

Influenza della severità del fuoco sulle dinamiche di ricostituzione post-incendio: analisi multitemporale di immagini multispettrali

Enrico Marcolin (*), Emanuele Lingua (*), Francesco Pirotti (*), Raffaella Marzano (**)

(* Università degli Studi di Padova, dip. TeSAF, Viale dell'Università 16, 35020 Legnaro (PD)
enrico.marcolin@unipd.it; emanuele.lingua@unipd.it; francesco.pirotti@unipd.it

(**) Università di Torino, dip. AGROSELVITER, Via L. Da Vinci 44, 10095 Grugliasco (TO)
raffaella.marzano@unito.it

Riassunto

Le modalità ed i tempi necessari per la ricostituzione dei popolamenti forestali in seguito al passaggio di un incendio dipendono principalmente dal tipo di incendio, dal comportamento del fuoco e dagli effetti che il fronte di fiamma ha causato sulla vegetazione, oltre che dalle condizioni stazionali.

La magnitudo dell'impatto prodotto dal fuoco sull'ecosistema viene definita con il termine di severità dell'incendio. La severità è una funzione dei cambiamenti fisici ed ecologici prodotti dal disturbo e può presentare un'elevata eterogeneità all'interno dell'area percorsa.

In funzione della stretta correlazione esistente tra severità e processi di ricostituzione post-incendio, la caratterizzazione della severità costituisce un elemento chiave per la definizione della necessità e delle modalità di intervento nelle aree percorse da incendio.

In fase progettuale, il supporto di un'accurata cartografia delle classi di severità dell'incendio rende più agevole la definizione di opportune attività di ricostituzione post-incendio.

L'incendio di Barcis (30/03-20/04/1997), con una superficie percorsa di 2294 ha, è annoverato tra gli incendi di maggiori dimensioni avvenuti sulle Alpi italiane. Il fuoco ha manifestato un comportamento estremamente eterogeneo, anche in relazione alla morfologia dell'area ed alle condizioni meteorologiche, determinando un complesso pattern di severità. A partire dal marzo 2000, sono stati effettuati interventi di ricostituzione attiva (localizzati in corrispondenza di zone ad elevata severità) asportando i fusti delle piante morte e realizzando piccoli impianti artificiali con specie autoctone.

Il lavoro si propone di caratterizzare la severità dell'incendio e le dinamiche di ricostituzione utilizzando una serie temporale di immagini satellitari Landsat (5 TM, 7 ETM+) di 20 anni. A tale scopo, sono stati utilizzati indicatori di severità ottenuti dai dati telerilevati (e.g. Normalized Burn Ratio - NBR) per descrivere, a scala di paesaggio, il pattern degli effetti del fuoco. E' stata quindi valutata la risposta della vegetazione (e.g. Normalized Difference Vegetation Index NDVI) all'evento perturbativo in aree soggette a differenti livelli di severità, nonché in relazione ad attività di ricostituzione attiva.

Abstract

The procedures and time required for the recovery of forest stands following the passage of a fire depend mainly on the kind of fire, its behavior and the effects of the flame front on vegetation, as well as by site conditions.

The magnitude of the impact produced by the fire on the ecosystem is defined by the term "fire severity". It is a function of physical and ecological changes produced by the disturbance and may involve a high heterogeneity within the damaged area.

The close correlation between severity and post-fire recovery processes makes severity a key element to determine means and methods of intervention in the burned areas.

In the planning phase, the support of an accurate mapping of fire severity classes makes easier the definition of appropriate post-fire recovery activities.

The Barcis wildfire (30/03-20/04/1997) was one of the largest fire events which occurred in the Italian Alps; it burned a surface of 2294 ha. The fire behavior was extremely heterogeneous, even in relation to the morphology of the area and weather conditions, resulting in a complex pattern of severity. In March 2000, active restoration activities were carried out within areas that burned with high severity removing the stems of dead plants and planting native species.

This study aims at characterizing fire severity and restoration dynamics using a time series of Landsat satellite images (5 TM, 7 ETM+) of 20 years. For this purpose, indices obtained from the remote-sensed data (e.g. Normalized Burn Ratio) were used to describe, at a landscape scale, the pattern of fire effects. A further stage was to assess vegetation response (e.g. using Normalized Difference Vegetation Index) to the disturbance event in areas with different levels of severity, and evaluate the effect of active restoration activities.

Introduzione

Incendi che percorrono grandi superfici sul territorio alpino, ancorchè piuttosto rari, si sviluppano in maniera spesso eterogenea seguendo gradienti che dipendono da numerosi fattori tra loro concomitanti. Aree con intensità di danno differenti si alternano, rendendo complessa la definizione della severità, intesa come il grado di cambiamento ecologico risultante dall'azione del fuoco sull'ecosistema (Morgan *et al.*, 2001; Lentile *et al.*, 2006; Hudak *et al.*, 2007), nonché la progettazione di interventi per l'eventuale messa in sicurezza dei versanti e per favorire le dinamiche di ricostituzione della vegetazione (Cocke *et al.*, 2005).

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 incendi di elevata superficie (ad esempio Kasischke *et al.*, 2007; French *et al.*, 2008).

Obiettivo principale del presente lavoro è la caratterizzazione della severità all'interno di un'area percorsa da un incendio di grandi dimensioni e comportamento eterogeneo del fronte di fiamma, utilizzando indicatori dello stato della vegetazione (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI; *Normalized Burn Ratio* - NBR), ottenuti da rapporti tra bande di immagini digitali telerilevate. Tali indici sono ampiamente utilizzati per lo studio delle dinamiche della copertura vegetale, delle trasformazioni della copertura del suolo (Salvador *et al.*, 2000; Isaev *et al.*, 2002; Chafer *et al.*, 2004) e delle aree percorse da incendio (López-García, Caselles, 1991; Key, Benson, 2005; Miller, Thode, 2007). Inoltre, attraverso una serie temporale di immagini multispettrali, sono state valutate le dinamiche di ricostituzione della vegetazione negli anni successivi al disturbo, valutando la risposta della vegetazione all'evento perturbativo in aree soggette a differenti livelli di severità, nonché in relazione ad attività di ricostituzione attiva.

Area di studio

L'area oggetto dell'indagine si colloca nelle prealpi italiane di nord-est, al limite meridionale del parco delle Dolomiti friulane, sul versante soprastante l'abitato di Barcis (PN) (20°58'41.586"E 46°2'35.983"N) in val Cellina. L'incendio è iniziato il 30/03/1997, ha percorso il versante esposto a Sud della val Cellina da Est a Ovest, e ha interessato una superficie di circa 2294 ha, prevalentemente boscati, ad una quota compresa fra 450 e 1550 m s.l.m. (fonte: Ispettorato ripartimentale delle foreste di Pordenone – Regione Friuli Venezia Giulia). Il fuoco ha manifestato un comportamento estremamente eterogeneo, anche in relazione alla complessa morfologia dell'area ed alle condizioni meteorologiche, caratterizzate dal perdurare di un forte vento per diversi giorni, determinando un complesso pattern di severità. L'intervento di estinzione dei numerosi fronti di fiamma e le operazioni di bonifica sono terminate il 20/04/1997.

Materiali e metodi

Per l'analisi multitemporale sono state utilizzate una serie di immagini multispettrali telerilevate dal satellite Landsat 4 e 5 sensore Thematic Mapper (TM) e dal Landsat 7 sensore Enhanced Thematic Mapper (ETM+). Le immagini sono state ottenute mediante una ricerca nel database di U.S. Geological Survey (USGS) tramite la piattaforma web *Earthexplorer*. E' stato possibile recuperare le prese di immagini degli anni 1991, 1993, 1994, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2006, 2007, 2009, 2010 (vedi tabella 1). Tutte le immagini utilizzate sono di livello "1T", ovvero sono state radiometricamente e geometricamente corrette mediante utilizzo di punti di controllo a terra (*Ground Control Points – GCP*), modelli digitali del terreno per migliorare la rispettiva accuratezza e per correggere gli errori di parallasse. Dal database sopracitato, sono state scelte immagini acquisite in piena stagione vegetativa e con copertura nuvolosa praticamente nulla nell'area di interesse ed immediati dintorni. Per poter confrontare correttamente le immagini è stato necessario apportare preventivamente una normalizzazione radiometrica basata sull'uso di strutture pseudo invarianti (*Pseudo Invariant Features – PIF*) (Hall *et al.*, 1991; Hill, Sturm, 1991; Altobelli *et al.*, 2005).

Data acquisizione	Landsat Tipo	Path/Row
23-lug-91	4-TM	191/028
05-ago-93	5-TM	191/028
23-lug-94	5-TM	191/028
15-set-99	7-ETM+	191/028
23-ago-00	7-ETM+	192/028
26-ago-01	7-ETM+	192/028
28-lug-02	7-ETM+	192/028
17-ago-03	5-TM	191/028
01-set-06	5-TM	192/028
18-lug-07	5-TM	192/028
17-ago-09	5-TM	191/028
03-lug-10	5-TM	191/028

Figura 1 – Riferimenti cronologici e tipi di immagini spettrali utilizzate.

Ad ulteriore supporto dell'analisi sono state utilizzate delle ortofoto digitali (2007) con una risoluzione media di 50 cm per lato pixel a nadir, una cartografia digitale dell'uso del suolo e dei tipi forestali della Regione Friuli-Venezia Giulia.

La prima fase dello studio è costituita dall'analisi delle immagini multispettrali più prossime cronologicamente all'evento (occorso nella primavera 1997) fra quelle disponibili. Gli anni *pre-fire* e *post-fire* più vicini sono rispettivamente il 1994 ed il 1999: da entrambi sono stati calcolati gli indici NDVI (1) e NBR (2). In seguito si è ricavato un ΔNBR (3) per verificare variazioni dell'indice prima e dopo l'evento (Key, Benson, 2003). Parimenti si è proceduto al calcolo di $\Delta NDVI$ (4) al fine di determinare il corrispondente decremento dell'indice, nelle aree identificate e classificate a diversa severità.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad [1]$$

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad [2]$$

$$\Delta NBR = NBR_{pre} - NBR_{post} \quad [3]$$

$$\Delta NDVI = NDVI_{pre} - NDVI_{post} \quad [4]$$

dove: NIR = banda infrarosso vicino (*Near Infrared*), RED = banda del rosso, SWIR = banda dell'infrarosso vicino/onda corta (*Short Wave InfraRed*). Le tre bande si riferiscono rispettivamente alle bande 4, 3 e 7 dei sensori TM ed ETM+ .

Le classi di severità sono state definite mediante suddivisione dell'istogramma delle frequenze dei valori risultanti dal calcolo dell'indice Δ NBR suddiviso in classi di ampiezza pari alla deviazione standard. Ne risulta una classificazione di severità dell'evento secondo le seguenti categorie:

0 - Nulla 1 - Bassa 2- Moderata 3-Alta

In una porzione marginale della carta delle severità, vi è l'effetto della copertura nuvolosa residua: agli effetti dello studio, tali zone sono state ignorate, così come i valori *Nodata* e spuri - estremi positivi e negativi (ovvero sono state tagliate le code dell'istogramma).

Incrociando la carta della severità dell'incendio così ottenuta con i dati relativi all'uso e alla copertura del suolo, sono state individuate le categorie forestali maggiormente interessate dall'evento.

La fase successiva ha previsto l'analisi delle dinamiche di ricostituzione attraverso il calcolo di NDVI e l'analisi della sua variabilità seguendo una crono-sequenza di immagini multispettrali successive all'incendio (1999-2010). A tale scopo, dalle cartografie elaborate nelle fasi precedenti, si sono preliminarmente definite delle aree caratteristiche per omogeneità del danno, dell'uso del suolo e del tipo forestale . Tali aree sono state scelte secondo i seguenti criteri (i numeri fanno riferimento alla tabella in figura 2):

- (1) e (2) aree ad alta severità ricadenti nella medesima categoria (tipo forestale pineta di pino nero e silvestre) in cui sono stati effettuati interventi di ricostituzione attiva
- (3) e (4) aree a bassa severità in aree già percorse da incendi in precedenza
- (5) e (6) aree controllo situate al di fuori del zona interessata dal fuoco ricadenti nella medesima categoria (tipo forestale pineta di pino nero e silvestre).
- (7) e (8) aree ad alta severità ricadenti nella medesima categoria (tipo forestale pineta di pino nero e silvestre) in cui nessun intervento è stato effettuato; fungono da controllo rispetto alle zone (1) e (2).

In queste aree sono stati calcolati i valori statistici dell'indice NDVI negli anni (media e coefficiente di variazione - CV) e successivamente posti in un diagramma temporale per confrontare il trend e la variabilità secondo coppie di aree affini.

Zona	N pixels	Superficie (ha)
1	56	5.0
2	175	15.8
3	103	9.3
4	217	19.5
5	130	11.7
6	194	17.5
7	84	7.56
8	165	14.85

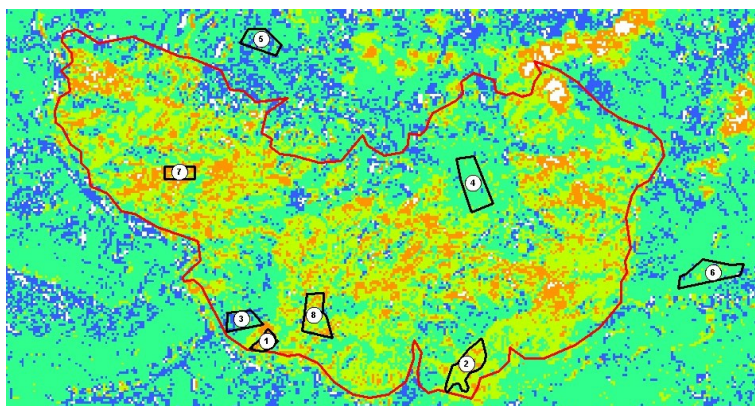


Figura 2 – In evidenza le aree prescelte per l'analisi spazio-temporale dell'indice NDVI.

Risultati

I *layers* costruiti con le elaborazioni degli indici di vegetazione sono stati confrontati con le cartografie prodotte sulla base dei rilievi a terra realizzati subito dopo l'evento dal Servizio Forestale Regionale.

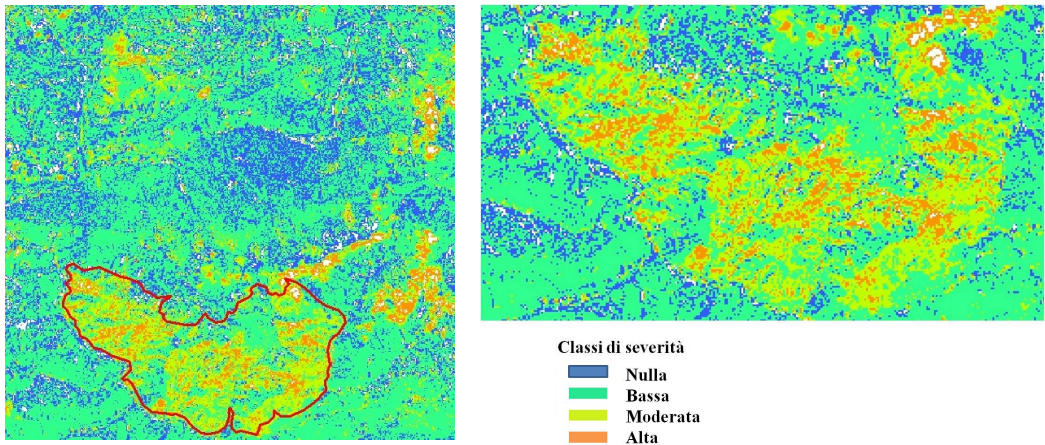


Figura 3 – Carta delle classi di severità estratte dai valori di ΔNBR ; a sinistra: sovrapposizione con il perimetro determinato da rilievi a terra (in rosso); a destra: particolare dell'area.

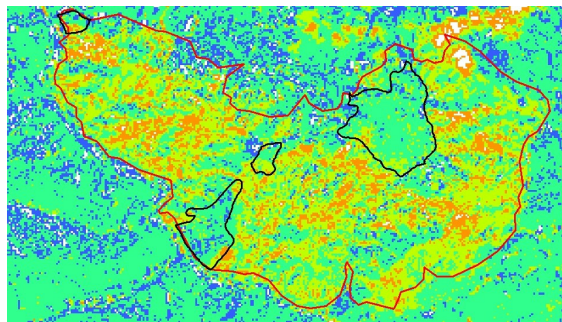


Figura 4 – Carta della severità con evidenziate in nero zone identificate come "aree già percorse da incendi".

E' stato definito il perimetro dell'area percorsa (figure 3 e 4) ed identificate le superfici interessate dall'evento per ciascuna categoria di uso del suolo.

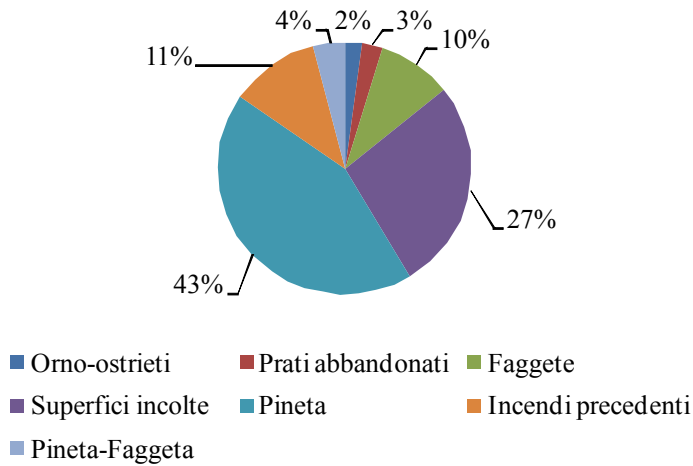


Figura 5 – Percentuale della superficie percorsa da incendio in relazione alle categorie di uso del suolo.

Circa la metà della superficie percorsa dall'incendio ha interessato pinete o pinete-faggete (figura 5), una parte rilevante riguarda aree incolte e improduttive, mentre marginale è l'estensione dell'evento in faggete (peraltro poco presenti nel versante della valle interessato dall'incendio). Quanto a severità dell'incendio, la categoria pineta (unitamente a pineta-faggeta) risulta la formazione forestale con valori medi di ΔNBR fra i più alti (media dei valori puntuali di ΔNBR nella superficie di categoria), mentre le aree cosiddette "già percorse da incendio" rientrano prevalentemente nella classe a bassa severità (figura 6).

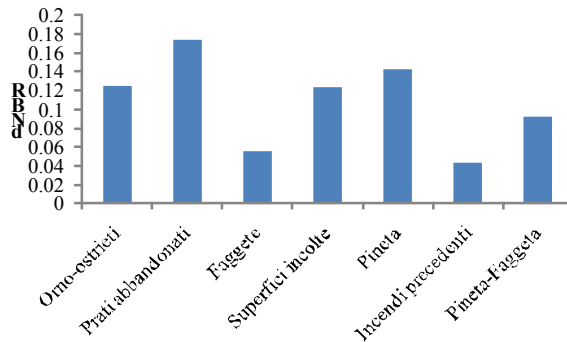


Figura 6 – Medie dell'indice derivato ΔNBR per categoria di copertura del suolo.

Dall'analisi della serie temporale dei valori di NDVI nelle aree (1), (2), (7), (8) in cui la severità dell'incendio è risultata elevata, il decremento dei valori tra prima e dopo l'evento (1997) risulta evidente ($\Delta NDVI$ compreso tra 0,23 e 0,29), ma il ritorno ai valori di NDVI antecedenti l'incendio si realizza nell'anno 2003, sei anni dopo l'evento. Al decremento di NDVI si accompagna un sensibile aumento della variabilità dell'indice negli anni subito successivi all'evento, probabilmente causata dall'eterogenea distribuzione nello spazio della residua vegetazione e di quella re-insediata.

Per quanto riguarda il confronto fra le zone in cui si sono effettuati interventi di ricostituzione attiva (1), (2) e quelle in cui non si è effettuato alcun intervento (7), (8) non si sono evidenziate particolari differenze successivamente a tali interventi (effettuati nell'anno 2000) nel "trend di recupero" del valore di NDVI, né riguardo alla sua variabilità.

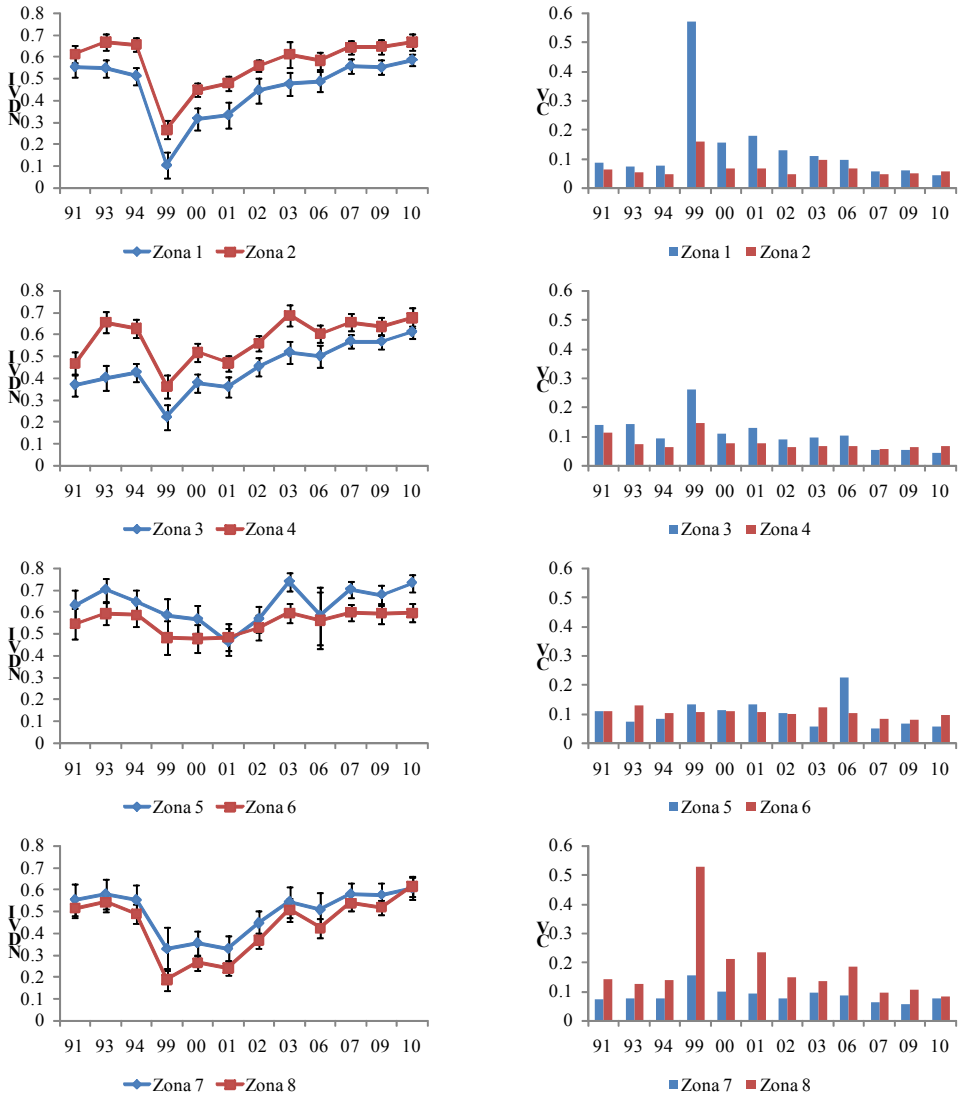


Figura 7 – Colonna a sinistra: evoluzione della media dell'indice NDVI per ciascuna Zona (come indicato in figura 2); colonna a destra: Coefficiente di Variazione del valore di NDVI nella rispettiva zona. Si noti come nelle fasi successive all'incendio(dopo il '97), le zone interessate presentino un forte decremento di NDVI e, al contempo, aumenta la variabilità in maniera evidente.

Le zone (3) e (4), selezionate in aree che prima del 1997 erano già state percorse da incendi, presentano in concomitanza dell'evento oggetto di studio un decremento di NDVI, seppur di ampiezza poco apprezzabile (ΔNDVI pari a 0,15), anch'esso con un significativo aumento dei valori del Coefficiente di Variazione.

Infine, le zone (5) e (6), ricadenti al di fuori del perimetro dell'incendio, non presentano significative variazioni degli indici in corrispondenza dell'anno 1997.

Discussione

Sull'arco alpino italiano le informazioni relative alle modalità e alle tempistiche di insediamento e di sviluppo della rinnovazione naturale dopo il passaggio di incendi sono ancora incomplete e frammentarie, anche perché le foreste interessate da tali incendi vengono spesso sottoposte alle tradizionali pratiche di gestione forestali che prevedono taglio e rimozione degli alberi morti o danneggiati.

La severità dell'incendio è strettamente correlata ai cambiamenti di tipo fisico, chimico e biologico che avvengono in un ecosistema dopo il passaggio del fuoco (White *et al.*, 1996) con effetti sulla vegetazione tra i più variabili: la rinnovazione può insediarsi seguendo strategie diverse (per seme, agamica) ciò implica anche tempi di ricostituzione differenti (più rapida la risposta della rinnovazione di specie con capacità pollonifera, mentre la rinnovazione gamica necessita per l'insediamento di condizioni stagionali che non sempre sono favorevoli nelle fasi successive all'incendio). Definire classi di severità, perciò, consente di dare indicazioni sul tipo di cambiamenti in atto e sui probabili scenari riguardo alle dinamiche di ricostituzione della vegetazione. A tal uopo, soprattutto in incendi su larga scala, tecniche di indagine con utilizzo di dati tele rilevati hanno dimostrato in studi precedenti di essere adeguate per il monitoraggio dei tempi di insediamento e della disposizione della rinnovazione nello spazio (Delgado, Pons, 2001), oltre che per determinare la severità dell'incendio (Caetano *et al.*, 1996; White *et al.*, 1996).

Accertata l'interazione fra severità dell'incendio e processi di ricostituzione, basandosi sulle indicazioni fornite dalla carta delle severità, sarà possibile definire le più opportune scelte gestionali.

Nella prima fase di questo studio si è verificata l'efficienza dell'indice NBR e del derivato ΔNBR nell'identificare l'area interessata dall'incendio, con la precisione consentita dalla risoluzione spaziale del dato Landsat: il perimetro della superficie percorsa risulta del tutto corrispondente a quanto determinato dai rilievi a terra effettuati nelle fasi immediatamente successive all'incendio. Inoltre, si sono definite delle classi di severità dell'evento sulla base dell'indice medesimo (NBR), ricavandone una cartografia che descrive nello spazio gli effetti quali-quantitativi dell'incendio: in media le categorie forestali coinvolte risultano aver subito danni moderati (pineta, pineta-faggeta, orno-ostrieti) seppur con punte di elevata severità localizzate nello spazio in pochi ed isolati tratti.

La severità dell'incendio determina il danno, influenza la mortalità della vegetazione interessata, i tempi di re-insediamento della rinnovazione (Diaz-Delgado *et al.*, 2003); inoltre, quando eventi perturbatori agiscono su vaste superfici si rendono necessarie valutazioni che riguardano la stabilità idro-geologica dei versanti (e.g. erosione del suolo). Nel caso specifico dell'area di studio, l'evento ha interessato quasi per intero delle formazioni forestali con funzione di regimazione delle acque di deflusso e protettiva nei riguardi degli abitati e delle infrastrutture viarie di fondovalle: importante determinare i tempi di re-insediamento della vegetazione come elemento informativo a supporto delle scelte gestionali. Considerando la forte correlazione fra l'indice NDVI e l'attività fotosintetica della vegetazione, l'analisi dell'evoluzione temporale di NDVI nelle zone selezionate ha evidenziato un recupero ai valori antecedenti l'incendio quantificabile in 6-7 anni, anche in aree in cui la severità è risultata elevata: tale dinamica pare essere compatibile con il riscoppio di polloni dalle ceppaie degli individui sopravvissuti appartenenti a specie con forte capacità pollonifera che, stimolati dall'incendio alla produzione di nuovi polloni, hanno, al contempo, trovato le condizioni più favorevoli venendo meno la competizione per le risorse degli individui morti in seguito al

passaggio del fuoco. Per la messa in sicurezza del versante, con lo scopo di favorire una rapida ricostituzione della vegetazione arborea, sono stati effettuati degli interventi mirati in alcune zone soprastanti i centri abitati. Nel confronto fra zone interessate dagli interventi di ricostituzione attiva e zone scelte come controllo in cui non si sono effettuati interventi, le sequenze temporali di NDVI e della sua variabilità non hanno dato informazioni sufficienti ad indicare un effetto significativo degli interventi sui tempi di recupero della vegetazione, a conferma di quanto già evidenziato da indagini precedentemente condotte in ambienti simili a quello studiato (Beghin *et al.*, 2010; Marzano *et al.*, 2010).

Riferimenti bibliografici

- Altobelli A, Bressan E, Napoletano R, (2005), “Analisi dei cambiamenti di un’area ad elevato interesse naturalistico: Bordano, il paese delle farfalle”, *The Geomatics Workbooks*, Vol. 5. [online] URL: <http://geomatica.com.polimi.it/workbooks>.
- Beghin R, Lingua E, Garbarino M, Lonati M, Bovio G, Motta R, Marzano R. (2010), “*Pinus sylvestris* forest regeneration under different post-fire restoration practices in the northwestern Italian Alps”, *Ecological Engineering*, 36, 1365-1372
- Caetano MS, Mertes LAK, Cadete L, Pereira JMC, (1996), “Assesment of AVHRR data for characterizing burned areas and post-fire vegetation recovery”, *EARSel Advances in Remote Sensing*, 4: 124-134.
- Chafer CJ, Noonan M, Macnaught E (2004), “The post-fire measurement of fire severity and intensity in the Christmas 2001 Sydney wildfires”, *International Journal of Wildland Fire*, 13: 227–240.
- Cocke AE, Fulé PZ, Crouse JE. (2005), “Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data”, *International Journal of Wildland Fire*, 14: 189–198.
- Díaz-Delgado R, Pons X, (2001), “Spatial patterns of forestfires in Catalonia (NE Spain) along the period 1975-1995. Analysis of vegetation recovery after fire”, *Forest Ecology and Management*, 147: 67-74.
- Díaz-Delgado R, Lloret F, Pons X, (2003), “Influence of fire severity on plant regeneration by means of remote sensing imagery”, *International Journal of Remote Sensing* Vol.24, Iss.8: 1751-1763.
- 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.
- Hall GG., Strebel DE., Nickeson JE e Goetz SJ, (1991), “Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensor images”, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 35: 11-27.
- Hill J. e Sturm B., (1991), “Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring”, *International Journal of Remote Sensing*, 12 (7): 1471-1491.
- Hudak AT, Morgan P, Bobbitt MJ, Smith AMS, Lewis SA, Lentile LB, Robichaud PR, Clark JT, McKinley RA (2007), “The relationship of multispectral satellite imagery to immediate fire effects”, *Journal of Fire Ecology*, 3: 64–90.
- Isaev A, Korovin G, Bartalev S, Ershov D, Janetos A, Kasischke E, Shugart H, French N, Orlick B, Murphy T, (2002), “Using remote sensing to assess Russian forest fire carbon emissions”, *Climatic Change* 55: 235–249.
- Kasischke E, Hoy E, French N, Turetsky M (2007), "Post-fire evaluation of the effects of fire on the environment using remotely sensed data.", *Proceedings of the 6th international workshop of the EARSel special interest group on forest fires. Advance in remote sensing and GIS applications in forest fire management. Towards an operational use of remote sensing in forest fire management*, 27-29 September 2007, Thessaloniki, Greece : 34-52.

- Key C, Benson N, (2003), "Remote sensing measure of severity, the normalized burn ratio", *Fire effects monitoring and inventory protocol*, Landscape Assessment Systems for Environmental Management and USDA Fire Sciences Laboratory, Rocky Mountain Research Station, [online] URL: <http://www.fire.org/firemon/lc.htm>.
- Key C, Benson N, (2005), "Landscape assessment: ground measure of severity; the Composite Burn Index, and remote sensing of severity, the Normalized Burn Index. In 'FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System'", *USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-164-CD LA*: 1–51.
- Lentile LB, Holden ZA, Smith AMS, Falkowski MJ, Hudak AT, Morgan P, Lewis SA, Gessler PE , Benson NC. (2006), "Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects", *International Journal of Wildland Fire*, 15: 319–345
- López Garcia M, Caselles V. (1991), "Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data", *Geocarto International*, 6: 31–37
- Marzano R, Garbarino M, Beghin R, Lonati M, Bovio G, Motta R, Lingua E. (2010), "Are current post-fire management practices delaying natural regeneration in *Pinus sylvestris* mountain forests of the Aosta Valley (NW Italy)?" in *Proceedings of the VI International Conference on Forest Fire Research*, Coimbra 15-18 November 2010, D. X. Viegas (ed.).
- Miller J, Thode A. (2007), "Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR)", *Remote Sensing of Environment*, 109: 66–80
- Morgan P, Hardy CC, Swetnam TW, Rollins MG, Long DG. (2001), " Mapping fire regimes across time and space: Understanding coarse and fine-scale fire patterns", *International Journal of Wildland Fire*, 10: 329–342.
- Salvador R, Valeriano J, Pons X, Diaz-Delgado R. (2000), "A semiautomatic methodology to detect fire scars in shrubs and evergreen forests with Landsat MSS time series", *International Journal of Remote Sensing*, 21: 655–671.
- USGS - U.S. Geological Survey , [online] URL: earthexplorer.usgs.gov
- White JD, Ryan KC, Running SW. (1996), "Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery", *International Journal of Wildland Fire*, 6:125-136.