con particolare riguardo alle bande spettrali del rosso e del vicino infrarosso e conseguentemente sul valore di NDVI da queste calcolato.

Lo scopo è stato quello di analizzare l'influenza della calibrazione radiometrica sulla caratterizzazione delle varie coperture individuate.

La successiva quantificazione delle alghe sommerse, invece, è stata fatta solamente utilizzando i risultati ottenuti applicando la procedura di calibrazione radiometrica basata sul duplice utilizzo delle immagini di un pannello a riflettanza nota e del sensore DLS.

Infine, l'ultima analisi ha riguardato l'uso di una procedura di classificazione supervisionata al posto di un semplice calcolo di un indice spettrale. Anche in questo caso la classificazione è stata effettuata sia sull'ortofoto ottenuta dalle immagini grezze, sia utilizzando lo stesso dataset dopo l'applicazione delle correzioni radiometriche di cui sopra, e sempre con l'obiettivo di valutare se la definizione di un opportuno numero di regioni di interesse usate per l'apprendimento del classificatore possa eventualmente sopperire alla mancanza di una calibrazione radiometrica.

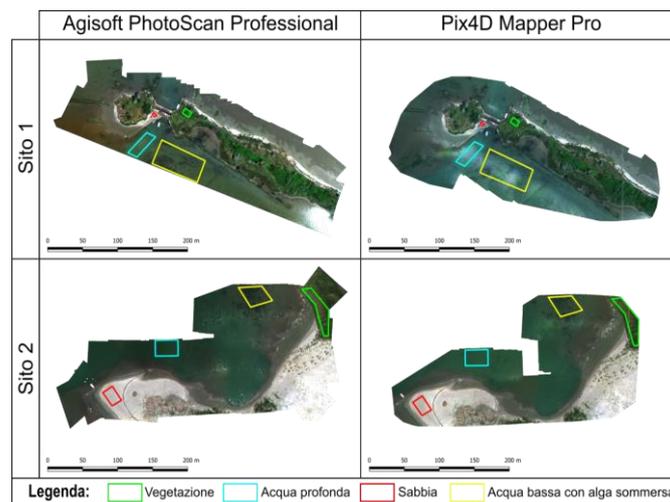


Figura 8. Individuazione delle aree omogenee utilizzate per le prime analisi relative alla distribuzione dei valori nelle bande spettrali del rosso e del vicino infrarosso, nonché dell'indice NDVI, al variare della tipologia di calibrazione radiometrica.

4. RISULTATI OTTENUTI

Con l'obiettivo di valutare la procedura di calibrazione radiometrica è stata analizzata la distribuzione dei valori in Digital Number e/o riflettanza (dove disponibile come output del software di SfM). L'analisi è stata focalizzata, in particolare,

sulle bande del rosso e del vicino infrarosso (Fig. 9), nonché sulla loro combinazione in termini di indice NDVI (Fig. 10). Ciascun istogramma di frequenza contiene il numero di pixel appartenenti alla specifica classe (intervallo di valori). Le frequenze sono state normalizzate al fine di effettuare un confronto omogeneo tra le diverse coperture individuate che

fosse indipendente dal numero effettivo di pixel di ognuna di esse.

Come prime osservazioni si può notare che l'applicazione di correzioni radiometriche porta ad una generale diminuzione dei valori di Digital Number. Questo è dovuto al fatto che i valori vengono riportati ad una radianza, in funzione del tempo di esposizione e dalla sensibilità ISO memorizzati nell'Exif di ogni immagine.

Inoltre, dal confronto degli istogrammi per le coperture prive di vegetazione, si osserva che solamente attraverso l'introduzione di correzioni radiometriche è possibile distinguere le varie coperture in termini di NDVI. Infatti, gli istogrammi di frequenza sulla base dei dati grezzi (Raw data) mostrano una grande sovrapposizione tra sabbia, acqua profonda e acqua con alghe in termini di indice spettrale. La distinzione si ottiene invece con le immagini radiometricamente corrette, con una netta separazione degli istogrammi stessi.

Differenze del tutto trascurabili sono state invece riscontrate nell'uso dei due software e pertanto le considerazioni che verranno fatte nel seguito sono basate sull'output del solo Agisoft PhotoScan Professional.

Come detto, il primo approccio di rilevamento e quantificazione delle alghe sommerse è stato effettuato sulla base dell'indice spettrale NDVI, poiché esso è comunemente impiegato per distinguere coperture con vegetazione da altre che ne siano invece prive.

Questa identificazione è stata inizialmente condotta sulla sola regione identificata come "acqua bassa con alga sommersa". Il rilevamento, in questo caso, dipende fortemente dalla distribuzione dei valori di NDVI all'interno della zona considerata. In altre parole, è solamente attraverso una comparazione in termini relativi che risulta possibile distinguere tra zone con e senza alga sommersa. Ciò si traduce in una grande soggettività nell'adozione di un valore di soglia per l'indice spettrale: oltre tale valore si considera il pixel come "alga", in caso contrario come "acqua".

Questo procedimento applicato alle immagini di maggio (Fig.11) e luglio per il sito 1 ha mostrato che i valori con frequenza massima si attestavano rispettivamente a -0.22 e -0.15. In base anche ad un riscontro visivo sull'ortofoto RGB, il valore di soglia è stato quindi assunto pari a -0.16.

La quantificazione delle due diverse coperture ha fornito rispettivamente un valore di 498.2 m² per il mese di maggio e 1179.6 m² per il mese di luglio, con un incremento percentuale pari a +137% nell'arco di 39 giorni (Fig. 12).

Data l'elevata soggettività nell'adozione del valore di soglia in un approccio NDVI, nella stessa regione è stata anche eseguita una procedura di classificazione supervisionata utilizzando la tecnica di massima verosimiglianza (maximum likelihood). In questo caso tutte e cinque le bande spettrali (blu, verde, rosso, red edge e vicino infrarosso) sono state considerate. Anche l'indice NDVI è stato aggiunto come ulteriore sesta banda "sintetica". Ovviamente questa nuova banda aggiuntiva è correlata alle informazioni nelle bande del rosso e del vicino infrarosso, tuttavia l'indice NDVI è in grado di fornire direttamente un'informazione sulla maggiore o minore probabilità che la copertura sia o no legata alla presenza di vegetazione, alghe incluse.

Più correttamente, la classificazione è stata effettuata sull'intera ortofoto, sulla quale sono state identificate tutte le tipologie di copertura al suolo presenti attraverso l'introduzione di 11 Regioni di Interesse (RoI), e solamente alla fine è stata estratta l'informazione all'interno della regione precedentemente menzionata. In tal modo è stato possibile confrontare l'approccio NDVI con quello basato sulla classificazione supervisionata. Le RoI, ciascuna con almeno un centinaio di pixel, sono state omogeneamente distribuite sull'intera ortofoto.

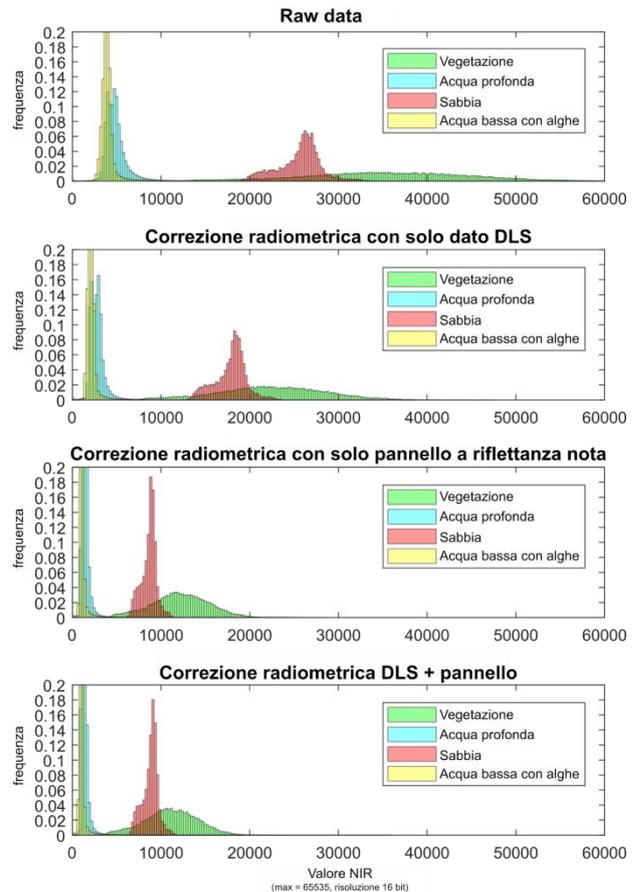


Figura 9. Distribuzione dei valori nella banda del vicino infrarosso (NIR) all'interno delle quattro aree con copertura omogenea individuate sulle ortofoto.

Al fine di validare i risultati della classificazione, sono state introdotte anche 11 equivalenti RoI truth (spazialmente non correlate rispetto alle RoI), grazie alle quali sono state realizzate le analisi standard di post-classificazione (Richards et al. 2006) basate sulla *Confusion Matrix*, sui valori di *Overall Accuracy (OA)* e di *K-coefficient*. I valori di OA e di *K-coefficient* sono sempre risultati superiori rispettivamente al 90% ed a 0.90.

Anche la comparazione con l'ortofoto a colori naturali RGB è servita come ulteriore riscontro circa la corretta classificazione.

I risultati ottenuti con l'approccio di classificazione supervisionata hanno mostrato come la copertura all'interno della regione preselezionata sia aumentata da 809.2 m² in maggio a 1746.1 m² in luglio, con un conseguente aumento percentuale pari a +116% (Fig. 13). Confrontando questi valori con quelli della tecnica basata sul semplice calcolo dell'indice NDVI si può notare come le estensioni, in termini di aree, siano sensibilmente diverse, mentre il tasso percentuale di incremento non sia comunque troppo diverso. Quasi certamente queste differenze sono dovute proprio alla soggettività nella scelta del valore di soglia di NDVI.

Il passo successivo è stato quello di estendere la quantificazione all'intera area di interesse, visibile in ogni ortofoto. In questo caso il rilevamento sulla base dell'indice NDVI è stato sin da subito poco efficace. La variazione di colonna d'acqua presente nei vari punti in laguna, dovuta alla diversa profondità del fondale, causa infatti assorbimenti differenti nelle varie lunghezze d'onda, in particolare nel rosso e nell'infrarosso. Per queste ragioni, risulta impossibile trovare un valore di soglia unico per classificare le zone con la presenza di alghe sommerse, a meno di non suddividere l'immagine in zone

differenziate a seconda della profondità dell'acqua. Un tale modo di procedere risulta tuttavia essere eccessivamente oneroso. Al contrario, la classificazione supervisionata è stata sin da subito condotta sull'intera ortofoto e pertanto non risulta affetta da questa problematica.

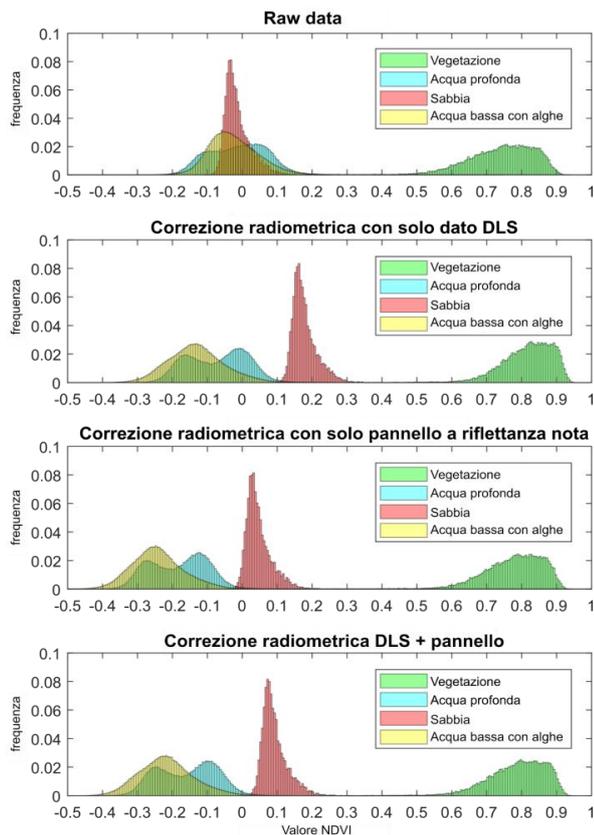


Figura 10. Distribuzione dei valori dell'indice NDVI al variare della tipologia di correzione radiometrica adottata per le aree omogenee identificate. Risultati ottenuti con il software Agisoft PhotoScan Professional.

I risultati della quantificazione, supportati sia da elevati valori di OA che mediante un riscontro sull'ortofoto RGB, mostrano un'estensione della copertura algale pari a 2323.0 m² in maggio e 4908.6 m² in luglio, con un aumento percentuale pari a +111% (Fig. 14). Tale valore è peraltro in linea con i tassi riscontrati nella sottoregione presa in esame in precedenza.

Visti i risultati per il sito 1, per il sito 2 è stata effettuata solamente una rilevazione e quantificazione della copertura algale subacquea utilizzando la procedura di classificazione supervisionata. Ancora una volta la validazione è stata effettuata sia grazie ai valori di OA ottenuti introducendo le RoI truth sia attraverso un riscontro visivo sull'ortofoto RGB.

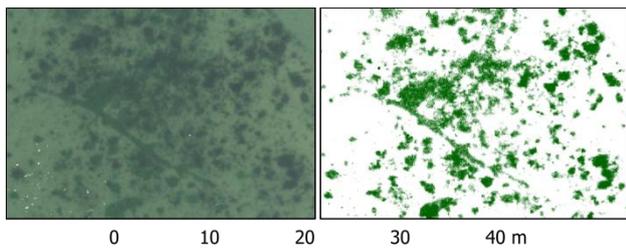


Figura 11. Copertura algale subacquea per il sito 1 durante le analisi basate sull'indice NDVI come classificatore.

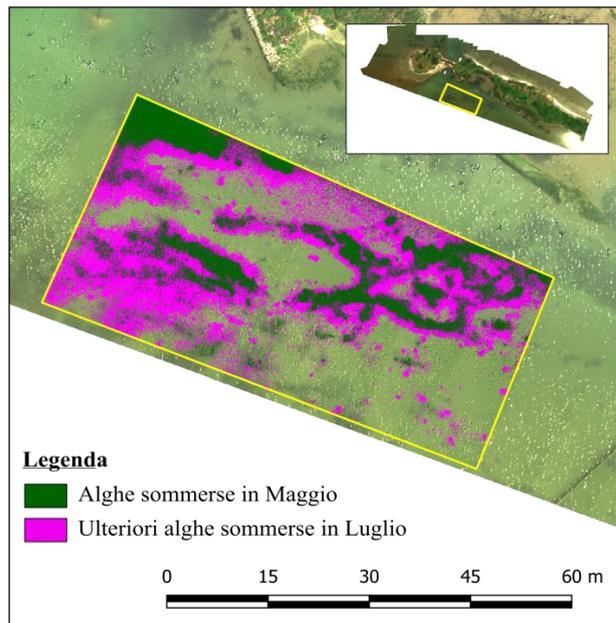


Figura 12. Copertura algale in maggio e luglio con approccio basato su soglia NDVI, all'interno della regione analizzata con gli istogrammi di frequenza.

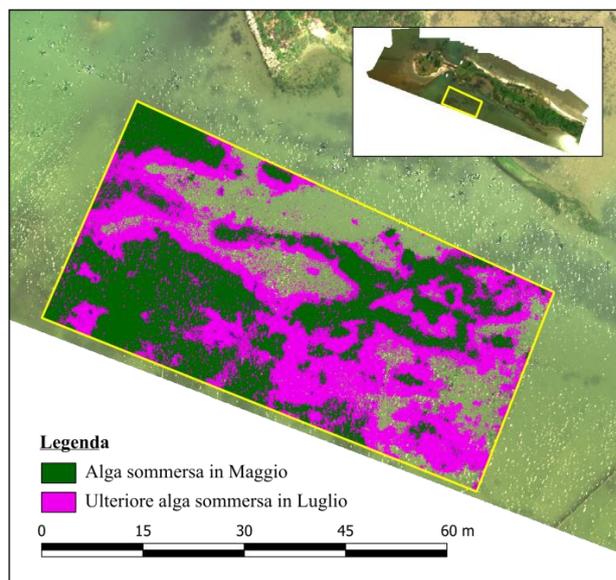


Figura 13. Copertura algale in maggio e luglio tramite classificazione supervisionata, all'interno della regione analizzata con gli istogrammi di frequenza.

Le estensioni di alga sommersa nell'area di monitoraggio individuata nel sito 2 sono state quantificate in 1049.7 m² per il mese di maggio e 3558.1 m² per il mese di luglio (Fig. 15). In questo secondo sito il tasso d'incremento è risultato pari a +239%, ovvero la copertura algale è più che triplicata, sebbene ancora non affiorante in superficie. Infine, un'ultima analisi effettuata ha riguardato la comparazione dei risultati ottenibili sempre attraverso una classificazione supervisionata, ma utilizzando immagini prive di qualsiasi correzione radiometrica, a differenza di quelle impiegate per le quantificazioni precedenti. Ancora una volta, questo confronto è stato limitato al solo sito 1.

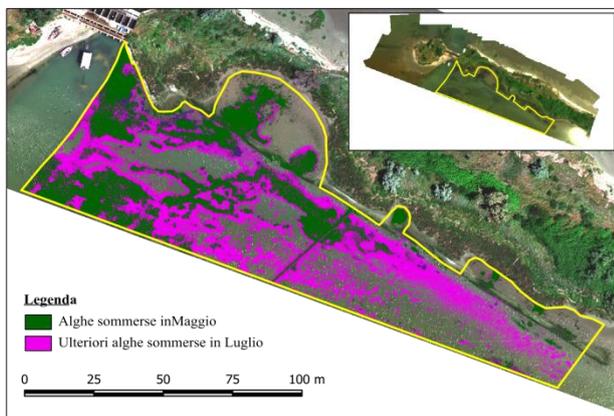


Figura 14. Quantificazione della copertura algale subacquea nel sito 1. L'ortofoto di sfondo è riferita al mese di maggio.

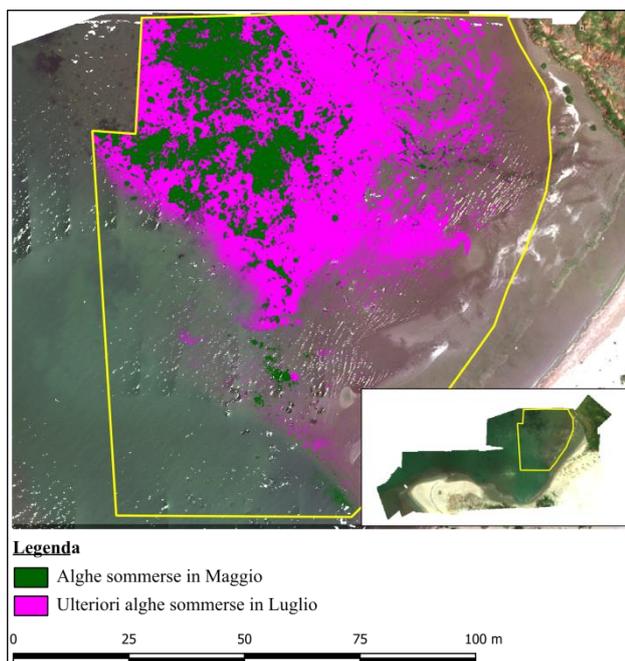


Figura 15. Quantificazione della copertura algale subacquea nel sito 2. L'ortofoto di sfondo è riferita al mese di maggio.

La procedura adottata si è quindi basata sull'individuazione delle RoI per ogni tipo di copertura anche per l'ortofoto ricostruita sulla base delle immagini grezze. La classificazione non è tuttavia risultata altrettanto accurata, come riscontrabile in Figura 16. Solamente una limitata porzione di alghe sommerse riscontrate sulla base di immagini non radiometricamente corrette è risultato essere effettivamente alga sommersa. I risultati sono riassunti in Tabella 3: appare evidente come l'accuratezza della classificazione senza una calibrazione radiometrica sia del tutto insufficiente.

	Sito 1 Mag 2018	Sito 1 Lug 2018	Sito 2 Mag 2018	Sito 2 Lug 2018
Alga sommersa	38.7 %	55.3 %	42.6 %	34.0 %
Acqua	39.6 %	11.0 %	50.6 %	40.7 %
Altro	21.7 %	33.7 %	6.9 %	25.4 %

Tabella 3. Riscontri dei pixel classificati come alga sommersa sulla base delle immagini non radiometricamente corrette.

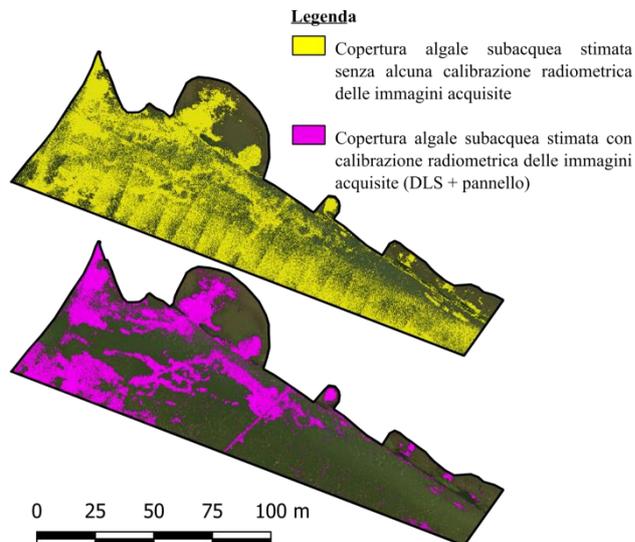


Figura 16. Risultati ottenuti tramite classificazione supervisionata con e senza calibrazione radiometrica.

5. CONCLUSIONI

Lo scopo principale di questo lavoro è stato lo studio di un sistema costituito da un Aeromobile a Pilotaggio Remoto equipaggiato con una camera multispettrale nell'individuazione, quantificazione e monitoraggio di alghe sommerse. Per questo scopo sono stati scelti due differenti siti all'interno della Sacca di Goro, una zona nel delta del Po particolarmente soggetta ad eutrofizzazione nella stagione estiva. Per ogni sito sono stati effettuati due distinti rilevamenti a distanza di 39 giorni l'uno dall'altro, volando ad una quota di 70 m per garantire una risoluzione geometrica pari a 5 centimetri. Le immagini sono state elaborate sia con Agisoft PhotoScan Professional sia con Pix4D Mapper Pro. Inoltre sono state testate diverse procedure di elaborazione, dalla totale mancanza di calibrazioni radiometriche, all'introduzione di correzioni basate sia sui dati rilevati da un sensore di irradianza ambientale sia tramite immagini di un pannello a riflettanza nota. Prima di procedere alla rilevazione della copertura algale subacquea sono stati effettuati dei test volti ad indagare la distribuzione dei valori, in particolari per l'indice NDVI, per alcune tipologie di copertura al suolo riscontrate nella zona rilevata e variando la tipologia di correzione radiometrica applicata. I risultati hanno chiaramente mostrato come, solamente attraverso una procedura di calibrazione radiometrica, sia possibile distinguere le diverse coperture al suolo in termini di indice spettrale. Un secondo limite evidenziato riguarda invece la soggettività del valore di soglia di NDVI da adottare in un simile approccio che, nel caso di colonne d'acqua di spessore variabile, può risultare difficile da individuare e comunque non affidabile. La procedura di classificazione supervisionata ha invece conseguito buoni risultati. La validazione, pur non essendo stata effettuata attraverso campionamenti puntuali in mare, ha comunque ottenuto valori di accuratezza globale (*Overall Accuracy, OA*) e di *K-coefficient*, calcolati grazie a regioni di interesse di riscontro (RoI truth), molto elevati. Essa è stata applicata con successo ad entrambi i siti oggetto del monitoraggio.

Infine, l'applicazione di una procedura di classificazione supervisionata ad un'ortofoto multispettrale ottenuta senza alcuna calibrazione radiometrica ha evidenziato risultati del tutto inattendibili se confrontata con i risultati ottenuti al punto precedente. Riassumendo, i risultati ottenuti in questo lavoro confermano come sia sostanzialmente possibile utilizzare un

sistema APR multispettrale, dal costo piuttosto contenuto, nel campo del monitoraggio di alghe in acque basse. Tuttavia la calibrazione radiometrica è una procedura pressoché imprescindibile se si vogliono ottenere risultati quanto più accurati ed oggettivamente quantificabili. L'elevato grado di automazione fornito da software quali Agisoft PhotoScan Professional e Pix4D Mapper Pro consente di applicare agevolmente le informazioni acquisite da sensori di irradianza ambientale durante il volo e/o di tenere conto di immagini di pannelli a riflettanza nota appositamente acquisite prima e dopo ogni volo fotogrammetrico. I benefici in termini di efficacia del monitoraggio dello stato di crescita e fioritura algale, nonché di tempistiche per l'adozione di misure atte a mitigare il proliferare delle alghe stesse, sono una diretta conseguenza delle mappature accurate che sono state presentate all'interno di questo lavoro.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare il personale ARPAE della Struttura Oceanografica Daphne per il supporto fornito durante le attività di rilievo e per alcuni dati aggiuntivi riguardanti la Sacca di Goro. Un ringraziamento va anche al dott. Marco Miotto che ha contribuito alle elaborazioni presentate in questo articolo durante la preparazione della propria tesi magistrale.

BIBLIOGRAFIA

Aasen H, Honkavaara E, Lucieer A, Zarco-Tejada PJ (2018), Quantitative Remote Sensing at Ultra-High Resolution with UAV Spectroscopy: A Review of Sensor Technology, Measurement Procedures, and Data Correction Workflows, *Remote Sensing*, Vol. 10, No. 7.

Candiago S, Remondino F, De Giglio M, Dubbini M, Gattelli M (2015) Evaluation Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sens.*, 7:4026-4047; doi:10.3390/rs70404026.

Corbau C, Munari C, Mistri M, Lovo S, Simeoni U (2016) Application of the Principles of ICZM for Restoring the Goro Lagoon. *Coastal Management*, Vol. 44, No. 4: 350-365.

Deng L, Yan Y, Gong H, Duan F, Zhong R (2018a) The effect of spatial resolution on radiometric and geometric performances of a UAV-mounted hyperspectral 2D imager, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 144, pp. 298-314.

Deng L, Mao Z, Li X, Hu Z, Duan F, Yan Y (2018b) UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 146, pp. 124-136.

Duffy JP, Pratt L, Anderson K, Land PE, Shutler JD (2018) Spatial assessment of intertidal seagrass meadows using optical imaging systems and a lightweight drone. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 200:169-180.

Hakala T, Markelin L, Honkavaara E, Scott B, Theocharous T, Nevalainen O, Näsi R, Suomalainen J, Viljanen N, Greenwell C., Fox N. (2018), Direct Reflectance Measurements from Drones: Sensor Absolute Radiometric Calibration and System Tests for Forest Reflectance Characterization, *Sensors*, Vol. 18, No. 5.

Hallegraeff GM (2003) Harmful algal blooms: A global review. In *Manual on Harmful Marine Microalgae; Monographs on Oceanographic Methodology Series*. UNESCO Publishing:

Paris, France 11:25-49.

Honkavaara E, Khoramshahi E (2018), Radiometric Correction of Close-Range Spectral Image Blocks Captured Using an Unmanned Aerial Vehicle with a Radiometric Block Adjustment, *Remote Sensing*, Vol. 10, No. 2.

Hossain MS, Bujang JS, Zakaria MH, Hascim M (2015) The application of remote sensing to seagrass ecosystems: an overview and future research prospects. *Int. J. of Remote Sensing* 36(1): 61-113.

Jhan JP, Rau JY, Huang CY (2016), Band-to-band registration and ortho-rectification of multilens/multispectral imagery: A case study of MiniMCA-12 acquired by a fixed-wing UAS, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 114, pp 66-77.

Kislik C, Dronova I, Kelly M (2018) UAVs in Support of Algal Bloom Research: a review of current applications and future opportunities. *Drones* 2,35; doi:10.3390/drones2040035.

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; doi: 10.3390/rs5126880.

MicaSense (2018), MicaSense RedEdge Image Processing Tutorial 1, [https://github.com/micasense/imageprocessing/blob/master/MicaSense Image Processing Tutorial 1](https://github.com/micasense/imageprocessing/blob/master/MicaSense%20Image%20Processing%20Tutorial%201), accessed 8 April 2019.

Nex F, Remondino F (2014) UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics* 6, 1: 1-15; doi:10.1007/s12518-013-0120-x.

Papakonstantinou A, Topouzelis K, Pavlogeorgatos G (2016) Coastline Zones Identification and 3D Coastal Mapping Using UAV Spatial Data. *International Journal of Geo-Information* 5,75; doi:10.3390/ijgi5060075.

Richards JA, Xiuping J (2006) *Remote Sensing Digital Image Analysis: an introduction*. Fourth ed. Springer-Verlag, Berlin, pp 439.

Taddia Y, Corbau C, Zambello E, Pellegrinelli A (2019) UAVs for Structure-From-Motion Coastal Monitoring: A Case Study to Assess the Evolution of Embryo Dunes over a Two-Year Time Frame in the Po River Delta, Italy, *Sensors*, Vol. 19, No. 4:1717, doi:10.3390/s19071717.

von Bueren SK, Burkart A, Hueni A, Rascher U, Tuohy MP, Yule IJ (2015) Deploying four optical UAV-based sensors over grassland: challenges and limitations, *Biogeosciences*, 12, pp 163-175.

Wicaksono P, Kumara ISW, Kamal M, Fauzan MA, Zhafarina Z, Nurswantoro DA, Yogyantoro RN (2017) Multispectral Resampling of Seagrass Species Spectra: WorldView-2, Quickbird, Sentinel-2A, ASTER VNIR and Landsat 8 OLI. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 98 doi:10.1088/1755-1315/98/1/012039.