

UAV per la generazione di DSM multi-temporali per il monitoraggio delle dinamiche di ricostituzione post-incendio di aree boschive

Irene Aicardi (*), Filiberto Chiabrando (*), Andrea Lingua (*), Emanuele Lingua (**),
Raffaella Marzano (***), Paolo Maschio (*), Marco Piras (*)

(*) DIATI – Dipartimento di Ingegneria dell’Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture - Politecnico di Torino,
Corso Duca degli Abruzzi, 24, Torino (TO), email: nome.cognome@polito.it

(**) TESAF – Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali – Università degli studi di Padova,
viale dell’Università, 16, Legnaro (PD), email: emanuele.lingua@unipd.it

(***) DISAFA – Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari – Università degli studi di Torino,
Largo Paolo Braccini, 2, Grugliasco (TO), email: raffaella.marzano@unito.it

Riassunto

Gli incendi boschivi sono uno dei principali disturbi naturali che influenzano le dinamiche degli ecosistemi forestali. Gli effetti degli incendi boschivi possono variare a seconda dell’intensità dell’evento, fino a raggiungere severità tali da determinare la morte dell’intero soprassuolo forestale. L’alterazione del regime degli incendi boschivi prevista a livello globale in relazione ai cambiamenti climatici e di uso del suolo, comporta una sempre maggiore attenzione agli aspetti di prevenzione e ricostituzione delle aree interessate. Nell’ambito, in particolare, della ricostituzione post-incendio, appare fondamentale, oltre all’approfondimento delle conoscenze sui processi ecologici in risposta al disturbo, definire tecniche e protocolli di monitoraggio di lungo periodo.

In questo contesto, l’utilizzo di *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) può essere uno strumento utile allo svolgimento di indagini a media scala in aree interessate da incendi boschivi. Infatti questi strumenti, che offrono la possibilità di installare a bordo sensori di natura diversa, quali camere multispettrali o sensori termici, consentono di effettuare rilievi speditivi e ripetibili nel tempo, fondamentali per analisi multi-temporali delle aree di interesse.

In questo articolo vengono presentati i risultati preliminari relativi ad un’indagine condotta all’interno di un’area interessata nel 2005 da un incendio di chioma (Verrayes, AO) nell’ambito di un progetto di monitoraggio di lungo periodo delle dinamiche di ricostituzione post-incendio. E’ stato pertanto realizzato un rilievo speditivo con UAV con camere visibili e multispettrali al fine di generare un modello della superficie (*Digital Surface Model* – DSM) da confrontare con un precedente modello ottenuto tramite rilievo lidar.

Abstract

Wildfires are one of the major natural disturbances affecting the dynamics of forest ecosystems. Their effects can be extremely variable, with different fire severities, from very low levels to stand-replacing events.

Given the alteration of fire regimes foreseen globally due to climate and land use changes, greater attention should be devoted to prevention and restoration activities. Concerning in particular post-fire restoration actions, it is fundamental, together with a better understanding of ecological processes resulting from the disturbance, to define techniques and protocols for long-term monitoring of burned areas. In this context Unmanned Aerial Vehicles (UAV) could be useful tools, also thanks to the possibility to

house on board different kind of sensors, such as multispectral or thermal cameras, which can be used to make rapid and repeatable surveys allowing to perform multi-temporal analyses.

This article presents the preliminary results of a study conducted within an area affected by a stand-replacing crown fire (Verrayes, AO) in 2005, which is part of a long term monitoring research on post-fire restoration dynamics. Multispectral and visible images from a UAV flight allowed to generate a surface model (Digital Surface Model - DSM) that was then compared with a previous LiDAR-derived model.

Introduzione

Gli incendi boschivi sono uno dei maggiori fattori di disturbo in molti ecosistemi forestali e costituiscono nel contempo un rischio per l'uomo. E' quindi prioritario che la ricerca scientifica approfondisca la conoscenza di tali fenomeni, fornendo informazioni utili alla definizione di strategie di mitigazione, anche in relazione alle alterazioni previste nei regimi di incendio a livello globale, come conseguenza dei cambiamenti climatici e di copertura del suolo in atto (Dale et al. 2001).

I futuri scenari di cambiamento climatico prevedono diffuse alterazioni dei regimi di disturbo a livello globale. Notevoli modificazioni nel regime di incendio, in termini, ad esempio, di maggiore frequenza, intensità e/o dimensione delle aree percorse, sono già state rilevate in molte regioni. La caratterizzazione delle modalità e dei tempi di rinnovazione naturale in seguito al disturbo costituisce un elemento chiave per la definizione della gestione delle aree percorse da incendio. Il monitoraggio delle dinamiche post-incendio rappresenta un aspetto imprescindibile per comprendere i meccanismi attraverso i quali si realizza il processo di ricostituzione post-disturbo, analizzare i tempi di risposta della vegetazione ed eventualmente orientare le attività di gestione attiva. Le politiche e le pratiche adottate per la ricostituzione delle aree percorse da incendio dovrebbero essere implementate sulla base di criteri che traggano fondamento dalla conoscenza dei processi ecologici che si realizzano in risposta al disturbo all'interno di ciascun popolamento.

Alla luce dei cambiamenti indotti dal *global change*, si rende necessario sviluppare strategie e tecniche per favorire la riabilitazione dei popolamenti forestali interessati dal disturbo, al fine di mantenere le funzioni essenziali che essi svolgono.

Numerosi sono gli studi relativi alla potenziale efficacia di dati telerilevati nell'affiancare rilevazioni di campo per la quantificazione dell'impatto prodotto dal passaggio di un incendio, soprattutto nel caso di eventi di elevata superficie (French et al., 2008).

Il telerilevamento con sensori satellitari passivi è uno strumento comunemente utilizzato per la mappatura e la localizzazione di disturbi intensi di grosse dimensioni (Roy et al. 2008) e può essere anche utile nell'individuazione della severità del disturbo, che condiziona direttamente i processi di ricostituzione forestale post-incendio.

In alternativa o come integrazione al dato telerilevato da satellite, sempre più spesso si utilizzano sistemi aviotrasportati per l'acquisizione di dati a grande scala. In particolare da qualche anno si stanno sviluppando sistemi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) strumentati per l'acquisizione di dati spaziali (Bendea et al. 2008).

La tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*) recentemente è stata molto utilizzata per il valore aggiunto di ottenere informazioni complementari a quelle ottenute dai sensori spettrali, poiché permette di ottenere dati sulla struttura e la geometria degli oggetti. L'utilizzo del LiDAR per ottenere informazioni dettagliate sulla copertura forestale si sta sempre più diffondendo (Pirotti et al. 2012) e prime applicazioni sperimentali cominciano a essere sviluppate in Italia anche nel settore degli incendi boschivi (Lingua e Marzano 2012). Essa può consentire, ad esempio, interessanti applicazioni per la caratterizzazione e la mappatura della severità di un incendio, intesa come espressione della magnitudo dell'impatto prodotto dall'evento sull'ecosistema (Lingua e Marzano 2013).

Nell'ambito di una ricerca di lungo periodo si è analizzato l'impatto di differenti pratiche di gestione post-disturbo allo scopo di definire quale approccio sia più appropriato per la ricostituzione di un popolamento di pino silvestre percorso da un incendio di chioma di elevata severità (Marzano et al 2013). In particolare si sono approfondite le dinamiche di rinnovazione naturale in seguito ad

un disturbo caratterizzato da mortalità pressoché totale del soprassuolo, verificando quali parametri topografici e ambientali possano favorire l'insediamento e la sopravvivenza dei semenzali.

La risposta al disturbo della vegetazione è stata monitorata anche allo scopo di comprendere le possibili interazioni tra l'impatto del fuoco e il successivo intervento antropico di riabilitazione.

Il caso studio e la metodologia proposta

Lo studio è stato condotto nel comune di Verrayes (AO), area interessata nel marzo 2005 da un incendio di chioma che ha percorso una superficie di 257 ha. L'incendio ha provocato la morte del soprassuolo, caratterizzato in prevalenza da pino silvestre, su una superficie di 160 ha. A seguito dell'evento 4 aree di monitoraggio di lungo periodo sono state insediate e ciascuna è stata interessata da un diverso trattamento (Figura 1), ovvero tipologia di intervento post-incendio:

- A: *salvage logging* (abbattimento ed esbosco degli individui morti o deperenti) e rilascio della ramaglia accatastata (superficie 5 ha; anno di intervento 2007);
- B: abbattimento (altezza taglio = 1 m), sramatura e rilascio di tutta la necromassa (con disposizione dei fusti sul terreno a spina di pesce e a 45° rispetto alla linea di massima pendenza) (superficie 1 ha; anno di intervento 2009);
- C: abbattimento in modo casuale dei fusti, senza sramatura, con rilascio di tutta la necromassa (superficie 1 ha; anno di intervento 2009);
- D: nessun intervento (controllo) (superficie 3 ha). All'interno delle aree è stato eseguito il cavallettamento totale (dbh > 5 cm) dei fusti morti in piedi e a terra, nonché delle ceppaie, con rilievo dei relativi principali parametri dendrometrici e delle coordinate. I fusti presenti nell'area D sono stati inoltre individuati in modo permanente tramite etichette numerate allo scopo di monitorare le dinamiche di crollo e decomposizione della necromassa nel tempo.

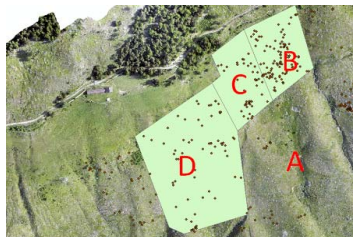


Figura 1 – Aree di intervento caratterizzate da diversi trattamenti.

L'area interessata dell'incendio è coperta da un volo LiDAR a bassa densità di punti effettuato dalla Regione Valle d'Aosta su tutto il territorio regionale nel 2008 (DTM e DSM passo 2 m). È stato successivamente effettuato (06/2011) un volo LiDAR ad alta densità di punti e con informazioni *full waveform* su circa 20 km², utilizzato per estrarre i parametri delle *green islands* (aree con presenza di alberi sopravvissuti al passaggio dell'incendio) e dei margini dell'area percorsa e per analizzare le differenze a livello microtopografico dei diversi trattamenti.

L'obiettivo di questo lavoro consiste nell'analisi delle potenzialità di utilizzo di un rilievo speditivo attraverso UAV (Eisenbeiß, 2009) per l'aggiornamento e il confronto dei DSM dell'area oggetto di studio e l'acquisizione di immagini multi-temporali al fine di analizzare nel tempo le dinamiche di ricostituzione, anche in relazione alle diverse tipologie di intervento post-incendio effettuate.

Quando si svolgono acquisizioni aeree tramite UAV occorre valutare i seguenti aspetti:

- scelta del mezzo aereo più adeguato allo specifico caso studio;
- definizione dei parametri di acquisizione in funzione del risultato atteso.

In riferimento al primo aspetto, occorre selezionare tra le due principali categorie, ala fissa e multirotore, che differiscono, essenzialmente, in termini di *payload*, durate del volo e stabilità nell'acquisizione del dato.

In questo specifico caso studio (area di intervento di circa 45 ha) si è scelto di utilizzare un sistema ad ala fissa che ha consentito di ricoprire in un unico volo un'area più vasta rispetto ad un classico sistema multi-rotore. L'UAV utilizzato è un eBee della SenseFly, mezzo che consente di realizzare riprese fotogrammetriche sia nel visibile che nel multispettrale (Figura 2) e che è già sviluppato per svolgere in autonomia sia il decollo che l'atterraggio (Tabella 1 riporta le caratteristiche principali).



Figura 2 – UAV eBee SenseFly e camere fotografiche supportate.

Caratteristiche tecniche		Caratteristiche operative	
Peso (comprensivo di camera)	0.69 Kg	Tempo massimo di volo	50 minuti
Dimensione	55 x 45 x 25 cm	Velocità di volo	50 – 90 Km/h
Apertura alare	96 cm	Operatività del radiolink	3 Km
Propulsione	Elettrica, motori DC 160 W brushless	Massima superficie rilevabile	12 Km ² a 974 m di altitudine
Batteria	11.1 V, 2150 mAh	GSD a 100 m	0.03 m

Tabella 1 – Caratteristiche principali dell'eBee ala fissa utilizzato.

Nel caso studio di Verrayes, le acquisizioni fotogrammetriche sono state svolte utilizzando due camere fotografiche differenti (Tabella 2): una Canon IXUS RGB e una S110 NIR (*Near Infrared Region*). Ciò ha consentito di realizzare i modelli e l'ortofoto nel visibile e di ottenere i dati necessari per il calcolo di alcuni indici di vegetazione, che saranno utilizzati per il monitoraggio delle dinamiche di ricostituzione.



		Modello	Risoluzione	Dimensione del pixel	Bande	Dimensione immagini
RGB camera		Canon IXUS 110	16 Mp	1.33 µm	Verde, rosso e blu	4608 x 3456
NIR camera		Canon S110	12 Mp	1.86 µm	Verde, rosso e NIR	4000 x 3000

Tabella 2 – Specifiche tecniche delle due fotocamere utilizzate.

La programmazione dei voli dell'eBee è stata svolta attraverso il software proprietario eMotion che consente di effettuare, oltre alla pianificazione, anche la simulazione del volo. L'utilizzo di tale software ha permesso inoltre di tenere in considerazione il reale andamento del terreno eseguendo le riprese secondo un modello altimetrico implementato all'interno del software stesso. In casi come quello affrontato, con forti pendenze all'interno dell'area da rilevare, la navigazione in quota consente di mantenere una risoluzione costante per l'intera area. Pertanto, al fine di ottenere una risoluzione a terra finale di 4 cm/px, i voli sono stati pianificati ed eseguiti a una quota di 130 rispetto al punto di decollo e tale altezza è stata mantenuta lungo tutto il volo.

Le riprese fotogrammetriche sono state realizzate attraverso molteplici strisciate adiacenti (16 *waypoint*) con un ricoprimento dell'80% in entrambe le direzioni (laterale e longitudinale). Inoltre il software offre la possibilità di stimare, in base alla quota di volo e al ricoprimento e risoluzione selezionati, la distanza tra due immagini successive (~27 m). Ne risulta quindi che il ricoprimento è già ottimizzato e tutte le foto acquisite saranno da utilizzare per la costruzione del modello.

L'UAV utilizzato è dotato di un sistema di navigazione interna che gli consente il volo autonomo attraverso la segnalazione dei *waypoint* e i dati di posizione vengono inoltre utilizzati per fornire dei parametri approssimati di orientamento esterno delle immagini. Ovviamente il sistema GNSS eBee ha un'accuratezza metrica e pertanto, per la successiva georeferenziazione più raffinata delle immagini, sono stati posizionati dei marker a terra.

Due vertici topografici di riferimento locali sono stati materializzati con picchetti in legno e acquisiti con ricevitori GNSS multi-frequenza e multi-costellazione in modalità statica utilizzando un campionamento di 1s per 60 minuti. Le coordinate di tali vertici sono state successivamente determinate in laboratorio attraverso il software Leica Geo Office (LGO) utilizzando le stazioni permanenti di Biella e Cuornè e adottando il sistema di riferimento WGS84-ETRF2000. Le coordinate dei due punti sono state stimate con accuratezza millimetrica ($\sigma \sim 3$ mm).

Tali vertici sono stati utilizzati come stazioni master per il rilievo RTK (*Real Time Kinematic*) dei 40 marker (Figura 3) in appoggio al rilievo fotogrammetrico. A tal fine, ogni marker è stato acquisito per 15-20 secondi e le sue coordinate sono state ricavate in post-processing con LGO.

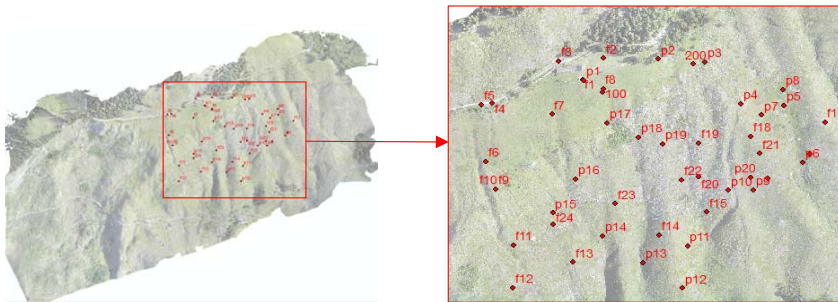


Figura 3 – Posizione dei marker utilizzati per la georeferenziazione del modello.

Generazione del modello digitale altimetrico

Le immagini acquisite sono state elaborate con un classico approccio SfM (*Structure from Motion*) (Remondino et al. 2014). Utilizzando lo stesso software eMotion è possibile generare un file di testo contenente i parametri di orientamento esterno delle foto acquisite che viene svolto in automatico utilizzando i dati acquisiti dal sistema GNSS interno dell'UAV.

L'elaborazione delle immagini è stata svolta utilizzando due software diversi: Pix4D mapper e Agisoft PhotoScan. I risultati ottenuti sono del tutto assimilabili, pertanto, per semplicità, verranno riportati solo quelli relativi a PhotoScan.

Come precedentemente specificato, tutte le immagini acquisite (295) sono state utilizzate per la generazione del modello, perché già ottimizzate per il ricoprimento e la risoluzione scelta.

L'elaborazione (Tabella 3) ha riguardato i seguenti step:

- allineamento delle foto attraverso la ricerca di punti omologhi sulle immagini: ciò consente di generare una prima nuvola di punti sparsa;
- generazione della nuvola densa a partire dal precedente allineamento delle immagini;
- costruzione del modello attraverso la triangolazione della nuvola di punti;
- assegnazione del dato RGB al fine di ottenere un modello 3D texturizzato.

Modello 3D		Computer utilizzato	
Punti nuvola sparsa	~ 765000	Sistema operativo	Windows 7 Professional
Punti nuvola densa	~ 26000000	RAM	8 GB
Vertici della mesh	~ 2600000	Processore	Intel Core i7 2.90 GHz
Triangoli della mesh	~ 5200000	Tempo di elaborazione	5 - 6 h

Tabella 3 – Caratteristiche dell'elaborazione fotogrammetrica con PhotoScan.

Per la georeferenziazione più raffinata del modello (~ 7 cm di precisione) sono stati inseriti come *Ground Control Point* (GCP) i marker rilevati con tecnica GNSS che sono stati posizionati all'interno del modello. Grazie alle elaborazioni svolte è stato possibile estrarre il DSM e l'ortofoto dell'area (Figura 4) che sono stati utilizzati per le successive analisi in comparazione ai dati LiDAR.

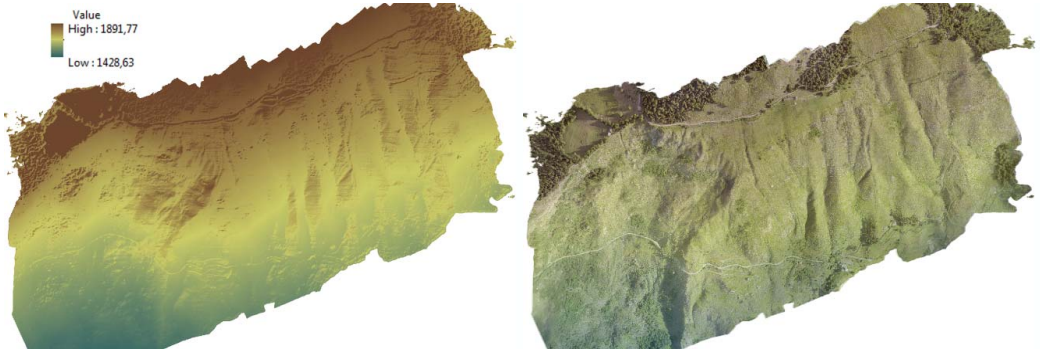


Figura 4 – DSM e ortofoto generati dalle acquisizioni RGB dell'area di interesse.

Per valutare gli effetti degli incendi boschivi e lo stato di salute e il vigore vegetativo delle piante, un'indagine esclusivamente nello spettro del visibile non è spesso sufficiente. Nella maggioranza delle applicazioni finalizzate all'analisi della vegetazione, oltre al dato RGB, viene preso in considerazione anche l'infrarosso vicino (NIR) che occupa lunghezze d'onda maggiori del visibile (~700 – 1300 μm). La vegetazione è dotata di una firma spettrale (caratteristica specifica del materiale derivante dalla combinazione delle radiazioni elettromagnetiche riflesse e assorbite a diverse lunghezze d'onda) che per una foglia verde in condizioni normali ha una riflettanza ripartita nel seguente modo: 20% nel verde, 10% nel blu e nel rosso, 70% nell'infrarosso vicino (Gonthier et al., 2012). Disporre del dato NIR può fornire informazioni utili, in particolare sulla risposta della vegetazione ad un disturbo. Le acquisizioni effettuate nell'infrarosso sono state elaborate secondo la stessa procedura seguita per i dati nel visibile. Ciò ha consentito di ottenere un DSM e un'ortofoto che, grazie al software ENVI, è stata convertita in falso colore (non rispettando quindi la corrispondenza tra banda elettromagnetica e canale assegnato) sommando i tre canali R,G,NIR (Figura 5).

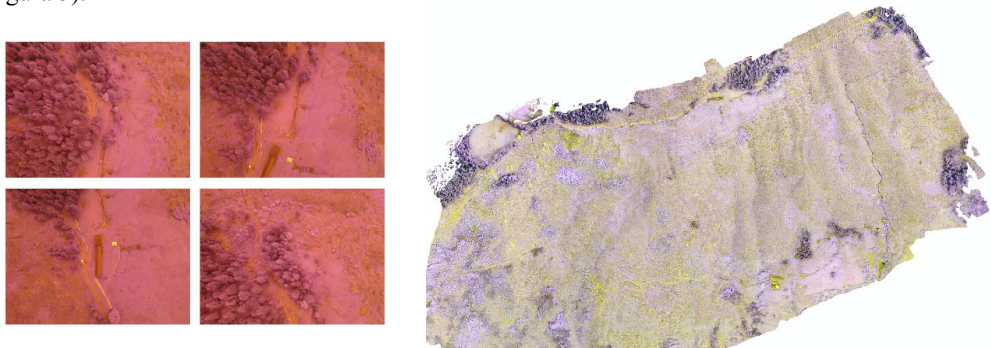


Figura 5 – Immagini NIR acquisite e la relativa ortofoto generata in falso colore.

Combinando le informazioni nell'infrarosso vicino e del visibile, si potrà ad esempio calcolare l'NDVI che, sfruttando la diversa risposta spettrale della copertura vegetale nelle bande del visibile (rosso) e dell'infrarosso vicino, rappresenta la stima dello stato della biomassa fotosinteticamente attiva (Capece et al., 2005). Bassi valori di NDVI si verificano in aree a limitata o assente copertura

vegetale, o dove la vegetazione è senescente o sofferente, mentre alti valori dell'indice rispecchiano una situazione di forte attività fotosintetica e quindi elevata presenza di biomassa.

Analisi preliminari

Come prima analisi, è stata svolta una verifica sul modello generato a partire dalle immagini NIR (Figura 6), il cui DSM è stato comparato con quello ottenuto dai dati nel visibile. Quello che si evince è che, nell'area centrale in cui erano presenti i marker per la georeferenziazione, i modelli altimetrici sono comparabili, mentre si evidenziano scostamenti via via crescenti se ci si allontana da tale zona.

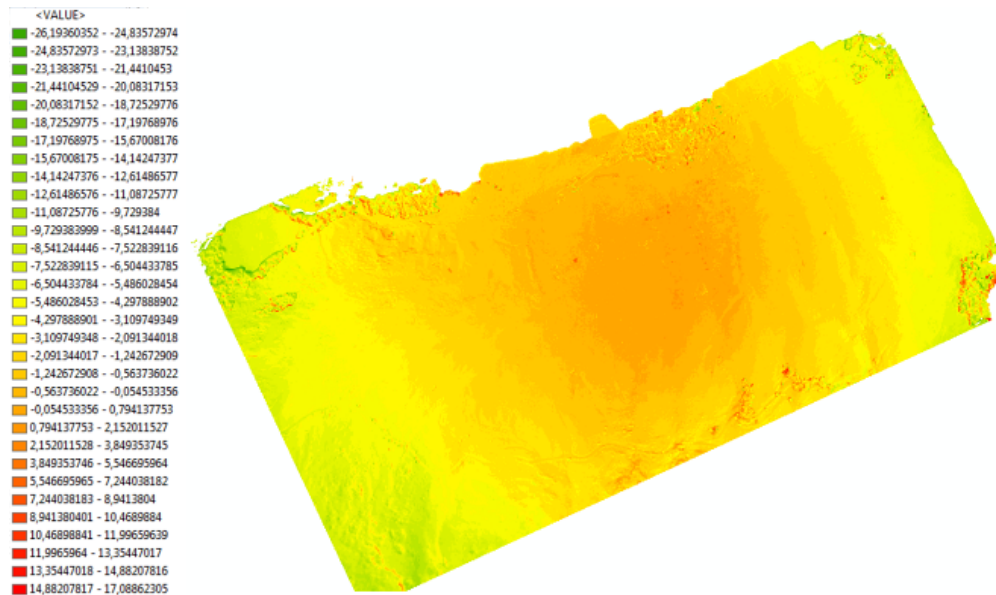


Figura 6 – Confronto tra il DSM generato con immagini da UAV utilizzando la camera RGB e quella NIR.

Per valutare il processo di ricostituzione all'interno dell'area si è utilizzato il rilievo LiDAR del 2011. Entrambi i modelli, georeferenziati nello stesso sistema di riferimento, sono stati inclusi in un progetto GIS e confrontati. L'analisi è avvenuta attraverso lo strumento *Raster Calculator* incluso nello *Spatial Analysis Tool* che ha consentito di effettuare una differenza tra i valori del modello altimetrico del 2015 e quelli del 2011.

I risultati ottenuti con questa analisi preliminare (Figura 7) hanno consentito di evidenziare le principali dinamiche in atto all'interno dell'area percorsa dall'incendio, ovvero in particolare il processo di ricostituzione dominato dal pioppo tremolo e gli schianti e il processo di decomposizione della necromassa. Le aree caratterizzate da colorazione tendente al giallo (incremento altimetrico del DSM) sono costituite da nuclei di pioppo tremolo in espansione (ricaccio vegetativo per polloni radicali). Le aree caratterizzate da colorazione verde scuro (decremento altimetrico del DSM) identificano principalmente zone interessate da interventi di taglio o crolli delle piante morte in piedi.

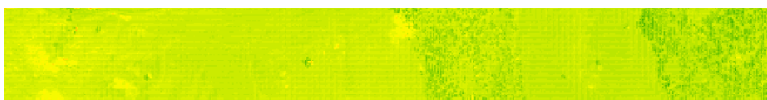


Figura 7 – Particolare del confronto tra il DSM Lidar del 2011 e il DSM fotogrammetrico da UAV 2015.

Conclusioni

Lo studio effettuato ha consentito di valutare l'applicabilità delle acquisizioni tramite UAV per applicazioni di tipo forestale per il monitoraggio delle dinamiche di ricostituzione post-incendio. I dati ottenuti e le analisi preliminari effettuate hanno rivelato che, data la rapidità di acquisizione del dato e la correttezza nella generazione dei modelli, tali mezzi sono adeguati all'aggiornamento mirato dei dati altimetrici per indagini di lungo periodo.

Inoltre, la possibilità che offrono di poter alloggiare diversi tipi di sensori consente di ampliare, a bassi costi e con limitato impiego di tempo, lo spettro delle analisi effettuabili. Un monitoraggio continuo ed effettuato ad hoc consentirebbe inoltre di poter valutare nel tempo con continuità i tempi e le modalità di risposta della vegetazione.

Tuttavia ad oggi le operazioni maggiormente dispendiose in termini di tempo sono relative all'appoggio a terra per la georeferenziazione del modello 3D fotogrammetrico. In casi studio come quello proposto, in cui vi è un monitoraggio dell'area, è possibile predisporre marker fissi da lasciare in loco o, in alternativa, occorrerà sviluppare tecniche di fotogrammetria diretta che migliorino la soluzione approssimata già fornita dal sistema GNSS integrato in molti UAV.

Bibliografia

Bendea H, Boccardo P, Dequal S, Giulio Tonolo F, Marenchino D, Piras M. (2008), "Low cost UAV for post-disaster assessment". In: The XXI congress ISPRS 2008, Beijing, China, 3-11 luglio 2008, vol. XXXVII, p. 1373-1380

Capece P, Cavalli G, Mannu G, Pinna Nossai R, Bianco G. (2005), "Analisi del rischio di incendi boschivi attraverso mappe NDVI da satellite: risultati delle prime sperimentazioni in Sardegna in collaborazione con il Corpo Forestale". Atti convegno AIAM 2005, 5 maggio 2005, n. 1. pp. 92-93

Dale VH, Joyce LA, McNulty S, Neilson RP, Ayres MP, Flannigan MD, Hanson PJ, Irland LC, Lugo AE, Peterson CJ, Simberloff D, Swanson FJ, Stocks BJ, Wotton BM. (2001), "Climate change and forest disturbances". *Bioscience* 51: 723-734

Eisenbeiß H. (2009), "UAV Photogrammetry". Doctor of Sciences degree, University of Technology, Dresden

French N, Kasischke E, Hall R, Murphy K, Verbyla D, Hoy E, Allen J (2008), "Using Landsat data to assess fire and burn severity in the North American boreal forest region: an overview and summary of results". *International Journal of Wildland Fire* 17: 443-462

Gonthier P, Lione G, Borgogno Mondino C. (2012), "Valutazione dello stato sanitario delle piante forestali: quali prospettive dal telerilevamento nel visibile e nell'infrarosso?" *Forest* 9: 89-102

Grenzdörffer G.J, Engel A, Teichert B (2008), "The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture". *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing 2008

Lingua E, Marzano R. (2013), "LiDAR e incendi boschivi. Applicazioni, potenzialità e prospettive". In "Tecnologia LiDAR per il settore forestale. Nozioni di base e principali applicazioni" Compagnia delle Foreste S.r.l., p.49-51, ISBN 978-88-905577-5-0

Marzano R, Lingua E, Garbarino M. (2012). "Post-fire effects and short-term regeneration dynamics following high-severity crown fires in a Mediterranean forest". *IFOREST*, vol. 5, p. 93-100, ISSN: 1971-7458, doi: 10.3832/ifor0612-005

Marzano R, Garbarino M, Marcolin E, Pividori M, Lingua E. (2013), "Deadwood anisotropic facilitation on seedling establishment after a stand-replacing wildfire in Aosta Valley (NW Italy)". *Ecological Engineering* 51: 117-122

Pirotti F, Grigolato S, Lingua E, Sitzia T, Tarolli P. (2012), "Laser Scanner Applications in Forest and Environmental Sciences". *Italian Journal of Remote Sensing* 44: 109-123

Remondino, F, Spera, M.G, Nocerino, E, Menna, F, Nex, F. (2014), "State of the art in high density image matching. The Photogrammetric Record", XXIX-146, DOI:10.1111/phor.12063.

Roy DP, Boschetti L, Trigg SN (2006), "Remote sensing of fire severity: Assessing the performance of the normalized burn ratio", *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 3, 112-116.