

POTENZIALITÀ E PROBLEMATICHE NELL'UTILIZZO DELLA FOTOGRAMMETRIA SUBACQUEA PER LA MISURA DELL'ACCRESIMENTO DI COLONIE CORALLIGENE

EVALUATION OF UNDERWATER PHOTOGRAMMETRY' PERFORMANCES IN THE ASSESSMENT OF CORAL REEF 3D CHANGES

Rossi P.^(a), Castagnetti C.^(a), Capra A.^(a), Brooks A.J.^(b), Mancini F.^(a)

^a Dip. di Ingegneria "Enzo Ferrari", Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, via Pietro Vivarelli 10, 41125 Modena, Italia- (paolo.rossi, cristina.castagnetti, alessandro.capra, francesco.mancini)@unimore.it

^b Marine Science Institute, University of California, Santa Barbara. Santa Barbara, California 93106-6150, USA- andy.brooks@ucsb.edu

PAROLE CHIAVE: Fotogrammetria subacquea, accrescimento di strutture coralligene, change detection, valutazione delle accuratezze, misurazioni subacquee, compensazione delle misure

KEY WORDS: Underwater photogrammetry, coral growth detection, accuracy assessment, underwater measuring, network adjustment

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

La sperimentazione eseguita ha come obiettivo la messa a punto e verifica di una metodologia idonea alla misura dei livelli di accrescimento di complesse strutture coralline situate nell'Isola di Moorea (Polinesia Francese) attraverso rilievi fotogrammetrici subacquei ripetuti nel tempo. In considerazione del tasso di accrescimento prevedibile per tali organismi, dell'ordine di 10-15 mm/anno, il metodo proposto si basa su idonee procedure in grado di garantire tali livelli di accuratezza nella rappresentazione tridimensionale dell'oggetto di interesse. L'approccio seguito è quello fotogrammetrico basato sugli algoritmi di Structure from Motion e sull'installazione di reti topografiche di appoggio sul fondale, i cui vertici costituiscono i punti di controllo per le successive elaborazioni. La ricostruzione degli ammassi coralligeni a partire da immagini subacquee acquisite in immersione consente di quantificare le principali caratteristiche ecologiche e la complessità strutturale dell'ambiente di barriera. A tal fine, il lavoro presenta gli strumenti progettati e utilizzati per la misurazione dei punti della rete di controllo, i risultati della compensazione di osservazioni di distanza e dislivelli che ha portato a livelli medi di precisione di 1.2 mm e 2.9 mm rispettivamente nella componente orizzontale e verticale. Le accuratezze finali delle ricostruzioni fotogrammetriche sono nell'ordine di 1 centimetro e pochi millimetri rispettivamente per le due campagne di monitoraggio riportate (2017 e 2018); questo si traduce in una significatività del confronto multi-temporale di circa 1 cm. Le variazioni identificate possono essere ragionevolmente interpretate come crescita o dissoluzione del corallo, se superiori a questa grandezza. Il confronto diretto tra le due nuvole di punti successive è risultato efficace nella valutazione dei principali trend di crescita e nelle analisi morfometriche. Inoltre, il metodo proposto si rivela utile nelle valutazioni quantitative di fenomeni a livello locale condotte da operatori esperti attraverso una opportuna gestione dei modelli fotogrammetrici e dei prodotti bidimensionali ottenuti dal loro confronto.

ABSTRACT

This paper presents a multi-temporal underwater photogrammetric survey of a reef patch located in Moorea Island (French Polynesia) to detect a coral growth at a required level of accuracy of 10-15 mm\years. An approach based on processing of underwater imagery by the well-known Structure from Motion method and ground control points derived from the adjustment of underwater topographic measurements allowed the three-dimensional quantification of ecological characteristic at patch scale and an assessment of the reef growth and its structural complexity. To guarantee the repeatability of surveys over time at required level of accuracy and spatial resolution, the paper introduces issues related to reference frame, network adjustment and design of photogrammetric surveying. Measuring tools and reference points were properly designed and presented by the authors. The network adjustment performed after measuring distances and height differences, provided an average precision of 1.2 mm and 2.9 mm in the horizontal and vertical component respectively. The final positional precision of photogrammetric reconstructions was in the order of 1 centimeter and few millimeters for 2017 and 2018 monitoring campaigns respectively. Then, the accuracy of the comparison resulted of about 1 cm which represents a factor to be considered in the successive interpretations of coral growth or dissolution phenomena. The direct comparison of the two subsequent point clouds is effective in the evaluation of growth rates and in the successive morphometric analyses. For highly accurate quantitative assessment of local changes, an expert operator can create and analyze specific 2D profiles that easily come from the point clouds.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, numerosi autori hanno documentato il declino delle barriere coralline a livello globale (Bellwood e al., 2004; Gardner e al., 2003; Pennisi e al., 2002) in risposta a fattori antropici che operano sia a livello locale che globale. A scala locale intervengono alcune pratiche utilizzate nella pesca, lo sviluppo delle zone costiere e fenomeni di inquinamento (Mora, 2008); anche i mutamenti climatici e l'acidificazione degli oceani possono contribuire al declino dell'ecosistema delle barriere coralline a scala globale (Barker e al., 2008). Questa tendenza è documentata grazie a varie metodologie d'indagine che spaziano dal telerilevamento satellitare e aereo alle osservazioni ottenute da sensori sottomarini equipaggiati con sistemi ottici, acustici e LIDAR (Kocak and Caimi, 2005; Johnson-Roberson e al., 2010). A tali metodologie si aggiungono le operazioni "in situ" basate sulla fotogrammetria subacquea (Burns e al., 2015; Royer e al., 2018). Le metodologie citate hanno consentito la descrizione dell'habitat di barriera corallina a varia scala e con diversi livelli di accuratezza e definizione spaziale. I metodi satellitari hanno permesso di indagare vaste aree di barriera corallina mentre il rilievo condotto da imbarcazione è risultato spesso complesso nelle condizioni operative riscontrate in acque prossime alle barriere coralline. Al contrario, le operazioni eseguite sul campo da subacquei esperti con fotocamere amatoriali hanno permesso la ricostruzione 3D dell'ecosistema della barriera, aprendo le porte a rilievi accurati e dettagliati per il monitoraggio della crescita delle formazioni coralline e nella valutazione della loro complessità strutturale (Bryson e al., 2017).

Gli studi convenzionali sulle barriere coralline si basano su analisi di tipo planare e bidimensionale, e risultano inadeguati alla descrizione quantitativa dei parametri che si basano su caratteristiche 3D, come ad esempio la rugosità, la forma e il tasso di crescita. Tuttavia, la difficoltà nel generare prodotti 3D alla scala spaziale desiderata ha limitato, nell'ambito ecologico subacqueo, questo tipo di studi. Ad oggi, infatti, solo poche sperimentazioni sono state eseguite con i livelli di accuratezza metrica richiesti per la valutazione nella stima dei tassi di accrescimento e nella valutazione della complessità strutturale dell'habitat di barriera corallina.

Negli ultimi anni, grazie all'utilizzo della fotogrammetria basata sugli algoritmi di Structure from Motion (SfM), le immagini acquisite da UUV (Unmanned Underwater Vehicles) e da operatori subacquei possono essere utilizzate nella ricostruzione di caratteristiche morfologiche, siti archeologici e comunità bentoniche con una risoluzione spaziale a livello centimetrico e millimetrico, in funzione delle condizioni operative, della fotocamera utilizzata e della distanza di acquisizione (Capra e al., 2017, 2015; Drap e al., 2013). La sequenza di processamento delle immagini con gli algoritmi di SfM è documentata in numerose pubblicazioni in cui sono utilizzate immagini aeree o terrestri (Aguiera-Vega e al., 2016; Eltner e al., 2016; Harwin e al., 2015; Mancini e al., 2013; Nex and Remondino, 2013; Rupnik e al., 2014; Toschi et al., 2013). Questi studi dimostrano che si può ottenere un'accuratezza centimetrica nel posizionamento assoluto dei prodotti generati quando un sistema di riferimento affidabile è materializzato attraverso l'installazione di punti di vincolo (Ground Control Points, GCP) rilevati con metodologie accurate (deviazione standard inferiore al centimetro). Vi sono invece poche pubblicazioni che analizzano l'accuratezza metrica dei modelli tridimensionali ottenuti dal processing di dataset di immagini subacquee seguendo l'approccio SfM; l'argomento risulta di

fondamentale importanza nelle indagini rivolte al monitoraggio attraverso rilievi fotogrammetrici eseguiti in epoche successive. Figueira e al., (2015) hanno valutato la precisione (mediante rilievi ripetuti) e l'accuratezza (utilizzando un modello da laser come riferimento) di modelli 3D rappresentanti habitat marini utilizzando la fotogrammetria subacquea a varie scale di indagine. Replicando i rilievi in un ambiente controllato, gli autori hanno trovato differenze medie nella morfologia di 1-6 mm per le colonie di corallo e di 25 mm per l'area della barriera corallina. Le informazioni sull'accuratezza ottenute dai rilievi fotogrammetrici subacquei sono essenziali ogni volta che questi risultati sono pianificati per scopi di monitoraggio. In particolare, il livello di accuratezza raggiunto nel posizionamento di prodotti tridimensionali e nella loro definizione spaziale è cruciale nelle indagini fotogrammetriche subacquee multi-temporali finalizzate alla quantificazione dei cambiamenti ed alla determinazione del tasso di crescita.

Ai fini del confronto multi-temporale per il monitoraggio della crescita o del declino delle strutture coralline e degli ambienti circostanti, i modelli 3D ottenuti dai dataset fotogrammetrici devono essere riconducibili ad un riferimento comune e il confronto sufficientemente accurato per essere sensibile ai tassi di crescita tipici delle strutture coralligene, dell'ordine di 10-15 mm/anno (Skarlatos e al., 2017 Neyer e al., 2018). Da quanto detto si evince che la scelta di un sistema di riferimento accurato e l'implementazione della procedura di monitoraggio dello stato di salute della barriera corallina basata su fotogrammetria subacquea, nelle particolari condizioni operative, è ancora un problema aperto.

Per rispondere alle esigenze citate, lo studio presenta una metodologia per il rilevamento fotogrammetrico ripetuto di un'area di barriera corallina prospiciente l'Isola di Moorea (Polinesia Francese, Sud Pacifico). Data la necessità di accuratezze a livello centimetrico è stato necessario realizzare e misurare una rete di controllo finalizzata a materializzare il sistema di riferimento locale, comune fra le epoche, per il successivo confronto dei modelli fotogrammetrici ricostruiti nel tempo (Guo e al., 2016). L'indagine su scala locale (circa 100 m²) è stata eseguita nell'ambito del progetto Moorea Island Digital Ecosystem Avatar (IDEA), avviato nel 2013 da un gruppo di ricercatori internazionali. Questo articolo introduce una metodologia in grado di rilevare i tassi di crescita e i piccoli cambiamenti strutturali delle colonie coralline della barriera.

1.1 Il progetto IDEA Moorea

Il progetto IDEA Moorea è ispirato alla creazione di un avatar digitale di Moorea, isola di origine vulcanica situata in nella Polinesia francese. Il progetto coinvolge un gruppo interdisciplinare di esperti riunito al fine di sviluppare un sistema di relazioni complesse in cui i dati ecologici e le informazioni sociali sono riuniti in un modello complessivo di evoluzione dell'isola (<https://mooreaidea.ethz.ch/project>) che permetterà di identificare strategie preventive e definire politiche di sostenibilità. La misurazione tridimensionale dell'evoluzione nel tempo delle barriere coralline, come parte del complesso ecosistema, è una componente essenziale nelle indagini sugli impatti dei cambiamenti climatici (incremento delle temperature delle masse d'acqua oceaniche, incremento nella frequenza dei cicloni, fenomeni di acidificazione degli oceani). Le prime esperienze del gruppo coinvolto nelle indagini con fotogrammetria subacquea nell'isola di Moorea risalgono al 2015 e continuano tutt'ora. L'area investigata si trova al di fuori della laguna (Fig. 1) ad una profondità di circa 10 m. È stata selezionata per la sua posizione e la varietà di

colonie di coralli che la popolano. Il sito di test esaminato in questo documento (numero 17) fa parte di un'area di interesse più ampia (estesa in senso lineare per un centinaio di metri), e costituisce uno dei cinque siti campione che finora sono stati scelti per testare le prestazioni della fotogrammetria subacquea per gli scopi designati. In questo documento sono mostrati i risultati del monitoraggio ottenuti dal confronto fra i prodotti delle campagne relative agli anni 2017 e 2018.

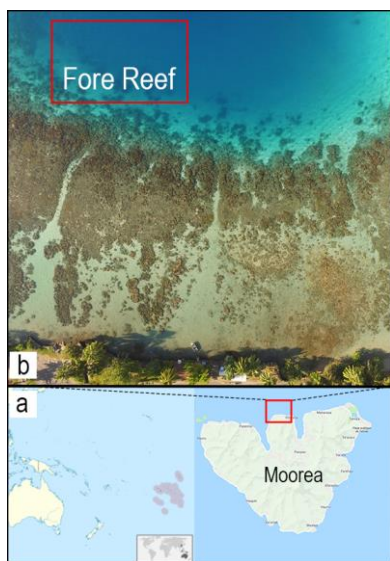


Figura 1. Area di indagine: a) mappa dell'area; b) foto di dettaglio dall'alto, nel rettangolo rosso è contenuta la porzione di barriera corallina analizzata, localizzata in mare aperto esternamente alla laguna.

2. METODOLOGIE

La fotogrammetria subacquea è una tecnica di rilievo non invasiva, adatta per eseguire una ricostruzione di alta precisione della barriera corallina ed fornire una risoluzione sufficiente per il monitoraggio delle barriere coralline nelle loro condizioni naturali. La progettazione e l'installazione di una corretta rete di controllo è necessaria per garantire la ripetibilità delle misure fotogrammetriche nel tempo all'interno dello stesso sistema di riferimento; questo è un aspetto essenziale per implementare sistemi di monitoraggio efficaci e per eseguire analisi multi-temporali affidabili in qualsiasi tipo di applicazione.

2.1 Rete di controllo

2.1.1 Progettazione ed installazione

La rete di controllo è definita mediante la materializzazione di un numero di punti di controllo (GCP), ben identificabili, con coordinate definite sulla base di un processo di compensazione di misure geodetiche. Tali GCP sono successivamente utilizzati come vincoli nella restituzione fotogrammetrica ai fini dell'orientamento dei modelli 3D generati e costituiranno il riferimento per i confronti multi-temporali. I punti sono posizionati in modo da ricoprire in modo omogeneo l'area investigata (sia in termini di estensione sia di profondità variabili), garantire la massima visibilità nelle immagini acquisite e consentire le misure topografiche della rete. I GCP richiedono un'installazione stabile e univoca per poter riposizionare il riferimento nella stessa posizione in ogni successiva campagna di monitoraggio. L'ambiente subacqueo richiede particolari accorgimenti: ogni GCP viene

materializzato perforando il substrato di roccia con un piccolo foro verticale (4-5 cm di profondità) e inserendo in ogni foro un tassello, in modo che una barra filettata da 5/8 di pollice possa esservi avvitata all'interno. Questa scelta non ha un impatto visivo sull'ambiente, non danneggia la barriera corallina e localizza i GCP in un substrato diverso rispetto a quello occupato dagli organismi coralligeni, che sono l'obiettivo del sistema di monitoraggio. Il sito indagato, denominato "fore reef n.17" (Fig. 2a), è caratterizzato da una rete che si estende per una lunghezza e una larghezza di circa 5 metri, costituita da 5 GCP distanziati in modo omogeneo installati durante la campagna di Gennaio 2017.

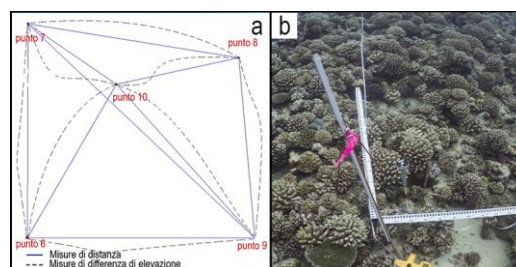


Figura 2. a) schema del sito investigato con indicazione dei punti di controllo e le misure geodetiche effettuate; b) immagine subacquea del sito con particolare delle barre graduate utilizzate per la validazione dei modelli 3D ottenuti.

2.1.2 Progettazione delle attrezzature ed esecuzione delle misure

L'identificazione dei cambiamenti morfologici e volumetrici nella struttura della barriera corallina rappresenta un'applicazione che comporta pratiche di rilevamento accurate sia nella generazione dei prodotti fotogrammetrici sia nel calcolo delle coordinate dei GCP. Nel contesto di questa sperimentazione gli strumenti geodetici più comuni non possono essere utilizzati ai fini del rilevamento dei GCP. Attrezzature speciali e dispositivi di misurazione ad-hoc sono stati progettati e sperimentati durante i test in campo per effettuare misure di distanza e dislivelli tra i punti di riferimento installati. Lo scopo è quello di fornire un protocollo di indagine applicabile al contesto delle barriere coralline da parte di operatori non necessariamente esperti nelle discipline del rilevamento di precisione per misurare GCP e consentirne l'identificazione univoca in fase di elaborazione delle immagini. Al fine di fornire le coordinate accurate dei GCP in un sistema di riferimento locale, sono stati progettati i seguenti dispositivi:

- barre filettate 5/8 di pollice, della lunghezza di 30 cm, avvitate su fori destinati ad ospitare i GCP per consentire le misurazioni ad ogni campagna di monitoraggio (Fig. 3a);
- cilindri in alluminio, con diametro di 30 mm e lunghezza di 160 mm, avvitati su ogni barra filettata sui quali si possono ospitare in sommità due inserti intercambiabili dedicati alle misure geodetiche o alla collimazione del GCP (Fig. 3a e 3b). Questi cilindri, accoppiati alle barre filettate, sono essenziali per sollevare i punti di riferimento dal fondale e superare eventuali ostacoli legati alla morfologia locale e rendere possibile la collimazione dei GCP a partire dagli altri punti della rete o da altre stazioni di misurazione;
- inserto dedicato alle misure di distanza (anello di misurazione). Questo è progettato con un perno inferiore che si inserisce nel cilindro in alluminio consentendo rotazioni in senso azimutale e evitando qualsiasi slittamento verticale. Sulla sommità vi è un anello con una piccola apertura laterale, a mezza altezza, che viene usata come riferimento per le osservazioni di distanza. Le misure di distanza tra i punti della

rete vengono eseguite per mezzo di un metro a nastro con gradazione millimetrica (Fig. 3b);

- inserto dedicato all'identificazione dei GCP nelle immagini per trasformare il vertice in target fotogrammetrico. È progettato per adattarsi al cilindro in alluminio, di forma circolare (80 mm di diametro e 40 mm di altezza) con una sottile trama in bianco e nero codificata attaccata nella parte superiore. Ogni target fotogrammetrico è denominato con un numero riportato sul lato (Fig. 3a). Il target è codificato per permettere il riconoscimento automatico durante il processo fotogrammetrico.

I due inserti sono progettati in modo tale che il target e il centro dell'anello (riferimento per le misure di distanza) si trovino alla stessa quota. Le due parti sono velocemente intercambiabili dall'operatore subacqueo in funzione della fase particolare di lavoro (misure della rete o acquisizione di immagini). L'intera installazione (barra, palo e adattatori) viene rimossa alla fine del rilievo per lasciare il fondale libero da oggetti artificiali;

- puntatore laser verde e stadia di livellazione con graduazione millimetrata. Questi sono utilizzati per misurare i dislivelli tra i punti: il puntatore laser è installato su un treppiede, quindi puntando verso l'asta il laser consente ai subacquei di eseguire la lettura precisa (Fig. 3f);

- supporto speciale per il puntatore laser. È stato sviluppato ad hoc a seguito di test, eseguiti in aria, che hanno evidenziato una deviazione della linea di mira in funzione dell'orientamento azimutale. La lettura sull'asta non è la stessa se eseguita con il dispositivo in posizione I o in posizione II (dove la posizione II si ottiene ruotando di 180° il puntatore laser intorno al suo asse). Per consentire la doppia misura, registrare le letture con il puntatore in entrambe le posizioni e quindi calcolare le medie tra le due osservazioni, il supporto è stato progettato in modo da consentire la rotazione senza modificare la posizione del puntatore né la posizione dell'origine di misurazione. L'installazione su un adattatore rotante avvitato al treppiede consente la rotazione azimutale del dispositivo, è quindi possibile puntare aste graduate posizionate in qualsiasi direzione (Fig. 3c) senza pregiudicare la qualità delle osservazioni;

- un adattatore da collegare al tassello di ciascun GCP è stato sviluppato per bloccare la stadia durante le livellazioni, consentendo un posizionamento ripetibile e facilitando il raggiungimento della verticalità della stadia durante le misure (Fig. 3d).

Tutti i dispositivi sono prodotti in alluminio, per evitare gli effetti della corrosione dovuta all'acqua marina, ed hanno un riferimento verticale comune che assicura l'intercambiabilità dei dispositivi che possono essere utilizzati sul punto.

Sono state seguite alcune strategie operative per ottimizzare l'acquisizione dei dati e migliorare l'accuratezza finale: 1. le misure di distanza sono ottenute dall'estensione del metro a nastro tra i due adattatori (anelli) installati sui GCP (Fig. 3e). Ogni distanza viene misurata due volte invertendo le estremità del metro. Questa fase richiede molta attenzione in quanto il metro deve essere ben disteso in entrambe le acquisizioni per evitare gli effetti delle correnti ma non tirato forzando sull'adattatore per evitare errori di misura legati all'eventuale piegamento delle barre di installazione dei GCP durante la misura. Sono eseguite numerose misure di distanza per ottenere una serie di osservazioni ridondanti tra i GCP (le distanze acquisite variano da 2 a 11 m). 2. Le misure dei dislivelli forniscono l'assetto altimetrico fra i vertici della rete (Fig. 3f). Si è eseguita una livellazione dal mezzo posizionando il puntatore laser a una distanza intermedia fra i GCP coinvolti nell'osservazione. In questo modo, gli errori residui di

verticalità del dispositivo di misurazione, causati dall'imperfetta installazione verticale del treppiede, vengono eliminati per simmetria. Inoltre, ogni lettura viene ripetuta due volte ruotando il puntatore laser di un angolo piatto, quindi eliminando anche la deviazione del raggio laser. La rete è stata misurata nell'agosto 2017 e nell'agosto 2018; la strategia sopra descritta è stata implementata nell'agosto 2018 (Fig. 2b) con ottimi risultati, significativamente migliori rispetto ai precedenti. Il presente documento riporta le coordinate dei GCP ottenute dalle misurazioni effettuate nel 2018.

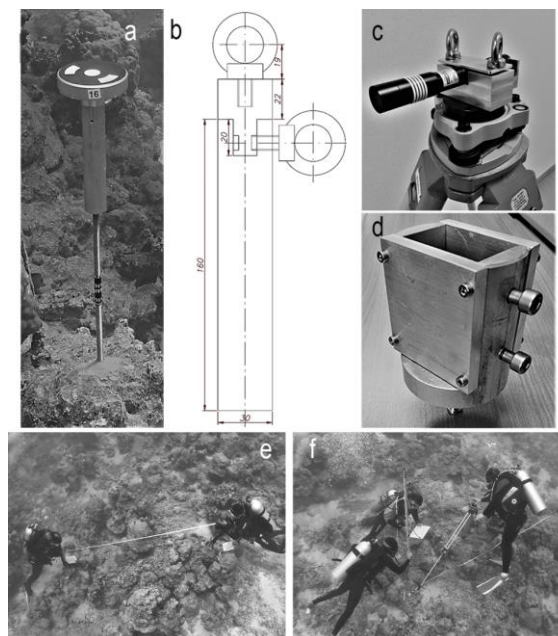


Figura 3. Attrezzature per l'esecuzione delle misure. a) installazione in sito di un GCP composta da barra filettata, cilindro in alluminio e target fotogrammetrico; b) progetto di un GCP, composto da cilindro in alluminio ed inserto per le misurazioni di distanza; c) puntatore laser con adattatore per l'installazione su treppiede; d) adattatore per la stadia di livellazione; e) acquisizione delle misure di distanza in condizioni operative; f) acquisizione delle misure di dislivello in condizioni operative.

2.1.3 Compensazione della rete

La rete di controllo subacquea ha consentito il calcolo delle coordinate dei punti, tramite compensazione delle misure effettuate, con accuratezza inferiore al centimetro. Tali GCP sono poi stati utilizzati come riferimento nell'orientamento esterno dei modelli fotogrammetrici.

La rete di controllo stabilisce il sistema di riferimento locale che viene convenzionalmente fissato definendo un punto di origine e un secondo che indica la direzione di riferimento (strategia a minimi vincoli). Il sistema di riferimento locale adottato nel sito indagato è fissato nel punto n. 6 con l'asse x rivolto verso il punto n. 9 (Fig. 2a). Per evitare valori negativi nella componente verticale, l'elevazione dell'origine è impostata su 5.00 m (Tabella 1). Le osservazioni grezze vengono pre-elaborate per rilevare eventuali valori anomali. Per le distanze si valuta lo scostamento dei due valori misurati rispetto alla media tra i due al fine di individuare errori grossolani; nei dislivelli si valuta invece l'errore di chiusura sugli anelli di livellazione eseguiti. Le deviazioni standard a priori sulle osservazioni sono impostate ad 1 mm per le osservazioni di distanza e 5 mm per le differenze di elevazione. Rispetto al numero delle incognite, le

osservazioni sono sufficientemente ridondanti per una operazione di compensazione rigorosa ai minimi quadrati; si hanno complessivamente 18 osservazioni tra distanze medie e dislivelli. La rete di controllo è composta da 5 vertici, di cui uno considerato origine del sistema locale ed un altro come orientamento. Le incognite sono quindi 11 e il numero di osservazioni ridondanti è 7. La compensazione è stata eseguita tramite la suite commerciale STAR * NETPRO v. 6.0.36, Starplus Software Inc. (Oakland, CA).

Le coordinate compensate dei GCP e le accuratezze ottenute (con un livello di confidenza del 68%) sono riportate in Tabella 1. La compensazione della rete di controllo ha fornito risultati molto soddisfacenti: l'accuratezza media è di 1.2 mm nella componente orizzontale e 2.9 mm nella verticale. Le sigma più alte sono al vertice 8, punto più lontano dall'origine del sistema di riferimento.

ID	X [m]	Y [m]	Z [m]	σX [mm]	σY [mm]	σZ [mm]
6	0.000	0.000	5.000	0.0	0.0	0.0
7	0.018	5.370	4.566	1.5	1.0	3.6
8	5.323	4.519	4.316	1.5	1.0	4.1
9	5.724	0.000	4.661	1.0	0.0	3.6
10	2.238	3.854	4.811	1.2	0.9	3.4

Tabella 1. Risultati della compensazione di rete. Coordinate e accuratezze (al 68% livello di confidenza).

2.2 Rilevo fotogrammetrico subacqueo

Il rilievo fotogrammetrico è effettuato una volta all'anno da subacquei esperti che operano in aree di dimensioni medio-piccole e poco profonde. I subacquei provvedono all'installazione del target fotogrammetrico e al controllo dell'integrità della rete di controllo.

2.2.1 Acquisizione delle immagini

Negli anni di attività presso l'isola di Moorea sono state utilizzate diverse fotocamere e configurazioni per l'acquisizione dei fotogrammi, sia camere compatte sia *action cameras*, sia camere in modalità singola sia accoppiate, per testarne le prestazioni in ambiente subacqueo e definire le impostazioni ottimali. In questo studio sono presentati i risultati ottenuti con la fotocamera Lumix DMC-GH4. La custodia subacquea della fotocamera ha una *dome port* che riduce gli effetti di distorsione generati dalla presenza del mezzo acqua (Menna e al., 2016). La fotocamera è stata impostata con una lunghezza focale nominale in aria di 20 mm nel 2017 e 22 mm nel 2018; si prevede un valore effettivo inferiore nell'ambiente subacqueo in considerazione dell'effetto di ingrandimento pari a 1/4 prodotto dal mezzo acquatico (Capra, 1993). Il tempo di esposizione è stato fissato in 1/90 nel rilievo del 2017 e 1/125 nel rilievo 2018.

Inoltre, la messa a fuoco della fotocamera è stata impostata in modo automatico, la variazione della distanza di acquisizione delle immagini è risultata così leggera che la messa a fuoco automatica non ha prodotto alcun cambiamento significativo nella lunghezza focale e i parametri interni della fotocamera sono rimasti pressoché costanti durante il rilievo. La velocità di acquisizione dei fotogrammi è stata impostata ad 1 secondo e la distanza tra la fotocamera e il fondale era di 2 metri nel 2018 e di 5 metri nel 2017. Come indicato in Fig. 4, diverse strisciate sono state eseguite dai subacquei sul sito per garantire la giusta sovrapposizione di immagini e una ridondanza superiore al 90%. Per ottenere prodotti di elevata accuratezza è necessaria, infatti, una robusta geometria di acquisizione che si ottiene con

una copertura di immagini acquisite sia lungo direzioni longitudinali sia trasversali. L'area di interesse è stata rilevata con un assetto della fotocamera compreso tra 0° e 30°; ciò ha consentito di rappresentare nelle immagini anche le porzioni verticali delle strutture (Rossi e al., 2017) ed evitare occlusioni legate alla complessa morfologia delle colonie coralligene. L'acquisizione delle immagini è stata eseguita in condizioni di luce naturale, in assenza di correnti e preferendo le ore centrali della giornata, questo per evitare ombre, materiali sospesi e, quindi, ottenere immagini di miglior qualità.

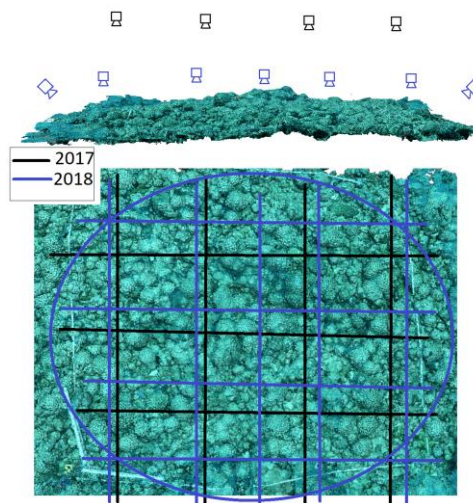


Figura 4. Schema di acquisizione fotogrammi. In nero il rilievo del 2017, in blu quello del 2018. Immagine in alto vista in sezione dello schema di acquisizione, in basso vista dall'alto.

2.2.2 Elaborazione delle immagini e confronto tra i modelli fotogrammetrici

L'elaborazione fotogrammetrica è stata eseguita all'interno il software commerciale Agisoft PhotoScan v.1.3.4 e progettata per garantire i migliori risultati ottenibili nelle condizioni operative descritte. In applicazioni di monitoraggio, la ripetibilità è un concetto chiave che consente di ottenere risultati confrontabili nel tempo; usare lo stesso software con le stesse impostazioni è rilevante. La prima fase di elaborazione consiste nella rimozione delle immagini di bassa qualità; quindi viene eseguito un orientamento preliminare delle immagini attraverso l'identificazione automatica dei punti di legame. I punti di legame con un errore di riproiezione elevato (principalmente quelli al di fuori dell'area indagata o rilevati in sole due immagini) vengono rimossi e i GCP, codificati, automaticamente identificati nelle immagini. L'orientamento delle immagini viene quindi ottimizzato e vincolato introducendo le coordinate dei GCP, i cui valori numerici e le relative accuratezze sono ottenute dalla compensazione della rete (Tabella 1). I vincoli esterni definiti dalle coordinate dei GCP consentono di ottenere la posizione e gli orientamenti reali delle fotocamere, il calcolo dei parametri interni della fotocamera e di fornire un modello 3D georeferenziato. L'uso di una procedura di self-calibrazione garantisce risultati accurati (come dimostrato da Snavely e al., 2006) perché i parametri interni della fotocamera sono stimati sulla base delle immagini acquisite, quindi tenendo conto delle reali condizioni operative del rilievo. La nuvola di punti densa è generata utilizzando algoritmi di dense image matching: la correlazione tra pixel appartenenti a diverse immagini consente la ricostruzione di una mappa di profondità e la creazione di una nuvola di punti con elevata densità. Solo le nuvole di punti 3D originali saranno

coinvolte nelle analisi successive poiché qualsiasi intervento di modellazione di superfici introdurrebbe effetti di interpolazione con conseguente perdita di dettagli locali. La validazione delle nuvole di punti generate e la stima delle accuratezze finali viene eseguita utilizzando punti/oggetti le cui coordinate/dimensioni sono note e non precedentemente impiegate nell'elaborazione fotogrammetrica (Toschi e al., 2013). A tal fine, alcune barre graduate sono state posizionate nell'area investigata (solo nel dataset del 2018) prima dell'acquisizione delle immagini in modo da essere disponibili per la validazione (Figura 1c). Le differenze tra i valori reali e le stime date dalla ricostruzione 3D, identificate per alcune distanze sulle barre graduate, determinano l'accuratezza delle nuvole di punti calcolate. I modelli 3D ottenuti dai rilievi 2017 e 2018 vengono quindi confrontati per rilevare se si sono verificati cambiamenti significativi nella geometria della barriera corallina. Il confronto multi-temporale viene eseguito attraverso il calcolo delle distanze tra le nuvole utilizzando l'algoritmo Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2) (Lague e al., 2013) all'interno del software open source Cloud Compare v. 2.9. L'algoritmo tiene conto sia della complessità del modello 3D che del rumore della nuvola di punti per fornire un calcolo delle distanze corretto.

3. RISULTATI

3.1 Modelli 3D

I risultati dell'elaborazione fotogrammetrica per le missioni del 2017 e del 2018 sono elencati nella Tabella 2. L'orientamento

delle immagini è stato eseguito per entrambi i casi introducendo le medesime coordinate dei GCPs (valori riportati in Tabella 1). I due dataset differiscono in termini di numero di immagini e distanza di acquisizione (148 immagini acquisite con una distanza media di 4.5 m nel 2017, 552 immagini con distanza media di 2.1 m nel 2018); la risoluzione nelle immagini è quindi diversa (1.3 mm/pix e 0.5 mm/pix rispettivamente nel 2017 e 2018) e di conseguenza anche nei prodotti generati. Entrambe le acquisizioni hanno assicurato una elevata ridondanza delle immagini (> 9), ma la geometria di acquisizione è stata ulteriormente migliorata nel rilievo eseguito nel 2018 aumentando le strisciate nelle aree periferiche. I parametri di calibrazione interna della fotocamera variano tra le due epoche a seguito delle differenze di acquisizione, in particolare si notano variazioni di circa il 10% nei parametri di distorsione radiale ed intorno al 50% per i parametri di distorsione tangenziale. Al fine di ridurre le differenze nella risoluzione dei prodotti generati, la nuvola di punti densa per il dataset del 2017 è stata calcolata con impostazioni di alta qualità, mentre per il 2018 sono state utilizzate impostazioni di qualità media.

Questa strategia ridimensiona le immagini elaborate (alta qualità significa un fattore di riduzione dell'immagine pari a 4 rispetto alle dimensioni originali, media qualità indica un fattore di 16). Ciò si traduce in nuvole dense costituite da un simile numero di punti, a scapito di tempi di elaborazione più lunghi (per il calcolo relativo al 2017 è stato necessario un giorno in più rispetto al 2018 - Tabella 2, riga i).

FORE REEF, PLOT 17									
		Rilievo Agosto 2017				Rilievo Agosto 2018			
c	Immagini acquisite	148				552			
d	Distanza di acquisizione	4.5 m				2.1 m			
e	Risoluzione a terra	1.3 mm/pix				0.5 mm/pix			
f	Errore di riproiezione	1 pix				1.1 pix			
g	Nuvola di punti	35,660,000 punti(*)				33,550,000 punti(**)			
h	Orientamento delle immagini	1 hour				11 hours 30 minutes			
i	Generazione della nuvola densa	1 giorno 20 ore (*)				20 ore (**)			
l	Discrepanze sui GCP (valori medi)	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	3D [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	3D [mm]
		3.3	-0.2	-1.5	3.6	0.4	0.1	-0.0	0.4
m	Accuratezze stimate sulle barre graduate					X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	3D [mm]
n		Area nell'intorno del punto 6				0.3	0.3	0.5	0.7
o		Area nell'intorno del punto 7 e 9				0.9	0.4	0.05	1.0
p		Area nell'intorno del punto 8				0.9	0.5	0.1	1.1
(*) ricostruzione della nuvola di punti densa con impostazione di alta qualità									
(**) ricostruzione della nuvola densa con impostazioni di media qualità									

Tabella 2. Principali risultati dell'elaborazione delle immagini mediante SfM: impostazione di acquisizione, numerosità dei punti ricostruiti, tempi di elaborazione, discrepanze sui GCP e valutazione delle accuratezze ottenute sulle barre graduate.

Le nuvole di punti sono state generate nello stesso sistema di riferimento, definito dai vincoli imposti per le coordinate dei GCP. Il modello fotogrammetrico adatta la sua geometria ai vincoli imposti; di conseguenza si possono calcolare le discrepanze sui GCP tra le coordinate note a priori e quelle

stimate dal modello. Entrambi i modelli hanno mostrato discrepanze medie di pochi millimetri lungo le tre direzioni, 3.6 mm nel modello 2017 e 0.4 mm nel 2018 (Tabella 2, riga l); tali valori sono simili alla precisione delle coordinate in input. L'accuratezza dei modelli 3D generati viene valutata

confrontando lunghezze note sulle barre graduate con le medesime misurate sul modello 3D. Le differenze ottenute sono poi state normalizzate alla distanza di riferimento di 1 metro e mediate per ottenere un valore rappresentativo di accuratezza finale raggiunta. La ricostruzione più accurata (<1 mm) si ottiene attorno al punto 6 (origine del sistema di riferimento), la meno accurata (1.1 mm) viene rilevata nella posizione opposta (area attorno al punto 8).

3.2 Analisi multi-temporale

L'analisi multi-temporale e le valutazioni sullo sviluppo delle strutture coralline sono eseguite attraverso il confronto dei due modelli disponibili. La distanza tra i modelli 3D può evidenziare l'evoluzione del reef nel lasso di tempo considerato. Il punto chiave della metodologia applicata in questo studio (algoritmo M3C2) è la definizione della direzione normale alla nuvola di riferimento, lungo la quale viene poi calcolata la distanza tra le due nuvole di punti. La barriera corallina ha una grande complessità geometrica, inoltre ogni cambiamento delle caratteristiche ecologiche non ha una direzione predefinita; per definire la direzione lungo cui effettuare il calcolo delle distanze tra nuvole di punti, l'algoritmo M3C2 consente di definire un diametro di ricerca sul modello di riferimento che crea una superficie per la quale viene calcolata la normale. In questa sperimentazione il diametro varia tra 0,002 m e 0,02 m a seconda delle caratteristiche geometriche della barriera; la distanza 3D viene calcolata definendo il modello del 2017 come riferimento, il modello del 2018 viene quindi confrontato con esso.

La Figura 5 mostra i risultati del confronto proiettando le distanze calcolate sul modello del 2017 (che è stato precedentemente ricampionato a 0.005 m per accelerare il calcolo e l'analisi dei risultati). I valori compresi tra -60 mm e 60 mm dovrebbero essere rappresentativi dei fenomeni naturali (Fig. 5), i valori superiori a questi sono principalmente dovuti a errori nel calcolo della distanza, alla presenza di oggetti estranei o alla rottura di concrezioni coralline. Nella medesima figura è riportato l'istogramma di frequenza relativo ai valori ottenuti (a destra), da cui si nota un valore centrale pari a +12 mm e deviazione standard pari a 21 mm. La curva appare sbilanciata su valori positivi, comportamento che può essere attribuito al processo di sviluppo della colonia. Per indagare nel dettaglio i valori maggiormente significativi, analizziamo i soli risultati che superano la deviazione standard (± 20 mm): le distanze positive sono rappresentate dai toni del rosso (potenziale crescita del corallo) mentre le distanze negative (potenziale rottura o dissoluzione del corallo) sono rappresentate in blu. Le distanze positive significative sono ben distribuite nelle aree studiate e situate principalmente sulla sommità delle concrezioni, dove la crescita dei coralli è verosimilmente maggiore. La scala dei colori rappresenta, con il colore arancione, le distanze uguali a 30 mm, valori ragionevoli di crescita; in rosso sono rappresentate le distanze uguali e superiori a 50 mm che possono essere dovute ad errori in fase di confronto dei modelli 3D più che ad una crescita effettiva del corallo. I valori negativi delle distanze calcolate sono meno numerosi dei valori positivi e le concrezioni dei coralli non possono essere chiaramente identificate. La scala di colori adottata rappresenta in blu i valori superiori a -50 mm che sono probabilmente il frutto delle difficoltà della tecnica fotogrammetrica nella ricostruzione di aree nascoste e/o non facilmente identificabili nelle immagini. Infatti, questi valori si trovano principalmente sulle pareti verticali delle concrezioni e nelle strette cavità tra queste. La mappa indica anche piccole

porzioni blu che rappresentano fenomeni localizzati di danno delle concrezioni. La Figura 6 mostra un dettaglio del sito investigato in cui sono stati estratti alcuni profili delle nuvole di punti generate. I profili sono stati creati sezionando con piani verticali i modelli 3D delle due epoche. In particolare, Fig.6b mostra un'area nell'intorno della sezione 2 in entrambi i modelli, visualizzati con colori naturali. Il confronto tra le nuvole di punti è rappresentato con una scala dal blu al rosso per facilitarne l'analisi: i valori blu (Fig. 6a, presso Sez. 2) rappresentano le distanze negative, in questo caso corrispondono a una perdita di materiale correlata alla rottura di una concrezione.

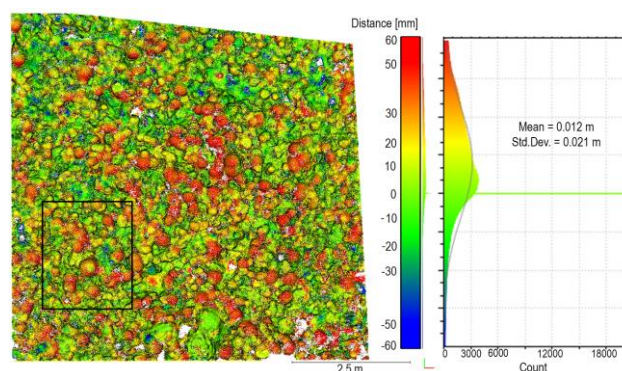


Figura 5. Confronto e calcolo della distanza tra il modello relativo all'anno 2017 (riferimento) e il modello ottenuto nel 2018; mappa delle distanze calcolate (valori compresi tra +/- 60 mm), distribuzione dei valori e parametri statistici. L'area nel riquadro è quella che sarà analizzata in dettaglio nella figura successiva.

Il materiale distaccato giace sul fondo marino vicino alla zona danneggiata ed è rilevato come area rossa nella mappa di confronto. Analisi più dettagliate possono essere eseguite mediante la creazione di sezioni verticali dei modelli 3D e dal confronto dei due profili estratti attraverso la misura manuale delle distanze dei punti (Fig. 6, in basso). In Figura 6a le linee nere specificano le sezioni verticali scelte, le frecce bianche indicano la direzione di osservazione per i profili estratti. Nella parte inferiore di Figura 6 sono mostrati i profili estratti, il confronto dei punti appartenenti alla stessa sezione verticale e le misurazioni manuali delle distanze consentono di eseguire un monitoraggio puntuale dei cambiamenti occorsi nella barriera corallina. I risultati ottenuti con il calcolo automatico della distanza, come eseguito con l'algoritmo M3C2, sono confermati in termini di variazioni medie. C'è un buon accordo geometrico tra i due modelli: il profilo 2018 mostra un processo di accrescimento, ponendosi tipicamente al di sopra di quello relativo al 2017 in corrispondenza delle concrezioni, mentre essi coincidono in corrispondenza di aree rappresentative del fondale. Le distanze positive sono più elevate nella parte sommitale delle concrezioni e diminuiscono sui fianchi. Nelle aree rosse le distanze identificate manualmente sono di circa 30 - 35 mm al massimo. Inoltre, rotture di concrezioni possono portare ad elevate distanze negative (ad esempio -135 mm nella Sez. 2), lo stesso effetto è generato anche dalle occlusioni che, nelle pareti verticali e nelle strette valli, impoveriscono la ricostruzione.

4. DISCUSSIONI

Il ruolo della rete di controllo è essenziale per la rigorosa definizione di un sistema di riferimento che permetta il

confronto multi-temporale e l'identificazione dei cambiamenti della struttura di una barriera corallina. Grazie al vincolo dei modelli imposti in base alle coordinate dei GCP, gli stessi sono direttamente e immediatamente comparabili senza dover manipolare ulteriormente i dati. Tali manipolazioni comprometterebbero il confronto rendendolo meno affidabile. La stima delle coordinate dei GCP deriva dalla compensazione ai minimi quadrati. Le scelte fatte in questo studio sulla compensazione della rete di controllo riguardano principalmente la strategia a minimi vincoli per stabilire il

sistema di riferimento. L'introduzione di un punto di vincolo e di un orientamento sono essenziali per la definizione esatta del sistema di riferimento. Questa scelta consente di riferire le elaborazioni di rilievi svolti in epoche successive al medesimo sistema di riferimento e non perdere la continuità temporale dei risultati qualora alcuni GCP venissero parzialmente danneggiati o si spostassero leggermente. In tal caso utilizzando i GCP rimasti si andrebbero ad aggiornare le coordinate pur rimanendo nello stesso sistema di riferimento, condizione essenziale nelle applicazioni di monitoraggio.

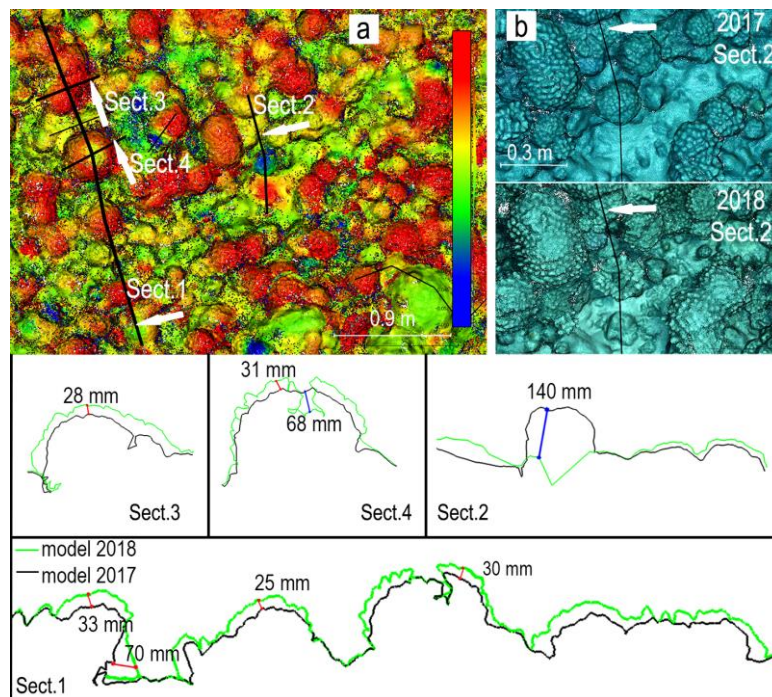


Figura 6. Confronto multi-temporale, sezioni verticali dei due modelli ottenuti. a, b) mappe delle sezioni estratte indicazione della vista. c) vista dei due modelli attorno a Sect.2. Nella parte bassa, n. 5 profili estratti con misure puntuali.

I risultati presentati si basano su diverse strategie di acquisizione dati poiché alcuni miglioramenti sono stati adottati nella campagna 2018: la distanza di acquisizione è stata ridotta, la fotocamera è stata posizionata con posa off-nadir e le strisciate sono state progettate a formare una griglia regolare sopra l'area di interesse che garantisce idonea copertura e ridondanza. La risoluzione media a terra varia da 1.3 mm/pixel nel 2017 a 0.5 mm/pixel nel 2018; questo si traduce in diverse caratteristiche all'interno delle nuvole di punti generate. Le modifiche alle impostazioni di generazione della nuvola densa consentono di ottenere prodotti con un numero di punti paragonabile e risoluzione confrontabile; i profili mostrati in Figura 4 evidenziano che entrambi i prodotti consentono l'identificazione di piccoli dettagli. Il minor numero di immagini nel 2017 influisce anche sulla robustezza della geometria della ricostruzione riducendo le osservazioni disponibili e la variabilità degli angoli di presa per punti ricostruiti (James et al., 2017). Alcune aree non sono state ricostruite a causa di occlusioni, queste sono principalmente localizzate in ambienti compresi fra le concrezioni (Fig. 5) e influenzano il confronto. L'acquisizione di immagini da distanze maggiori garantisce un'eccellente copertura dell'area, ma la risoluzione che ne deriva è inferiore e potrebbe non consentire di raggiungere l'accuratezza richiesta. Di contro, le immagini ottenute da distanza ravvicinata e in assetto convergente assicurano una maggior risoluzione della

ricostruzione, a discapito della possibilità di rappresentare correttamente ambienti quali canyon.

La stabilità del sistema di riferimento è l'ipotesi di base per una rete di controllo finalizzata ad un confronto multi-temporale affidabile; considerando il breve tempo intercorso tra le campagne di monitoraggio e il tipo di installazione dei benchmark, è ragionevole presumere che i GCP non siano soggetti a cambiamenti o modifiche e siano quindi stabili. Su lunghi periodi la loro stabilità deve essere verificata ripetendo le misure del terreno al fine di verificare la coerenza delle coordinate ed evitare un'interpretazione errata dei risultati. La causa più probabile dei diversi valori delle discrepanze sui GCP (riga 1 di Tabella 2) è la differenza tra le modalità di acquisizione delle immagini nelle due epoche. Infatti, la geometria di acquisizione influenza l'accuratezza dell'intera ricostruzione 3D (Harwin e al., 2015); in particolare, la maggiore distanza di acquisizione riduce l'accuratezza nell'identificazione dei target e impoverisce l'accuratezza complessiva dei prodotti generati, come suggerito da James e Robson (2012) per le applicazioni fotogrammetriche aeree, motivo per cui le discrepanze dei GCP risultano maggiori.

Il confronto delle nuvole di punti generate indica che le ricostruzioni sono ben allineate. L'algoritmo per il calcolo automatico delle distanze orientate tra le nuvole di punti evidenzia i principali comportamenti (Fig. 5): le aree di crescita sono situate principalmente sulla sommità degli organismi che

compongono la colonia di coralli. Va detto che il confronto tra nuvole di punti 3D ricostruite ad epoche differenti non costituisce un vero e proprio monitoraggio della deformazione, in quanto non è possibile identificare in modo univoco lo stesso punto nello spazio in due epoche diverse e seguirne l'evoluzione. L'algoritmo M3C2 tenta di risolvere questo problema definendo le soglie per i valori misurati e le direzioni di ricerca in relazione alla geometria della superficie 3D. Questo approccio consente l'analisi dei comportamenti prevalenti nell'evoluzione dell'architettura della barriera corallina, è un metodo molto efficace, automatico e veloce per valutare le tendenze di crescita e il comportamento medio delle varie colonie di coralli. Le distanze calcolate, però, non sono idonee ad una valutazione quantitativa e precisa dei cambiamenti nel tempo, per valutare quantitativamente delle modifiche relative a punti specifici nell'architettura della barriera è necessario creare sezioni e confrontare i profili estratti. In questo modo, un operatore esperto è in grado di identificare i punti di interesse omologhi ed effettuare misurazioni specifiche tra loro. Come discusso sopra, le distanze misurate sui profili sono più coerenti e rappresentative del fenomeno investigato e non superano +35 mm, anche nelle aree in cui l'algoritmo M3C2 calcola genericamente valori superiori a +45 mm.

Analisi effettuate sui risultati del confronto multi-temporale hanno permesso di valutare l'incertezza del confronto e definire le variazioni che possono essere ragionevolmente interpretate come crescita o dissoluzione del corallo, evitando così l'interpretazione errata di errori del modello 3D che non corrispondono a cambiamenti effettivi nella geometria della barriera corallina. I risultati generati dal confronto dei profili 2D sono influenzati dall'accuratezza di ciascuno dei due profili. Date le difficoltà introdotte dall'ambiente subacqueo, non è stato possibile impostare una metodologia per garantire il controllo dell'accuratezza sin dall'inizio delle sperimentazioni; il sistema di barre graduate è stato introdotto nel 2018 e ha consentito di verificare l'accuratezza del modello 3D tramite elementi di dimensioni note ed indipendenti dalla ricostruzione fotogrammetrica. Le valutazioni hanno fornito valori accuratezza pari a circa 1 mm (valore maggiore della discrepanza GCP fornita dal processo fotogrammetrico), pertanto è ragionevole considerare l'accuratezza del modello relativo all'epoca 2018 pari a pochi millimetri. Per quanto riguarda il modello ottenuto dalla campagna del 2017, in assenza di riferimenti esterni e tenendo conto delle discrepanze sui GCP, è ragionevole supporre un'accuratezza finale di 1 centimetro. Applicando la legge di propagazione degli errori si può attribuire al confronto multi-temporale un errore di circa 1 cm. Quindi, si può concludere che le differenze tra i modelli 2017 e 2018 superiori o inferiori a 1 cm potrebbero effettivamente rappresentare un cambiamento nell'architettura 3D della barriera corallina studiata. La verifica delle accuratezze sulle barre di riferimento è un processo empirico per la stima dell'accuratezza del modello 3D, ma risulta molto efficace in questo caso di studio e verrà potenziato nelle prossime campagne di rilievo.

5. CONCLUSIONI

Questo articolo rappresenta uno dei primi esempi di quantificazione tridimensionale dei cambiamenti geometrici di una barriera corallina a fronte delle perturbazioni antropogeniche e degli impatti legati ai cambiamenti climatici. I risultati discussi sono stati ottenuti grazie a indagini accurate, pur in presenza di problematiche relative al particolare contesto

ambientale, e a soluzioni strumentali e metodologiche adatte all'applicazione. I prodotti ottenuti garantiscono qualità metrica e definizione spaziale utile alla misura dei cambiamenti previsti nell'architettura 3D della barriera corallina. La lunghezza focale dell'obiettivo utilizzato deve rimanere fissa durante il rilievo per mantenere invariati tutti i parametri di calibrazione interni alla fotocamera; è consigliabile evitare lunghezze focali corte per ridurre le distorsioni metriche nelle immagini acquisite e utilizzare una custodia subacquea con una *dome port* adeguata per ridurre gli effetti di distorsione dovuti al mezzo acquoso. Il rilievo fotografico deve essere progettato in modo da garantire un elevato grado di sovrapposizione nelle immagini acquisite: eseguendo diverse strisciate sul sito di interesse con inclinazioni nadir e off-nadir della fotocamera. Una rete di appoggio accurata e materializzata in modo permanente ha un ruolo fondamentale nel confronto tra ricostruzioni 3D successive del sito. La scelta di idonea fotocamera, la distribuzione omogenea dei punti di riferimento nell'area, la loro materializzazione duratura e permanente nel tempo nonché le strategie di elaborazione rigorose permettono di ottenere prodotti 3D ad alta risoluzione e accuratezza. L'identificazione dei cambiamenti nel tempo è proposta in questo articolo attraverso il confronto di modelli 3D successivi nel tempo e consente la rimozione di errori sistematici comuni alle due ricostruzioni tridimensionali (Ogundare, 2015). L'uso delle stesse coordinate per i GCP, la rete di riferimento a minimi vincoli, i percorsi simili per l'acquisizione delle immagini e la ripetizione delle indagini in condizioni ambientali simili (sempre il medesimo periodo), sono strategie che consentono di ridurre gli errori relativi a strumentazioni, operatori, correnti marine, variazioni nell'indice di rifrazione dell'acqua e variazioni stagionali. La metodologia proposta costituisce un approccio efficace ed economicamente sostenibile finalizzato a quantificare la crescita o dissoluzione del corallo, i risultati ottenuti presentano un'accuratezza stimata e una risoluzione adatte alla quantificazione di cambiamenti di circa 10/15 mm / anno.

BIBLIOGRAFIA

- Adam, T. C., Brooks, A. J., Holbrook, S. J., Schmitt, R. J., Washburn, I., Bernardi, G., 2014. How will coral reef fish communities respond to climate-driven disturbances? Insight from landscape-scale perturbations. *Oecologia*, 176, pp. 285-296.
- Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P., 2016. Accuracy of digital surface models and orthophotos derived from unmanned aerial vehicle photogrammetry. *J Surv Eng*, 04016025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000206](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000206)
- Baker, A. C., Glynn, P. W., Riegl, B., 2008. Climate change and coral reef bleaching: An ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. *Estuar Coast Shelf Sci*, 80, pp. 435-471.
- Bellwood, D. R.; Hughes, T. P.; Folke, C.; Nystrom, M., 2004. Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 429, pp. 827-833.
- Bryson, M., Ferrari, R., Figueira, W., Pizarro, O., Madin, J., Williams, S., Byrne, M., 2017. Characterization of measurement errors using structure-from-motion and photogrammetry to measure marine habitat structural complexity. *Ecol Evol*, 7(15), pp. 5669-5681.
- Burns, J. H. R., Delparte, D., Gates, R. D., Takabayashi, M., 2015. Integrating structure-from-motion photogrammetry with geospatial software as a novel technique for quantifying 3D ecological characteristics of coral reefs. *PeerJ*, 3: e1077.

- Capra, A., 1993. Non-conventional system in underwater photogrammetry. *Int Arch Photogramm Remote Sens*, 29, pp. 234-234.
- Capra, A., Castagnetti, C., Dubbini, M., Gruen, A., Guo, T., Mancini, F., Neyer, F., Rossi, P., Troyer, M., 2017. High accuracy underwater photogrammetric surveying. In *3rd IMEKO international conference on metrology for archaeology and cultural heritage-MetroArcheo 2017*, pp. 696-701.
- Capra, A., Dubbini, M., Bertacchini, E., Castagnetti, C., Mancini, F., 2015. 3D reconstruction of an underwater archaeological site: Comparison between low cost cameras. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(5W5), pp. 67-72.
- Drap, P., Merad, D., Seinturier, J., Mahiddine, A., Peloso, D., Boi, J. M., Garrabou, J., 2013 (October). Underwater programmetry for archaeology and marine biology: 40 years of experience in Marseille, France. In *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, Vol. 1, pp. 97-104.
- Edmunds, P. J., 2017. Unusually high coral recruitment during the 2016 El Nino in Moorea French Polynesia. *PLoS One*, 12(10): e0185167.
- Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F., Abellán, A., 2016. Image-based surface reconstruction in geomorphometry – Merits, limits and developments. *Earth Surf Dynam*, 4(2): 359–389. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-359-2016>
- Figueira, W., Ferrari, R., Weatherby, E., Porter, A., Hawes, S., Byrne, M., 2015. Accuracy and precision of habitat structural complexity metrics derived from underwater photogrammetry. *Remote Sens*, 7(12): 16883-16900.
- Guo, T., Capra, A., Troyer, M., Gruen, A., Brooks, A. J., Hench, J. L., Schmitt, R. L., Holbrook, S. J., Dubbini, M., 2016. Accuracy assessment of underwater photogrammetric three dimensional modelling for coral reefs. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41
- Harwin, S., Lucieer, A., Osborn, J., 2015. The impact of the calibration method on the accuracy of point clouds derived using unmanned aerial vehicle multi-view stereopsis. *Remote Sens*, 7(9): 11933–11953. <https://doi.org/10.3390/rs70911933>
- Holbrook, S. J., Adam, T. C., Edmunds, P. J., Schmitt, R. J., Carpenter, R. C., Brooks, A.J., Lenihan, H. S., Briggs, C. J., 2018. Recruitment drives spatial variation in rovery rates of resilient coral reefs. *Sci Rep*, 8: 7338.
- Holbrook, S. J., Schmitt, R. J., Adam, T. C., Brooks, A. J., 2016. Coral reef resilience, tipping points and the strength of herbivory. *Sci Rep*, 6: 35817.
- James M R, Robson S (2012) Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *J Geophys Res Earth Surf* 117(F3).
- James, M. R., Robson, S., Smith, M. W., 2017. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surf Proc Land*, 42(12), pp. 1769-1788.
- Johnson-Roberson, M., Pizarro, O., Williams, S. B., Mahon, I., 2010. Generation an visualization of large-scale three-dimensional reconstructions from underwater robotic surveys. *J Field Robot*, 27(1):21–51. <https://doi.org/10.1002/rob.20324>.
- Kayal, M., Lenihan, H. S., Brooks, A. J., Holbrook, S. J., Schmitt, R. J., Kendall, B. E., 2018. Predicting coral community dynamics using multi-species population dynamics models. *Ecol Lett*, 21(12), pp. 1790-1799.
- Kocak, D. M., Caimi, F. M., 2005. The current art of underwater imaging with a glimpse of the past and vision of the future. *Mar Technol Soc J*, 39(3): 5–26. <https://doi.org/10.4031/002533205787442576>
- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J., 2013. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 82, pp. 10-26.
- 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 Sens*, 5(12): 6880–6898. <https://doi.org/10.3390/rs5126880>
- Menna, F., Nocerino, E., Fassi, F., Remondino, F., 2016. Geometric and optic characterization of a hemispherical dome port for underwater photogrammetry. *Sensors*, 16(1): 48.
- Mora C (2008) A clear human footprint in the coral reefs of the Caribbean. *Proc. R. Soc. B-Biol. Sci* 275: 767–773
- Nex, F., Remondino, F., 2014. UAV for 3D mapping applications: a review. *Appl Geomat*, 6(1), pp. 1-15.
- Neyer, F., Nocerino, E., Gruen, A., 2018. Monitoring coral growth- the dicotomy between underwater photogrammetry and geodetic control network. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(2)
- Ogundare, J. O., 2015. *Precision surveying: the principles and geomatics practice*. John Wiley & Sons, pp. 267-328.
- Pennisi E (2002) Survey confirms coral reefs are in peril. *Science* 297, pp. 1622b–1623b.
- Rossi, P., Mancini, F., Dubbini, M., Mazzone, F., Capra, A., 2017. Combining nadir and oblique UAV imagery to reconstruct quarry topography: Methodology and feasibility analysis. *Eur J Remote Sens*, 50(1), pp. 211-221.
- Royer, J. P., Nawaf, M. M., Merad, D., Saccone, M., Bianchimani, O., Garrabou, J., Drap, P., 2018. Photogrammetric Surveys and Geometric Processes to Analyse and Monitor Red Coral Colonies. *J Mar Sci Eng*, 6(2), pp. 42.
- Rupnik, E., Nex, F., Remondino, F., 2014. Oblique multi-camera systems—orientation and dense matching issues. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(3): 107. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W1-107-2014>
- Skarlatos, D., Agrafiotis, P., Menna, F., Nocerino, E., Remondino, F., 2017. Ground control networks for underwater photogrammetry in archaeological excavations. *Proceedings of the 3rd IMEKO International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, MetroArcheo 2017* October 23-25, 2017, Lecce, Italy
- Snavely N., Seitz S. M., Szeliski R., 2006. Photo tourism: exploring photo collections. *3D. ACM T Graphic*, 25(3), pp. 835-846.
- Toschi, I., Rivola, R., Bertacchini, E., Castagnetti, C., Dubbini, M., Capra, A., 2013. Validation tests of open-source procedures for digital camera calibration and 3D image-based modelling. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5/W2: 647-652. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-647-2013>.
- Trapon, M. L., Pratchett, M. S., Adjeroud, M., Hoey, A. S., Baird, A. H., 2013. Post-settlement growth and mortality rates of juvenile scleractinian corals in Moorea, French Polynesia versus Trunk Reef. *Australia. Mar Ecol Prog Ser*, 488, pp. 157-170.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare Russell Schmitt e Sally Holbrook, professori dell'UC Santa Barbara, in qualità di co-principali investigatori di Moorea IDEA, il prof. Armin Gruen e Matthias Troyer, ETH Zurich, per l'invito a collaborare alla

ricerca. Un ringraziamento speciale al prof. Armin Gruen, dr. Erica Nocerino e dr. Fabian Neyer, ETH di Zurigo, per la discussione scientifica e la condivisione di opinioni sull'elaborazione dei dati.