



## IDENTIFICAZIONE DELLE AREE PERCORSE DA INCENDIO MEDIANTE DATI RADAR E OTTICI TELERILEVATI

### EVALUATION OF EFFECT OF PRESCRIBED FIRES USING SPECTRAL INDICES AND SAR DATA

J.M.N. Romeiro <sup>a</sup>, F.T.P. Torres <sup>b</sup>, F. Pirotti <sup>c\*</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Environmental Sciences and Natural Resource Management, Norwegian University of Life Sciences, Norvegia - joyce.machado.nunes.romeiro@nmbu.no

<sup>b</sup> Department of Forestry Engineering, Federal University of Viçosa, Brasile - tamiozzo@ufv.br

<sup>c</sup> CIRGEO Centro Interdipartimentale di Ricerca di Geomatica, Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-forestali (TESAF), Università degli Studi di Padova, viale dell'Università 16 - francesco.pirotti@unipd.it

**PAROLE CHIAVE:** SAR, telerilevamento, incendi, monitoraggio

**KEY WORDS:** SAR, remote sensing, prescribed fires, fire monitoring

#### RIASSUNTO

In questo lavoro sono stati utilizzati dati satellitari da sensori passivi (~300 immagini Landsat) e attivi radar/SAR (~650 immagini Sentinel-1) per valutare la capacità di identificazione semiautomatica di aree percorse da due differenti tipologie di incendio. I risultati mettono in confronto indici calcolati da dati ottici passivi, noti in letteratura per identificare la presenza e lo stato della vegetazione e la severità dell'incendio (indici NDVI e dNBR), ed un metodo che utilizza unicamente dati attivi radar.

Gli incendi analizzati sono divisi in tre gruppi, incendi prescritti (artificiali, controllati), incendi autunno-invernali e incendi estivi (naturali, non controllati). Si ipotizza che gli incendi estivi naturali abbiano un impatto maggiore rispetto agli altri in quanto la stagione estiva predispone ad impatti maggiori da parte degli incendi. Sono stati analizzati due aspetti: il tempo di recupero, ovvero quanto l'area impiega per tornare ai valori precedenti di NDVI e NBR, e la severità tramite la differenza prima e dopo dei due indici.

I risultati relativi ai dati ottici chiaramente riportano che non sembra esserci differenza significativa, tra i tre gruppi, per quanto riguarda il tempo richiesto per ritornare a valori pre-incendio, anche se si vede un debole segnale che gli incendi estivi sembrano in media richiedere più tempo di recupero. Con NBR sembra che gli incendi prescritti e quelli autunno-invernali richiedano in media ~200 giorni, mentre quelli non controllati estivi 308 giorni. Una differenza significativa è stata identificata riguardo la severità dell'incendi estivi rispetto a quelli prescritti, mentre non sono state trovate differenze di severità tra prescritti vs autunno-invernali e autunno-invernali vs estivi. I dati SAR sono stati analizzati utilizzando valori di soglia con il metodo Smoothed Z-score su una finestra mobile; risultano avere una capacità di identificare le aree percorse da incendio su 19 aree su 39 (48%) usando il 90° percentile dei valori normalizzati di VV e VH sull'area. Questa percentuale aumenta al 95% se si utilizza come riferimento il dato NBR invece che unicamente le date degli incendi.

#### ABSTRACT

In this work, satellite data from passive (~ 300 Landsat images) and active radar / SAR (~ 650 Sentinel-1 images) sensors were used to assess the capability of semi-automatic identification of areas crossed by two different types of fire. The results compare indices calculated from passive optical satellite imagery, known in literature to be related to vegetation status and fire severity (NDVI and dNBR), and a method that uses only active radar data.

The fires analyzed are divided into three groups, prescribed fires (artificial and controlled), autumn-winter fires and summer fires (natural, uncontrolled). An hypothesis to test was that natural summer fires to have a greater impact than others as the season predisposes to greater severity. Two aspects were analyzed: the recovery time, i.e. how long the area takes to return to the previous values of NDVI and NBR, and the severity, that is the difference in vegetation status before and after the fire.

The optical data results clearly show that there appears to be no difference in the time it takes for an area covered by a fire to return to pre-fire values, although there is a faint sign that summer fires appear to take on average more recovery time. With NBR it appears that prescribed fires and autumn-winter fires take an average of ~ 200 days, while uncontrolled summer fires take 308 days. A significant difference was identified regarding the severity of the summer fires compared to those prescribed, while no differences in severity were found between prescribed vs autumn-winter and autumn-winter vs summer. The SAR data were analyzed using threshold values with the Smoothed Z-score method on a moving window, it appears to have an ability to identify areas affected by fire on 19 of 39 areas (48%) using the 90th percentile of normalized values of VV and VH on the area. This percentage increases to 95% if the NBR data is used as a reference instead of using only the dates of the fires reported by the relevant agencies.

## 1. INTRODUZIONE

Il telerilevamento applicato alla superficie terrestre utilizza sensori attivi e passivi per analizzare la riflettanza degli oggetti, e comprendere fenomeni di interesse in vari campi applicativi. I sistemi “passivi” ottici utilizzano il sole come fonte di energia elettromagnetica predominante e registrano riflettanze su frequenze ben definite dello spettro elettromagnetico, comunemente nelle aree del visibile e dell’infrarosso. I sensori “attivi” vengono così definiti perché al tempo stesso emettono e ricevono l’energia che viene intercettata dalla superficie terrestre.

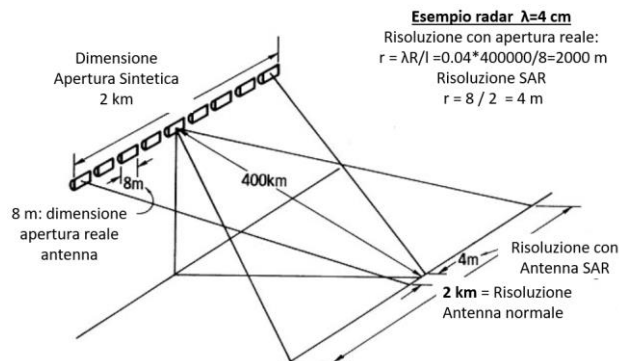
### 1.1 Sensori attivi

L’energia elettromagnetica che, una volta emessa dal sensore attivo, viene intercettata dalla superficie terrestre, è in parte assorbita ed in parte riflessa con due modalità: se la superficie è “liscia” la riflessione è speculare (legge di Fresnel), se la superficie è “scabra” in parte viene riflessa in modo speculare ed in parte in modo diffuso in varie direzioni. Nell’insieme il fenomeno viene definito retrodiffusione o, nel suo termine anglosassone ormai diventato di uso comune, *backscatter*. Useremo in questo contesto il termine *backscatter* per indicare l’intensità dell’energia che arriva da retrodiffusione di un impulso emesso da un sensore attivo.

I sensori attivi radar emettono microonde, ovvero una gamma di lunghezze d’onda tra ~1 cm e ~1 m; la frequenza corrispondente varia tra ~1 e ~100 GHz (tabella 1). I sensori radar su satelliti in orbita impiegati per l’osservazione della terra sono ad apertura sintetica (SAR, da *synthetic aperture radar*) in quanto utilizzano, per aumentare la risoluzione spaziale, il movimento del veicolo per simulare un’antenna di grandi dimensioni. E’ noto infatti che la risoluzione spaziale dipende da quanta energia ritorna al ricevitore, e questa dipende dal rapporto tra lunghezza d’onda impiegata e dimensione dell’antenna. L’equazione di un’antenna monostatica radar è infatti la seguente.

$$P_r = \frac{P_t G_a A_a}{(4\pi)^2 D^4} \sigma \quad (1)$$

Dove  $P_r$  = potenza ricevuta,  $P_t$  = potenza trasmessa,  $G_a$  = guadagno dell’antenna,  $A_a$  = area dell’antenna,  $D$  = distanza tra antenna e oggetto retroriflettente,  $\sigma$  = radar cross-section, ovvero la caratteristica capacità dell’oggetto intercettato di riflettere l’energia ricevuta. A parità di altre condizioni, per aumentare  $P_r$  bisogna aumentare la dimensione dell’antenna. Ci sono limiti fisici all’aumento della dimensione reale dell’antenna, per questa ragione si è passato ai radar ad apertura sintetica che simulano un’antenna di lunghezza superiore sfruttando l’effetto Doppler (Figura 1).



**Figura 1.** Aumento risoluzione spaziale mediante SAR.

Il valore di  $\sigma$  è formalmente il rapporto tra  $P_t$  e  $P_r$  e, a parità delle altre condizioni in equazione 1, dipende dalla capacità della superficie intercettata dal segnale radar di riflettere l’energia incidente verso la direzione dell’antenna. Questa capacità dipende da diversi fattori, di cui riportiamo quelli più importanti: (i) le caratteristiche geometriche della superficie illuminata, combinate con l’angolo di incidenza dovuto alla geometria dell’ottica del sensore, forniscono l’angolo di incidenza locale (*local incidence angle* – LIA); (ii) la costante dielettrica della superficie, ovvero la capacità del mezzo di condurre un campo elettromagnetico, che a sua volta dipende esclusivamente dalla composizione e struttura della superficie (Pipitone, 2017); (iii) il contributo riflettente di tutte le micro-superfici dell’area illuminata, che, integrato su tutta l’area, fornisce la risultante capacità di *backscatter*.

Tabella 1: Denominazioni delle bande, frequenze e lunghezze d’onda.

Banda	Frequenza (GHz)	Lunghezza d’onda (cm)	Applicazioni
Ka	27–40	1.1–0.8	Raramente usata
K	18–27	1.7–1.1	Raramente usata (Assorbimento acqua)
Ku	12–18	2.4–1.7	rarely used for SAR (satellite altimetry)
X	8–12	3.8–2.4	Monitoraggio urbano, ghiacciai e aree con neve; non penetra le chiome; la coerenza decade velocemente nel tempo in aree con vegetazione.
C	4–8	7.5–3.8	Classificazione; identificazione di cambiamenti di uso suolo; monitoraggio temporale di aree; navigazione; oceanografia; glaciologia
S	2–4	15–7.5	Utilizzo in crescita in ambito SAR: monitoraggio in agricoltura
L	1–2	30–15	SAR a media risoluzione: monitoraggio geofisico; biomassa e mappatura della vegetazione; interferometria
P	0.3–1	100–30	SAR per stima della biomassa della vegetazione. Il primo SAR con banda P dovrebbe essere messo in orbita da ESA ~2023.

E’ utile sottolineare che il *backscatter* della superficie illuminata viene poi rappresentato con un valore numerico nell’immagine restituita. Questi valori di *backscatter* hanno un intervallo molto ampio ed una distribuzione non normale, dunque vengono trasformati in decibel (dB) con la seguente operazione:

$$\sigma_{dB}^0 = 10 \times \log_{10}(\sigma^0) \quad (2)$$

Quello dunque che viene solitamente registrato nel prodotto Sentinel-1 è  $\sigma_{dB}^0$  chiamato anche *sigma-naught*, nelle due componenti polarizzate, VV e VH, rispettivamente verticale-verticale e verticale-orizzontale.

## 1.2 Sensori attivi per analisi degli incendi

Nello studio di Imperatore et al., (2017) sono stati utilizzati i dati Sentinel-1 in banda C per indagare se tale sensore è in grado di rilevare aree bruciate nelle regioni con vegetazione e hanno concluso che la polarizzazione VH ha risposto più efficacemente nell'identificazione dell'area con incendio, diminuendo il suo valore dopo l'evento. Anche Stroppiana et al. (2015) hanno testato il sensore SAR per mappare in modo semi-automatico le aree che potrebbero essere state percorse da incendio, utilizzando integrando il dato SAR con degli indici spettrali ed un algoritmo di dilatazione spaziale dell'area (Haralick, 1979). Il SAR offre un'opportunità unica per rilevare e valutare l'impatto dell'incendio sul paesaggio in tempi brevi anche in presenza di atmosfera coperta da nuvole. Gli studi in tal senso non sono diversi (Imperatore et al., 2017; Ban et al., 2020; Stroppiana et al. 2015).

## 1.3 Sensori passivi per l'analisi degli incendi

I dati satellitari dunque consentono agli utenti di analizzare fenomeni che accadono sulla superficie terrestre. Gli incendi, sia quelli che vengono prescritti che quelli spontanei, sono sicuramente tra i fenomeni di forte interesse che vengono ampiamente analizzati, in particolare nelle aree più a rischio, ovvero vicine ai centri abitati o ad altre zone vulnerabili, in ambienti con clima secco, ventose e con vegetazione. Alcuni studi fatti con sensori passivi nella regione mediterranea hanno testato la capacità di diversi indici, che combinano le regioni del rosso e del vicino infrarosso dello spettro, per distinguere aree percorse da incendi subito dopo l'evento da aree che non hanno subito modifiche.

L'indice NDVI (*normalized difference vegetation index*) è stato uno di quelli più utilizzati, con procedure che coinvolgono sia solo il post-incendio che un'analisi bi-temporale (differenza pre-incendio e post-incendio) (Pereira, 1999; Chuvieco et al., 2002). L'indice NBR (*normalized burn ratio*) era meno utilizzato rispetto a NDVI a causa della mancanza di disponibilità di informazioni sulla regione dell'infrarosso medio (*short wave infrared - SWIR*) nei sensori utilizzati in quel momento, come AVHRR e WIFS. Con LANDSAT TM/ETM e le immagini della regione del medio infrarosso (banda 7 nei sensori TM/ETM), l'NBR è diventato più utilizzato (Escuin et al., 2008).

Anche se gli indici più comuni per valutare la severità degli incendi sono NDVI e NBR (Escuin et al., 2008; Mallinis et al., 2018), diversi studi (Chuvieco et al., 2002; Chen et al., 2011; Veraverbeke et al., 2012) hanno valutato altri indici che possano migliorare le analisi degli incendi boschivi, come BAI (Burnt Area Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), IFI (integrated forest index), EVI (enhanced indice), e altro ancora, ma nel complesso NBR è ancora considerato il miglior indice per valutare gli effetti del fuoco (Collins et al., 2018).

## 1.4 Integrazione dati per analisi degli incendi

I dati passivi ed attivi, i.e. ottici e SAR, hanno caratteristiche complementari che possono essere integrate per fornire maggiori informazioni a modelli e metodi. I dati SAR della missione Sentinel 1 in banda C (Torres et al., 2012) e i dati multispettrali ottici Landsat e Sentinel 2 (Drusch et al., 2012) forniscono dati aperti (open-data) accessibili nei due ambiti SAR e ottico. I set di dati sono disponibili dalle rispettive piattaforme di distribuzione, ma anche come prodotti in Google Earth Engine (GEE), una piattaforma integrata progettata per potenziare e semplificare l'utilizzo dei dati satellitari (Gorelick et al., 2017). Con la

disponibilità di dati sia ottici che SAR gratuiti e già in parte pre-elaborati in GEE, i dataset del programma *Copernicus* rappresentano uno strumento ottimale e rapido per la identificazione e valutazione dei danni da incendio.

Gli incendi prescritti sono quelli artificialmente applicati da esperti per vari motivi, tra i quali proprio quello di limitare la presenza di materiale infiammabile. Nonostante tutti i progressi relativi all'analisi degli incendi, la valutazione dell'efficacia dei fuochi prescritti, che servono anche a ridurre il rischio di incendi, rimane una questione di grande importanza, specialmente nell'ottica dei cambiamenti climatici che sembrano facilitare incendi più estremi (Fernandes, 2015). Le procedure di pianificazione e monitoraggio degli incendi prescritti devono essere migliorate nell'area di studio (Portogallo), così come nell'intera regione mediterranea, al fine di superare le attuali carenze (Fernandes and Botelho, 2004). Il SAR offre un'opportunità unica per rilevare e valutare l'impatto dell'evento sulla vegetazione immediatamente dopo l'evento.

Questo studio ha l'obiettivo di valutare l'efficacia di alcuni metodi per identificare le aree percorse da incendi boschivi e incendi prescritti utilizzando immagini da sensori passivi ottici e da SAR. Nello specifico, gli obiettivi della presente analisi sono:

- (1) valutare se gli incendi spontanei e gli incendi prescritti portano una differenza significativa dai dati rilevati con SAR Sentinel-1.
- (2) valutare, mediante le immagini satellitari, se gli incendi spontanei hanno una severità significativamente diversa rispetto agli incendi prescritti.

## 2. MATERIALE E METODI

### 2.1 Area di studio

Lo studio è stato condotto nella subregione nordoccidentale del Portogallo chiamata Alto Minho, che copre un'area di 221 mila ettari. Il clima è di tipo mediterraneo, caldo-estivo (Csb) secondo la classificazione climatica di Köppen, con precipitazioni medie che vanno da 28,4 mm di luglio a 228 mm di dicembre e temperatura media da 9,5°C di gennaio a 20,5°C di luglio. La stagione secca va da luglio ad agosto (Figura 2).

La stagione degli incendi in Portogallo si presenta tra giugno e settembre, che corrisponde all'estate calda e secca, tipica dei climi mediterranei (Pereira, 1999). Il sito di studio è stato scelto per la sua elevata frequenza di incendi (Oliveira et al., 2018) e tutte le aree considerate per le analisi di questo studio sono coperte da erba e vegetazione bassa, solitamente arbusti appartenenti alla tribù delle *Genisteae*, e non vengono utilizzate come pascolo.

### 2.2 Aree percorse dal fuoco

I dati sugli incendi sono stati raccolti dal sito web dell'Istituto per la conservazione della natura e le foreste, (ICNF <https://fogos.icnf.pt>). I dati sono in formato vettoriale, poligoni contenenti informazioni associate; in particolare sono registrate la data dell'incendio, l'area totale impattata e la causa dell'evento. Non tutti i poligoni avevano date compilate dettagliatamente – i.e. con giorno, mese e anno - essendo alcuni di essi indicati con solo l'anno di occorrenza. Tali aree sono state eliminate, poiché il giorno esatto in cui si è verificato l'incendio è fondamentale per questa analisi.

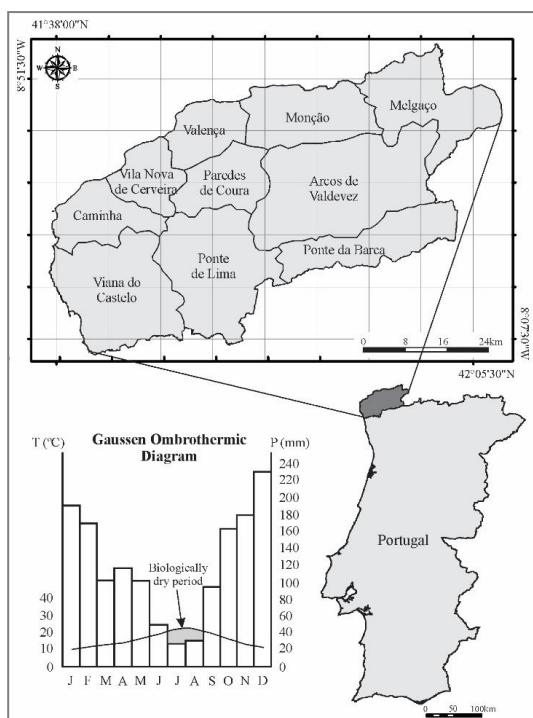


Figura 2. Area di studio e profilo climatico

Sono stati analizzati 70 incendi avvenuti tra il 2013 ed il 2019 (Figura A1 in appendice) con superfici che variavano da 0,19 ha a 32,3 ha. I dati sull'uso del suolo per gli anni 2010 e 2015 (risoluzione 5 metri) sono stati recuperati dall'Istituto Geografico Portoghese (IGP), e insieme alle informazioni sulle aree incendiate, sulla pendenza, esposizione e altitudine. Queste informazioni sono state utilizzate per identificare aree di incendio con le stesse caratteristiche. Sono stati creati due set: aree di incendio prescritto vs. non prescritto. Questi due set assicurano un confronto tra coppie di aree con caratteristiche simili, e.g. lo stesso uso del suolo, quota media sul livello del mare, esposizione e pendenza e che si sono verificati nella stessa stagione o per lo meno lo stesso anno.

A seguito dell'allocatione dei poligoni e della tipologia di incendio (prescritta e non), sono stati creati due scenari, a seconda della data dell'incendio: gli incendi estivi (quando il combustibile è secco e si prevede che la severità dell'incendio sia maggiore) e gli incendi autunno-invernali, quando si prevede che la severità dell'incendio sia inferiore a causa del clima più umido.

### 2.3 Mitigare l'effetto "bordo"

Al fine di minimizzare gli effetti di bordo delle aree di studio sulla raccolta dei dati delle immagini satellitari, sono stati esclusi dall'analisi i poligoni inferiori ad un ettaro e con distanza da bordo a bordo inferiore a 60 metri. Il valore di 60 metri è stato utilizzato in quanto ragionevole rispetto alla risoluzione minima del dato Landsat, di 30 metri. Ai poligoni rimanenti è stato rimosso un margine di 30 m per le analisi con Landsat, mentre per l'analisi Sentinel-1 e Sentinel-2 il margine rimosso era di 10 m. Trattasi praticamente di una contrazione del poligono per evitare un effetto del mescolamento della risposta del pixel dove la copertura è evidentemente molto varia. Dato che ai margini delle aree spesso corrisponde una copertura diversa dalla vegetazione (e.g. strada, corso d'acqua), si vuole limitare l'inclusione di celle contenenti una copertura del suolo "mista", che porta una conseguente alta varianza dei valori di risposta del segnale misurato.

La Figura A2 nel materiale in appendice, mostra l'effetto di questo accorgimento. Si nota una distribuzione dei valori di NBR, espressa tramite percentili, con deviazioni molto ridotte quando viene contratto il poligono con questo accorgimento. Dopo questa contrazione delle aree, è stato verificata la quantità di pixel per ogni poligono e sono stati esclusi dalle analisi i poligoni con meno di venti pixel, in modo da avere una distribuzione rappresentativa e statisticamente affidabile. Alla fine di queste elaborazioni, le aree disponibili per Sentinel erano tutti i 40 poligoni, in quanto avevano più di venti pixel e quindi potevano essere utilizzati, mentre per i dati Landsat si possono analizzare 13 poligoni.

### 2.4 Analisi dati satellitari

La finestra temporale di 5 anni ha restituito circa 650 immagini per Sentinel 1 nel periodo dal 3 ottobre 2014 al 22 maggio 2020. Per Landsat 8 OLI/TIRS sono stati utilizzati 252 immagini dall'11 maggio 2013 al 6 maggio 2020, mentre per Landsat 7 ETM+ c'erano 54 immagini utilizzabili per il periodo dal 27 gennaio 2010 al 19 maggio 2013.

Google Earth Engine (GEE) fornisce prodotti Sentinel-1 "ground range detected" (GRD) pre-elaborati a  $\sigma^0$  (*sigma-naught* - vedi equazione 2). La pre-elaborazione applicata con GEE prevede: (1) la rimozione del rumore termico, (2) la calibrazione radiometrica e (3) la trasformazione del segnale al valore di  $\beta^0$  (Beta-Baught) utilizzando un modello digitale di superficie (DSM) come indicato in (Small, 2011). Il DSM alle latitudini delle aree di studio analizzate proviene dalla Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) avvenuta nel febbraio 2000 (Farr et al., 2007). L'ultima parte di elaborazione, la (3), è stata fatta con un codice GEE creato ad hoc.

Il prodotto GEE utilizzato è stato ulteriormente trasformato per fornire valori di gamma-naught ( $\gamma^0$ ) correggendo l'angolo di incidenza locale usando il prodotto SRTM come in (Small, 2011). Ciò ha rimosso la distorsione tra le orbite ascendenti e discendenti come evidente dal grafico nella seguente Figura 3, che riporta i valori di mediana e intervallo interquartile (25° e 75° percentile) della serie temporale per un'area.

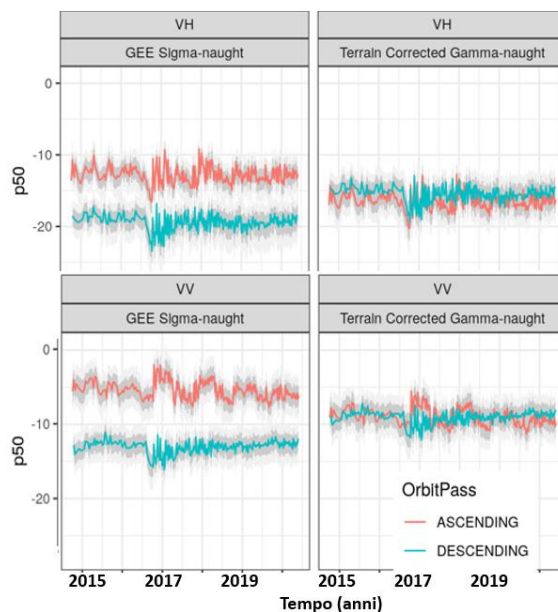


Figura 3. Valori di mediana (p50) ed intervallo interquartile (25° percentile e 75° percentile - banda grigia) per intensità di VV e VH registrati dal sensore.

I valori di riflettanza (sensori ottici passivi) e *backscatter* (sensori attivi radar) possono essere considerati un segnale da analizzare per rilevare una differenza significativa prima e dopo l'evento, e misurare la differenza rispetto al rumore. Si può presumere che il rumore sia la variazione naturale della riflettanza tra rilevamenti diversi. Su ciascuna area sono stati estratti, mediante aggregazione, 5 percentili della distribuzione dei valori contenuti nelle celle di ogni area per ogni immagine. Si può notare che è importante rimuovere i valori anomali; valori anomali e valori nulli possono provenire da aree che cadono al bordo di un'immagine, anche se ricadono all'interno dell'impronta dell'immagine ed all'interno dell'area analizzata, come in Figura 4.

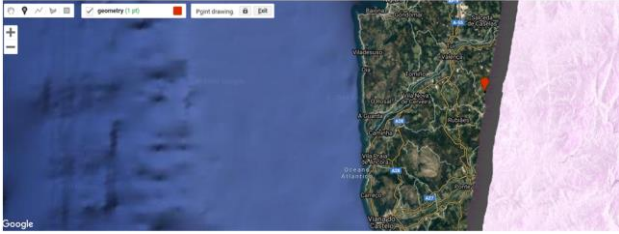


Figura 4. Un'area con valori uguali a zero ai bordi di un'immagine Sentinel 1.

I cinque percentili usati per rappresentare le distribuzioni di riflettanza in un'area sono i seguenti:  $P_n = \{P10, P25, P50, P75, P90\}$ . Questi valori sono calcolati per le riflettanze sia in polarizzazione VV che VH. Da questi valori sono state calcolate anche le seguenti 5 metriche aggiuntive:

$$\begin{aligned} IPr1 &= Y_{p75} - Y_{p25} \\ IPr2 &= Y_{p90} - Y_{p10} \\ NSR-P_n &= \frac{Y_{p_n}^{VV} - Y_{p_n}^{VH}}{Y_{p_n}^{VV} + Y_{p_n}^{VH}} \\ RATIO-P_n &= \frac{Y_{p_n}^{VV}}{Y_{p_n}^{VH}} \\ DIFF-P_n &= Y_{p_n}^{VV} - Y_{p_n}^{VH} \end{aligned} \quad (3)$$

dove:  $P_n$  è il percentile e  $n = \{10^\circ, 25^\circ, 50^\circ, 75^\circ, 90^\circ\}$ ; NSR è Normalized Signal Ratio (rapporto segnale normalizzato); IPr1 e IPr2 sono intervalli tra percentili rispettivamente del  $25^\circ - 75^\circ$  e  $10^\circ - 90^\circ$ . La combinazione delle metriche e dei valori di percentile fornisce 29 variabili in tutto che vengono testate per valutarne l'efficacia nell'identificare la capacità di identificare gli incendi nelle aree analizzate.

**2.4.1 Metodo di analisi con dati SAR.** Per definire quali variabili hanno dato i migliori risultati nell'identificazione del danno da incendio, è stato utilizzato l'algoritmo *Smoothed Z-score* (SZS) (Brakel, 2014) per identificare anomalie nel segnale, ovvero determinare in modo binario, mediante una soglia adattiva, se la superficie ha subito una modifica significativa o meno. Questo metodo è stato utilizzato per selezionare le variabili che sarebbero state successivamente confrontate con gli indici derivati dalle immagini ottenute con i sensori ottici passivi.

L'algoritmo SZS utilizzato per analizzare i dati, rileva i valori di *backscatter* che cambiano significativamente rispetto ai valori ritenuti "normali", ovvero al segnale registrato prima dell'evento in una finestra temporale definita. Si può presumere che i valori

di *backscatter* registrati dal Sentinel-1 che arrivano da una copertura del suolo che non cambia in modo significativo, forniscano un dato distribuito normalmente con una certa media ed una deviazione standard. Quest'ultima aumenta se la copertura dell'area cambia in modo da cambiare le caratteristiche di risposta rispetto al segnale SAR. Nella sezione dedicata alla discussione si riportano gli ulteriori fattori che influenzano il segnale, come neve e le precipitazioni atmosferiche, che modificano le proprietà della superficie illuminata dal segnale e quindi possono fornire falsi positivi.

L'algoritmo di rilevamento utilizza un punteggio (Z) calcolato utilizzando la media ( $\mu$ ) e la deviazione standard ( $\sigma$ ) su una finestra temporale mobile  $p$  di dimensione  $N$ , sfalsata dai valori precedenti il valore da testare. Il punteggio Z del valore testato (Y) nel giorno  $n$  è calcolato come segue:

$$Z_n = \frac{Y_n - \mu_p}{\sigma_p} \quad (4)$$

Dove  $Y_x$  è il valore del pixel al tempo  $n$ ,  $p$  è l'insieme di valori analizzati, ovvero i valori del pixel nella finestra temporale precedente di dimensione  $N$ ,  $p = Y_{n-1}^{n-(N+1)}$ ;  $\sigma$  è la deviazione standard e  $\mu$  è la media dell'insieme  $p$ .

Il valore Z è dunque un valore normalizzato di differenza rispetto alla media dei valori su una timeline precedente al momento analizzato. Se questo valore è al di sopra di una certa soglia, il valore di *backscatter* può essere considerato significativamente diverso dai valori passati. In questo lavoro abbiamo utilizzato una soglia di 3, per raggiungere un livello di confidenza del 99% o migliore. Questo algoritmo è utilizzato in diverse applicazioni che vanno dal rilevamento dell'accelerazione (Esnaola-Gonzalez et al., 2020) all'identificazione di anomalie (Perkins and Heber, 2018).

**2.4.2 Metodo di analisi con dati ottici.** In questa parte dello studio, dalle missioni Landsat 7 e 8 sono stati utilizzati il sensore Enhanced Thematic Mapper Plus - ETM+ (Landsat 7) per la raccolta di dati dal 2010 e il 2013, ed il sensore Operational Land Imager - OLI (Landsat 8) per analizzare i dati dal 2013 al 2020. Le scene ETM+ sono state utilizzate per incendi avvenuti nel 2013 per prendere la media di almeno due anni precedenti l'evento. Gli indici spettrali calcolati sono stati il Normalized Burn Ratio (NBR) (Eq. 2) e il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Eq. 3), poiché sono gli indici più comuni per valutare la severità dell'incendio (Escuin et al., 2008; Mallinis et al., 2018).

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (5)$$

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (6)$$

dove: NIR - near infrared (ETM+: banda 4; OLI: banda 5); SWIR - short wave infrared (ETM+: banda 7; OLI: banda 7).

I valori NDVI e NBR variano da -1 a 1, essendo 1 la maggiore attività vegetativa, e valori prossimi allo zero e negativi indicano poca o nessuna attività (Chuvieco et al., 2002). I valori di 5 percentili degli indici NBR e NDVI di ogni area sono stati estratti su ciascuna area bruciata, quindi sono stati riportati su grafici di distribuzione dei valori (vedi in appendice figura A2), seguendo la stessa metodologia utilizzata da (dos Santos et al., 2018). Questo consente di valutare il tempo di recupero richiesto per far ritornare la vegetazione nell'area e vedere la differenza tra incendi prescritti, incendi autunno-invernali ed incendi estivi.

Dalle serie temporali dei dati Sentinel-1 (SAR) e degli indici NDVI e NBR (dati ottici), è stato effettuato il confronto per verificare se i dati Sentinel-1 forniscono una risposta coerente per identificare gli effetti dell'incendio nella vegetazione. La metodologia di lavoro riassunta è presentata in Figura 5.

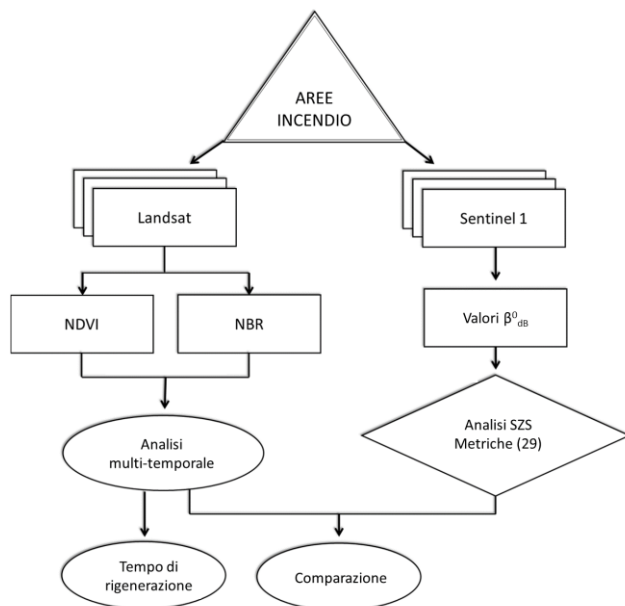


Figura 5. Schema di analisi.

### 3. RISULTATI E DISCUSSIONE

#### 3.1 Sensori ottici passivi - NDVI e NBR

La serie temporale della mediana dei valori nei vari poligoni, è stata analizzata usando una finestra temporale pre- e post-incendio. La mediana è stata scelta in quanto fornisce valori meno influenzati da valori poco rappresentativi, come ad esempio piccole aree non percorse da incendio incluse nell'area marginalmente. La media dei valori nella finestra "pre" è stata usata come valori di riferimento in una situazione normale. Dopo l'evento, il "valore minimo dopo l'incendio" è stato creato utilizzando il valore minimo dei valori di mediana, questa volta nella finestra temporale post-incendio. I "giorni di recupero" sono stati calcolati usando il numero di giorni che impiega l'area a ritornare ai valori precedenti dell'indice. Infine, per quanto riguarda una stima della severità dell'incendio, questa avviene confrontando il valore dell'indice prima e dopo, calcolando la differenza tra il minimo nella finestra post-incendio e la media nella finestra temporale pre-incendio.

**3.1.1 Durata ripresa dal danno.** Come riportato nel grafico in alto in Figura 6, la durata del danno misurata con i valori di NDVI, i.e. il numero di giorni necessari all'area per ritornare a valori di NDVI pre-incendio, per gli incendi che si sono verificati durante l'inverno/autunno è stata in media di 121 giorni, mentre gli incendi che si verificano in estate la media è di 177 giorni e la durata per gli incendi prescritti avevano una media di 152 giorni. In tutti e tre i casi (incendi autunno-invernali, estivi e prescritti) il numero di giorni non è risultato significativamente diverso per nessun caso usando un test di Tukey ( $p < 0,05$ ).

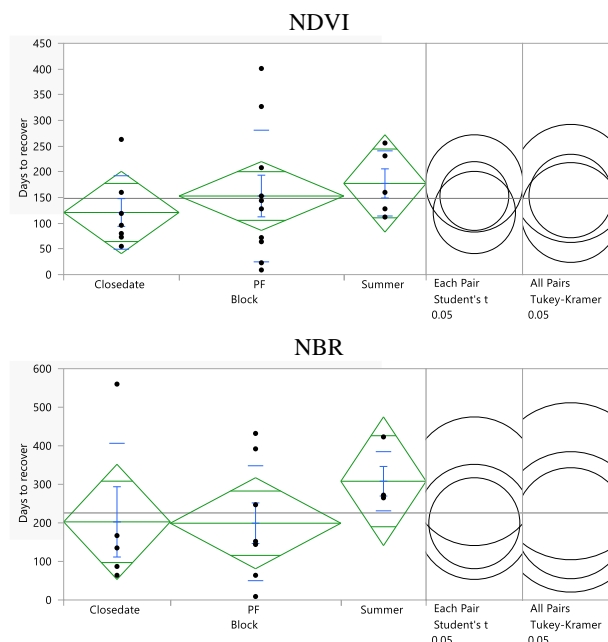
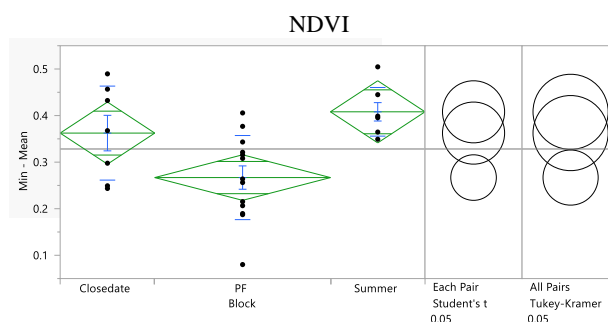


Figura 6. Analisi comparativa dei giorni di recupero dello stato della vegetazione con incendi: *Closedate* = incendi autunno-invernali, *PF*=incendi prescritti e *Summer*=incendi estivi – dai test statistici non risultano differenze significative tra nessuno dei tre gruppi.

Sempre in figura 6 ma nel grafico in basso, il tempo richiesto per ritornare a valori pre-incendio di NBR, per gli incendi autunno-invernali hanno avuto una media di 202 giorni per riprendersi dall'incendio, mentre gli incendi estivi hanno avuto una media di 308 giorni e gli incendi prescritti hanno avuto una media di 199 giorni per riprendersi dall'incendio. Il numero di giorni per riprendersi dall'incendio per tutti e tre i trattamenti è stato considerato uguale dal test di Tukey ( $p < 0,05$ ).

**3.1.2 Stima della severità degli incendi.** Come discusso in precedenza, NDVI e NBR sono spesso utilizzati per valutare la severità degli incendi boschivi. Maggiore è la differenza (pre e post-incendio), maggiore è il grado di severità. Come mostrato nella Figura 7, per la differenza tra le risposte pre-incendio e post-incendio di NDVI, gli incendi boschivi autunno-invernali, gli incendi estivi e gli incendi prescritti hanno avuto una differenza media prima e dopo l'incendio di 0,362, 0,408 e 0,266, rispettivamente. Gli incendi autunno-invernali sono considerati, dal test di Tukey, come non aventi una severità significativamente diversa dagli incendi prescritti. Invece la severità degli incendi estivi differisce significativamente dalla severità degli incendi prescritti, pur essendo non diversa rispetto a quella degli incendi autunno-invernali.



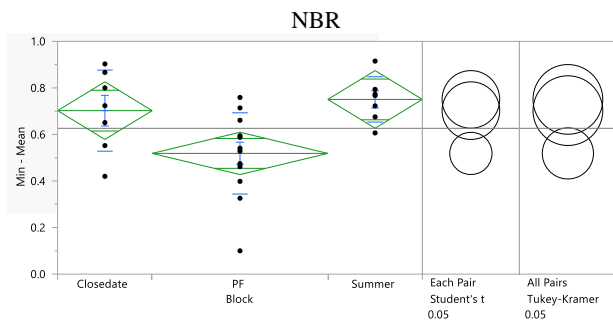


Figura 7. Analisi comparativa della severità misurata come differenza dei valori degli indici prima e dopo (media a valore minimo rispettivamente) della vegetazione con incendi: *Closedate* = incendi autunno-invernali, *PF*=incendi prescritti e *Summer*=incendi estivi

### 3.2 SAR

Le immagini nel materiale in appendice A3 mostrano i risultati nell'applicare il metodo Smoothed Z-Score con soglia 3. Nelle Figure 8, 9 e 10 vengono riportati due esempi confrontando NDVI/NBR e la variabile che risulta avere la risposta migliore: la linea verde è la linea mediana su una finestra di 30 valori, l'area grigia è la deviazione standard. I punti rossi sono tutti segnali considerati significativamente diversi dal segnale passato. Questo è stato definito utilizzando il punteggio Z di ciascun valore calcolato utilizzando la media e la deviazione standard degli ultimi 30 valori; un punteggio Z superiore a 3 è stato definito significativamente diverso.

Per le 29 variabili (equazione 3), analizzate mediante interpretazione visiva senza confrontarle con indici spettrali, la variabile che ha dato i migliori risultati ( $p < 0.01$ ) è stata NSR\_P90 (indice NSR calcolato sul 90° percentile – vedi equazione 3), essendo in grado di rilevare eventi di incendio su 19 delle 39 aree (48% delle risposte corrette). Anche NSR\_p75, RATIO-P75 e RATIO-P90 sono stati considerati significativi ( $p < 0,01$ ), con una media di identificazione di 14,6 volte come risposte corrette al fuoco. Le altre variabili forniscono risposte corrette agli incendi solo 3 volte su 39 aree.

### 3.3 Confronto SAR e indici spettrali

Per questa parte dello studio è stato utilizzato solo il percentile NSR\_P90, nel tentativo di rendere più facile il confronto. Inoltre, sono state utilizzate solo aree con dati NDVI e NBR e dati SAR (20 in totale). Ciò era necessario perché Sentinel-1 A è stato lanciato solo nel 2014, quindi tutte le aree bruciate nel 2013 non possono essere analizzate dal SAR.

I grafici NBR e NDVI sono stati adattati per sembrare più simili ai grafici SAR e per rendere anche l'interpretazione visiva più diretta. Per questo motivo, i grafici ora vengono presentati con il valore medio prima dell'incendio e la sua deviazione standard in verde. La regione grigia è il percentile 10 e 90 per la linea nera rappresenta il percentile 50. La linea rossa indica l'evento incendio che è stato al centro del confronto e la linea rossa tratteggiata, che viene mostrata in alcuni grafici, indica un incendio che è stato identificato dagli indici spettrali e confermata dai dati ufficiali dell'Istituto per la conservazione della natura e le foreste (ICFN).

In alcuni casi è possibile notare che anche se gli indici spettrali si comportano come se si fosse verificato un incendio (es. Summer Wildfire 2019\_18, Winter Wildfire 2018\_1), non vi è alcuna indicazione di incendio – con la linea tratteggiata rossa – perché secondo Secondo i dati ufficiali dell'ICFN, quel giorno non c'è stato nessun incendio.

Nelle figure 8 e 10, vengono riportati due esempi di confronti in cui Sentinel-1 ha funzionato correttamente, mentre in figura 9 un esempio in cui il SAR ha risposto in modo errato.



Figura 8. Confronto SAR e indici spettrali; un esempio di corretta identificazione da parte dell'indice SAR (NSR 90° percentile). La linea rossa indica la data dell'incendio.

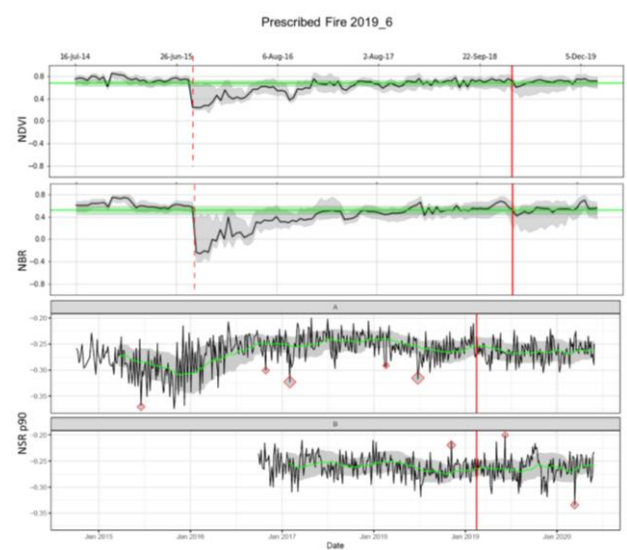


Figura 9. Confronto SAR e indici spettrali; un esempio di identificazione non corretta da parte dell'indice più performante SAR (NSR 90° percentile). La linea rossa indica la data dell'incendio.



Figura 10. Confronto SAR e indici spettrali; un esempio di corretta identificazione da parte dell'indice SAR (NSR 90° percentile) con corrispondenza anche ad un evento precedente non registrato intorno al mese di febbraio. La linea rossa indica la data dell'incendio registrato ufficialmente.

La serie completa di grafici è presentata in appendice A3 dove vengono confrontati l'indice NSR del 90° percentile con gli indici spettrali. La percentuale di corrispondenza migliora considerevolmente: 19 aree identificate da SAR su 20 identificate con NBR (95% delle risposte corrette) – essendo il “Incendio Prescritto del giugno 2019 (19\_6)” l'unico che si discostava sostanzialmente dai valori di NBR e NDVI, ed anche una delle zone con minore severità dell'incendio.

#### 4. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Per la valutazione dell'efficacia nell'utilizzo del SAR Sentinel-1 per i tre gruppi di incendi analizzati (incendi autunno-invernali, incendi estivi e incendi prescritti), l'indice NSR calcolato sul 90° percentile è considerato la migliore tra le 29 metriche SAR analizzate descritte in equazione 3. In contraddizione con Imperatore et al., (2017), la sola polarizzazione VH non sembra rispondere più efficacemente agli eventi di incendio. Inoltre la variabile NSR\_P90 ha identificato il 48% di incendi quando confrontata con i dati ufficiali delle date registrate come incendi sull'area. Confrontando NSR\_P90 con gli indici NBR e NDVI, la percentuale di risposte corrette aumenta in modo significativo. Confrontando le date identificate come percorse da incendio basandosi su NBR/NDVI, la valutazione delle risposte corrette per l'indice NSR\_P90 da SAR migliora notevolmente salendo ad una corrispondenza del 95%. In alcuni casi infatti è possibile notare che anche se gli indici spettrali si comportano come se si fosse verificato un incendio (e.g. vedi appendice A3 Summer Wildfire 2019\_18), non vi è alcuna indicazione di incendio nei dati ufficiali dell'ICFN. Ciò potrebbe essere dovuto a una reale differenza tra NBR e i dati ufficiali sugli incendi dell'ICFN, o potrebbe essere dovuto ad una parziale documentazione degli eventi nella linea temporale. Un'altra ipotesi è che alcuni disturbi non direttamente collegati agli incendi siano stati identificati sia dai dati ottici che dai dati SAR. Questo problema potrebbe rispecchiare un altro caso (dos Santos et al., 2018) in cui i rapporti ufficiali non corrispondono alle risposte degli indici spettrali. Questo implica che la validazione del metodo può essere parzialmente inficiata da mancate registrazioni di aree percorse da incendio in alcune date.

Il confronto SAR – NBR sembra suggerire che se l'NBR è l'indice più utilizzato per stimare indirettamente la data dell'evento, anche il percentile 90 dell'NSR potrebbe essere considerato un buon indice in questo senso. Ulteriori analisi andrebbero fatte per stabilire la sensibilità dell'indice SAR verso la severità dell'incendio.

Un'ulteriore osservazione è che il 90° percentile della metrica NSR sembra essere più efficace quando la severità dell'incendio nell'area è maggiore, come si può vedere dai grafici in appendice A3. Questa è comunque un'ipotesi da avvalorare con dei test specifici, e non è un aspetto affrontato in questo lavoro.

È importante notare che la presente ricerca ha preso in considerazione solo le aree bruciate coperte da erbe e piccoli cespugli, pertanto gli studi futuri dovrebbero concentrarsi sull'uso del SAR e sul confronto dei suoi valori con i valori degli indici spettrali separando diverse coperture del suolo.

Per valutare se gli incendi hanno una severità simile rispetto agli incendi prescritti, anche se il numero di giorni per riprendersi dall'incendio per tutti e tre i gruppi è stato considerato uguale, gli incendi autunno-invernali sono considerati di severità simile rispetto agli incendi prescritti, mentre la severità degli incendi estivi è significativamente diversa da quella degli incendi prescritti, pur essendo simile agli incendi autunno-invernali. Pertanto, si può sostenere che in questo scenario gli incendi estivi hanno un impatto più forte sulla superficie, ma ciò non influisce significativamente sui tempi di recupero della vegetazione.

Il fatto che gli incendi autunno-invernali abbiano una severità simile agli incendi prescritti potrebbe essere un vantaggio per i gestori forestali, poiché la mancanza di risorse rende impossibile trattare ogni anno aree molto estese, rendendo quasi inefficaci gli incendi prescritti su estensione degli incendi (Fernandes, 2015). Pertanto, dal punto di vista gestionale, gli incendi boschivi invernali potrebbero essere utilizzati come trattamento per mitigare il rischio degli incendi boschivi estivi. E' comunque estremamente importante tenere presente che non esiste un confinamento naturale per un qualsiasi incendio e il rischio per le persone e le infrastrutture deve essere preso in considerazione, anche se l'incendio è di bassa severità.

Gli incendi boschivi autunno-invernali hanno una severità vicina a quella degli incendi prescritti, quindi potrebbero essere utilizzati come trattamento per ridurre il rischio degli incendi estivi, ma con cautela poiché ci sono rischi reali legati agli incendi boschivi per le persone e le infrastrutture.

#### RICONOSCIMENTI

##### Contributi dei singoli autori

Idea, concezione, metodologia: J. Romeiro. Revisione, supervisione, metodologia: F. Pirotti e F. Torres.

##### Fonti di finanziamento

Parte del lavoro è stato supportato e finanziato dall'ente Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasile (Capes) – Codice Finanziamento 001 ed in parte dal progetto H2020 FIRE-RES Grant agreement ID: 101037419. Le procedure informatiche di calcolo sono state eseguite con il supporto del progetto Hyperearths - ISREDI7542.



## Conflitti di interessi

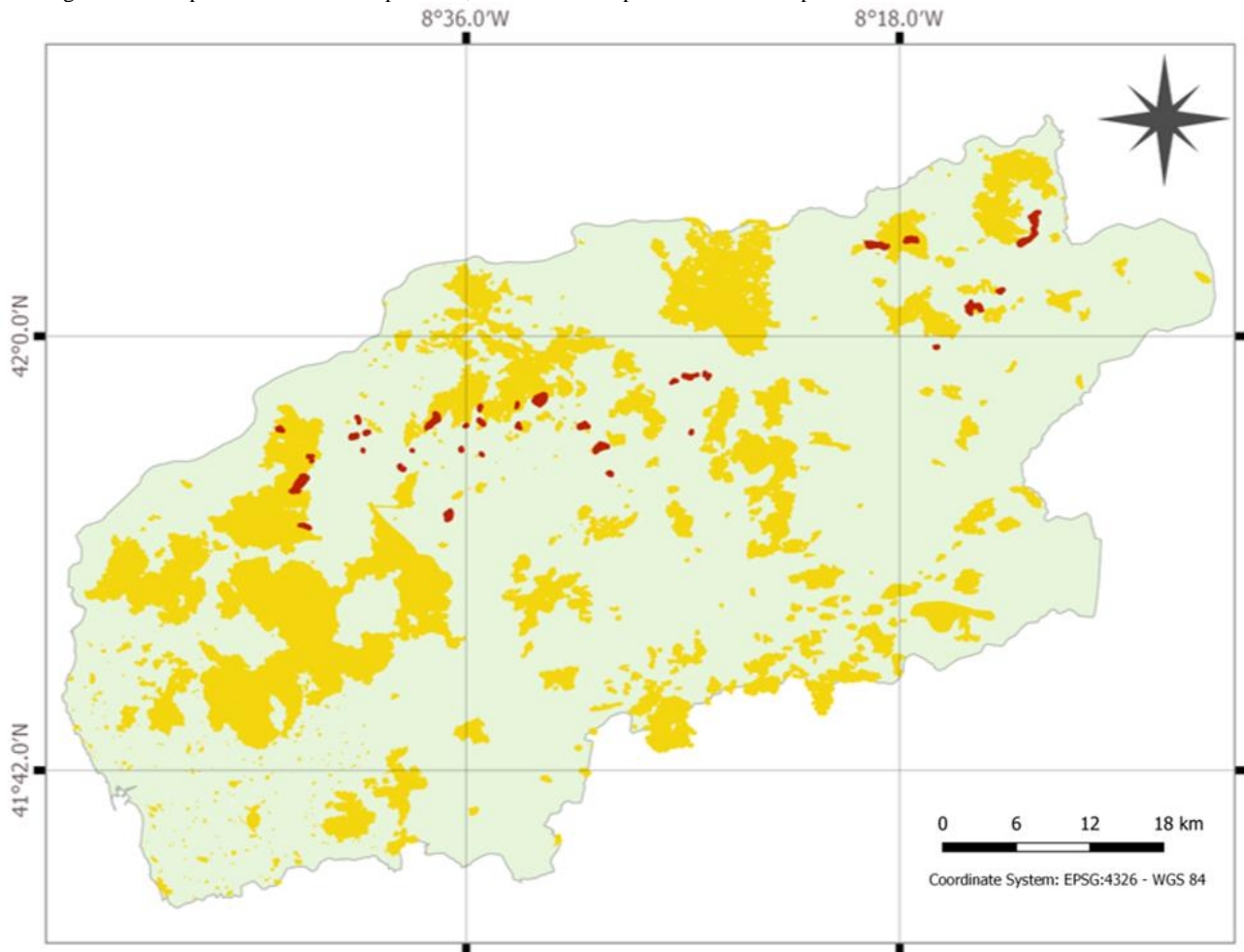
L'autore dichiara di non avere alcun conflitto di interesse.

## BIBLIOGRAFIA

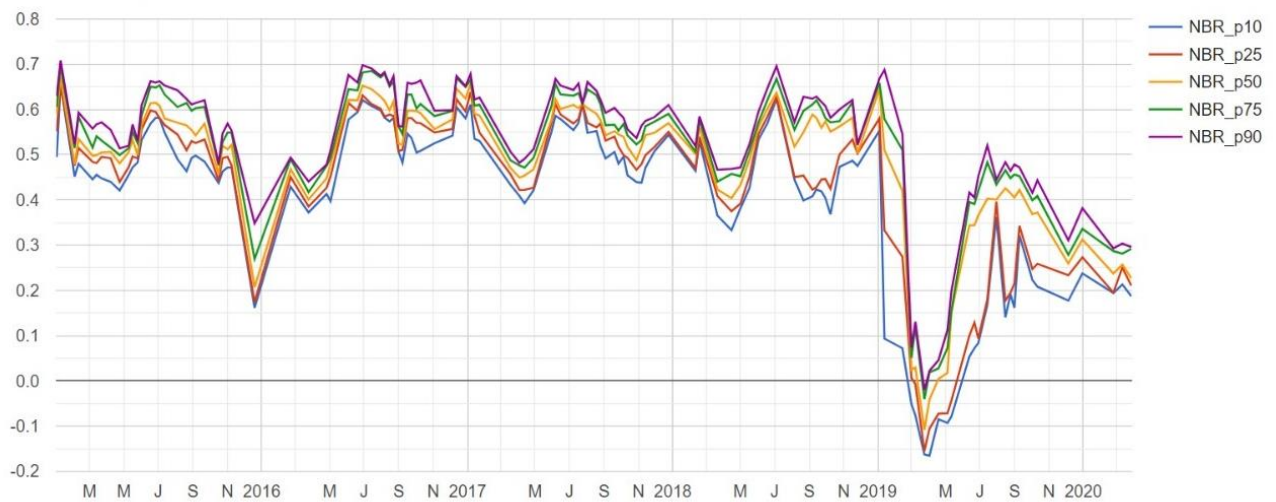
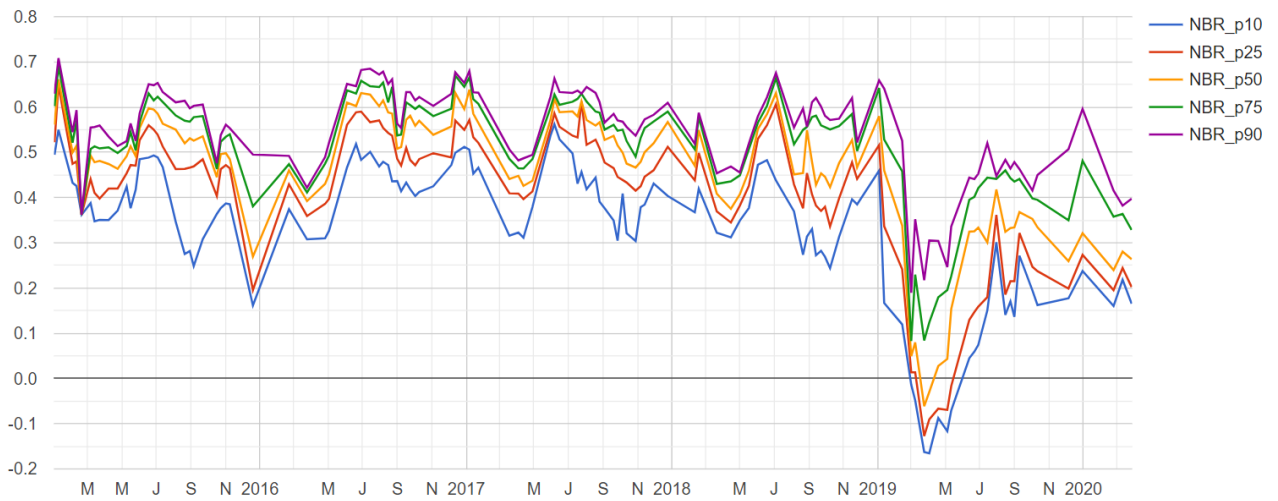
- Ban, Y., Zhang, P., Nascetti, A., Bevington, A.R., Wulder, M.A., 2020. Near Real-Time Wildfire Progression Monitoring with Sentinel-1 SAR Time Series and Deep Learning. *Sci. Rep.* <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56967-x>
- Brakel, J.P.G. van, 2014. Robust peak detection algorithm using z-scores [WWW Document]. Stack Overflow. URL <https://stackoverflow.com/questions/22583391/peak-signal-detection-in-realtime-timeseries-data/22640362#22640362>
- Chen, X., Vogelmann, J.E., Rollins, M., Ohlen, D., Key, C.H., Yang, L., Huang, C., Shi, H., 2011. Detecting post-fire burn severity and vegetation recovery using multitemporal remote sensing spectral indices and field-collected composite burn index data in a ponderosa pine forest. *Int. J. Remote Sens.* 32, 7905–7927. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.524678>
- Chuvieco, E., Martín, M.P., Palacios, A., 2002. Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *Int. J. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1080/01431160210153129>
- Collins, L., Griffioen, P., Newell, G., Mellor, A., 2018. The utility of Random Forests for wildfire severity mapping. *Remote Sens. Environ.* 216, 374–384. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.005>
- dos Santos, J.F.C., Romeiro, J.M.N., de Assis, J.B., Torres, F.T.P., Gleriani, J.M., 2018. Potentials and limitations of remote fire monitoring in protected areas. *Sci. Total Environ.* 616–617, 1347–1355. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.182>
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., Bargellini, P., 2012. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sens. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Escuin, S., Navarro, R., Fernández, P., 2008. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *Int. J. Remote Sens.* 29, 1053–1073. <https://doi.org/10.1080/01431160701281072>
- Esnaola-Gonzalez, I., Gómez-Omella, M., Ferreira, S., Fernandez, I., Lázaro, I., García, E., 2020. An IoT platform towards the enhancement of poultry production chains. *Sensors (Switzerland)* 20, 1–20. <https://doi.org/10.3390/s20061549>
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.* 45, RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Fernandes, P., Botelho, H., 2004. Analysis of the prescribed burning practice in the pine forest of northwestern Portugal. *J. Environ. Manage.* <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2003.10.001>
- Fernandes, P.M., 2015. Empirical support for the use of prescribed burning as a fuel treatment. *Curr. For. Reports* 1, 118–127. <https://doi.org/10.1007/s40725-015-0010-z>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Haralick, R.M., 1979. Statistical and structural approaches to texture. *Proc. IEEE.* <https://doi.org/10.1109/PROC.1979.11328>
- Imperatore, P., Azar, R., Calò, F., Stroppiana, D., Brivio, P.A., Lanari, R., Pepe, A., 2017. Effect of the Vegetation Fire on Backscattering: An Investigation Based on Sentinel-1 Observations. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 10, 4478–4492. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2717039>
- Mallinis, G., Mitsopoulos, I., Chrysafi, I., 2018. Evaluating and comparing sentinel 2A and landsat-8 operational land imager (OLI) spectral indices for estimating fire severity in a mediterranean pine ecosystem of Greece. *GIScience Remote Sens.* 55, 1–18. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1354803>
- Oliveira, S., Félix, F., Nunes, A., Lourenço, L., Laneve, G., Sebastián-López, A., 2018. Mapping wildfire vulnerability in Mediterranean Europe. Testing a stepwise approach for operational purposes. *J. Environ. Manage.* <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.003>
- Pereira, J.M.C., 1999. A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 37, 217–226. <https://doi.org/10.1109/36.739156>
- Perkins, P., Heber, S., 2018. Identification of Ribosome Pause Sites Using a Z-Score Based Peak Detection Algorithm. *IEEE Int. Conf. Comput. Adv. Bio Med. Sci. ICCABS 2018-October*, 4–9. <https://doi.org/10.1109/ICCABS.2018.8541902>
- Pipitone, C., 2017. Monitoraggio di opere strategiche mediante tecniche satellitari: il caso studio della diga “Castello sul fiume Magazzolo.” *Boll. della Soc. Ital. di Fotogramm. e Topogr.* 13–18.
- Small, D., 2011. Flattening gamma: Radiometric terrain correction for SAR imagery. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2120616>
- Stroppiana, D., Azar, R., Calò, F., Pepe, A., Imperatore, P., Boschetti, M., Silva, J., Brivio, P., Lanari, R., 2015. Integration of Optical and SAR Data for Burned Area Mapping in Mediterranean Regions. *Remote Sens.* 7, 1320–1345. <https://doi.org/10.3390/rs70201320>
- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B.Ö., Floury, N., Brown, M., Traver, I.N., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., Huchler, M., Rostan, F., 2012. GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sens. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>
- Veraverbeke, S., Gitas, I., Katagis, T., Polychronaki, A., Somers, B., Goossens, R., 2012. Assessing post-fire vegetation recovery using red-near infrared vegetation indices: Accounting for background and vegetation variability. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 68, 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.12.007>

## APPENDICE

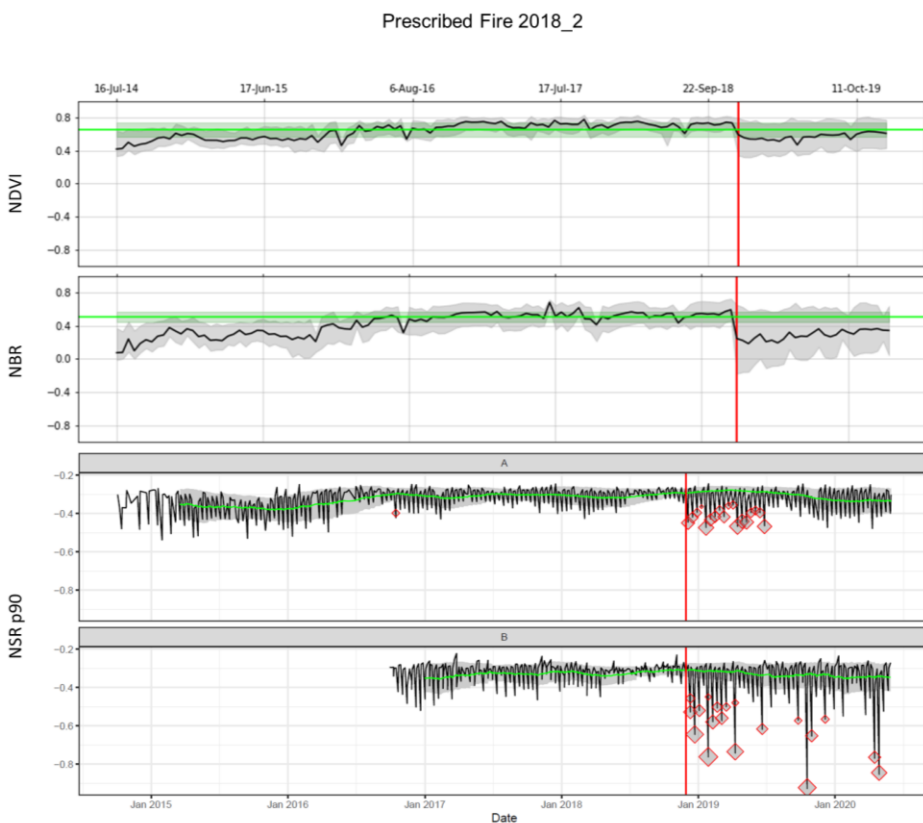
A1. In giallo le aree percorse da incendi spontanei, in rosso le aree percorse da fuochi prescritti.



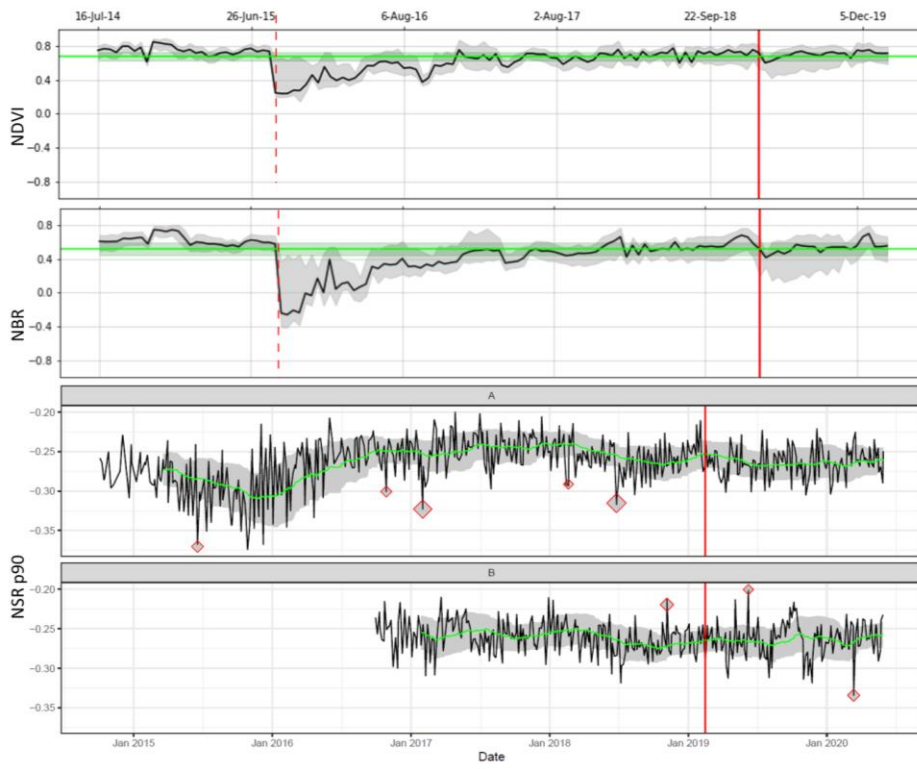
A2. Serie temporale dei valori dell'indice NBR da Landsat-8 su una delle aree – Sopra: senza buffer. Sotto: con contrazione del poligono mediante buffer interno di 30 m ai margini – è evidente la minore varianza. Le scale di colore indicano i vari percentili della distribuzione dei valori dentro l'area.



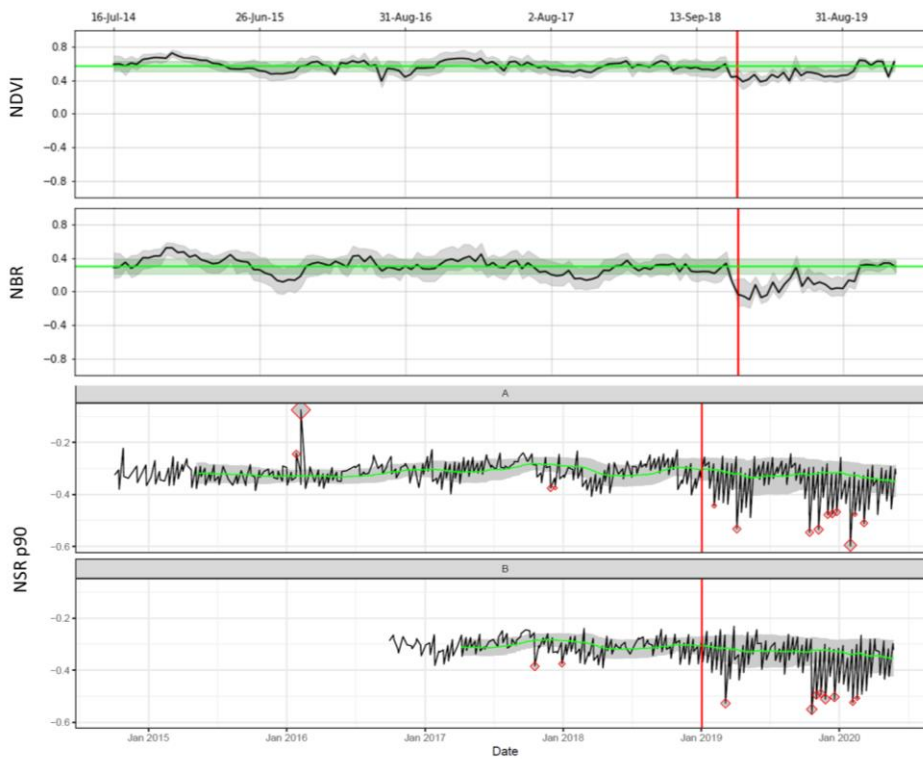
A3. Risultati del metodo Smoothed Z-Score con soglia 3 (sotto con 2 grafici divisi per satellite Sentinel-1 A e B) confrontato con indici da sensori ottici passivi (grafici NDVI e NBR sopra) – i rombi rossi sono i dati sopra soglia, la linea rossa corrisponde alla data dell'incendio. NB – le assi temporale dei dati ottici e SAR non sono allineati – fa riferimento la linea verticale rossa. *Prescribed fires*=incendi prescritti, *Winter wildfires*=incendi autunno-invernali, *Summer wildfires*=incendi estivi.



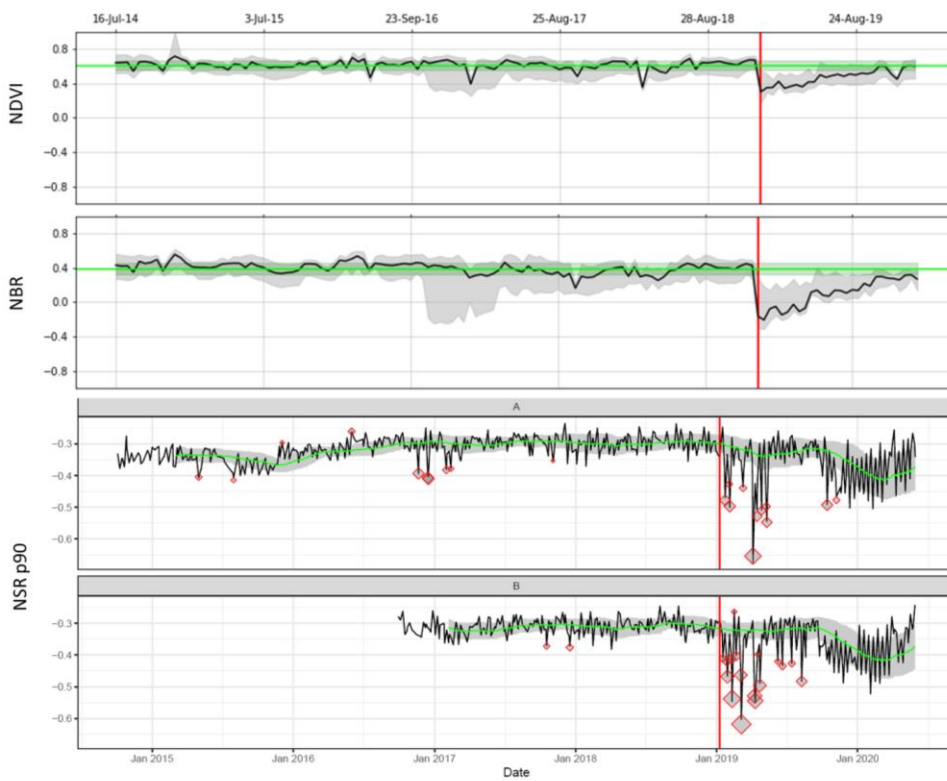
### Prescribed Fire 2019\_6



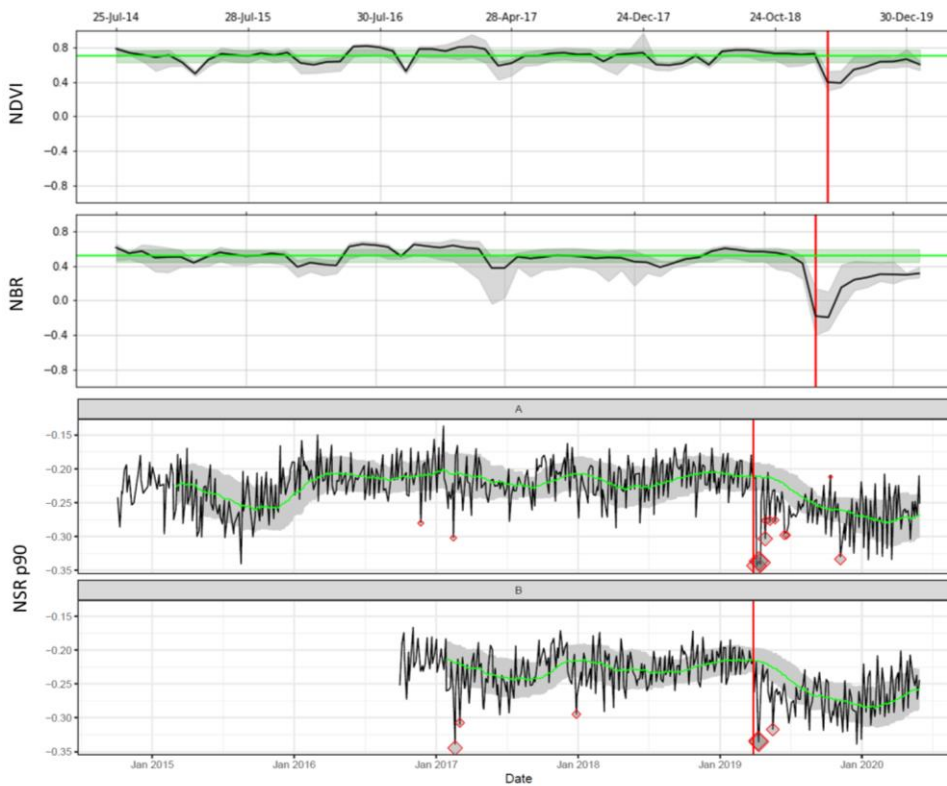
### Prescribed Fire 2019\_8



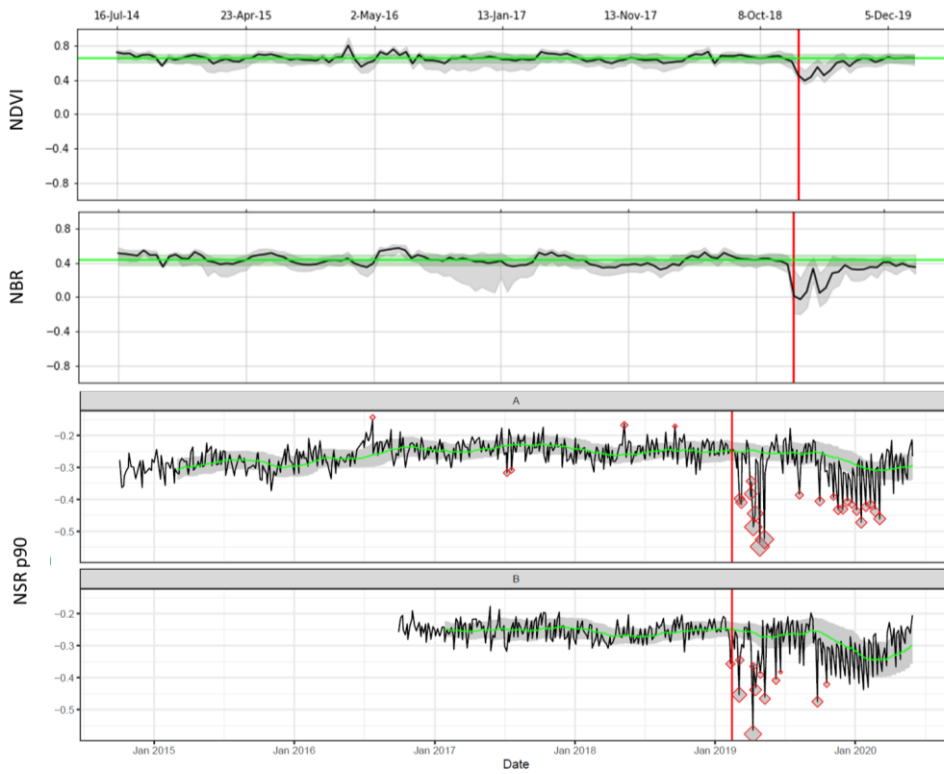
### Prescribed Fire 2019\_11



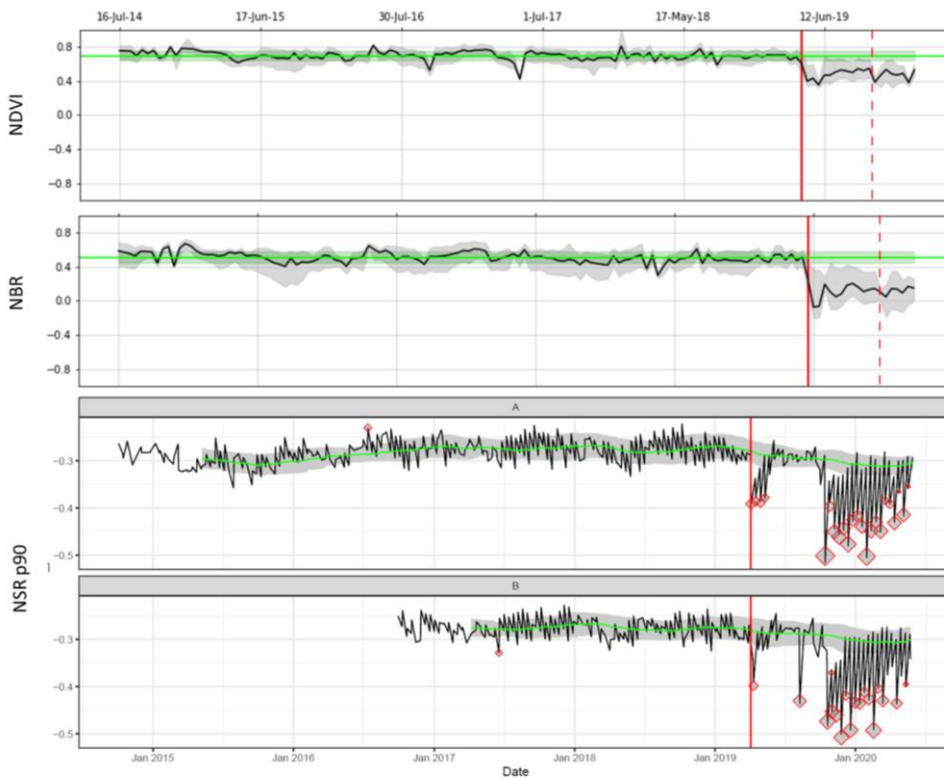
### Prescribed Fires 2019\_12



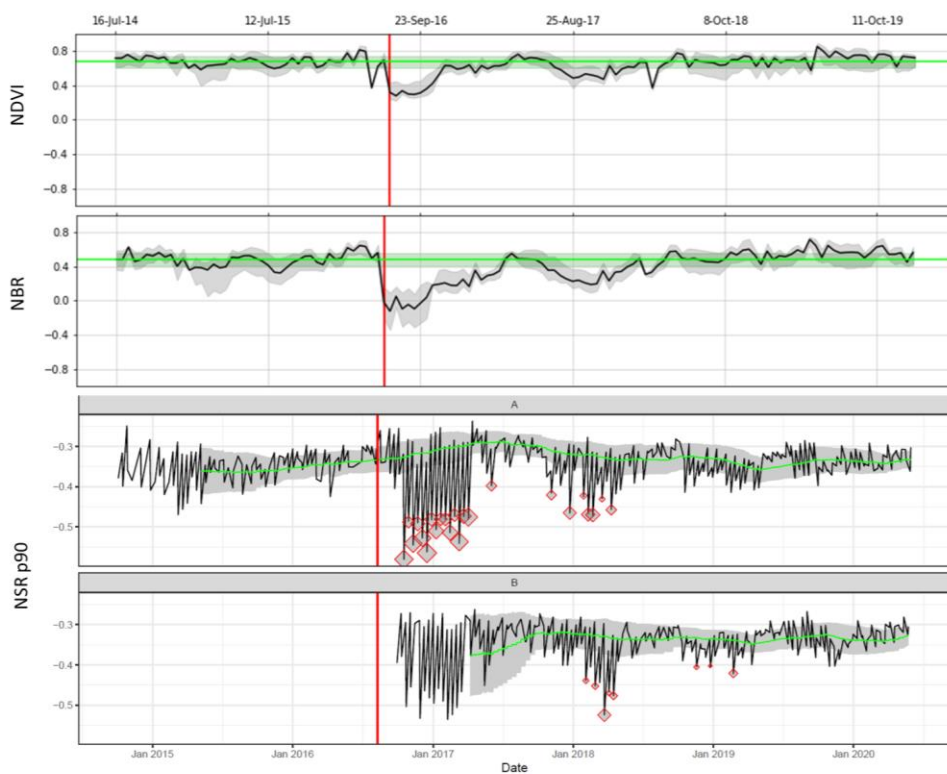
### Prescribed Fires 2019\_13



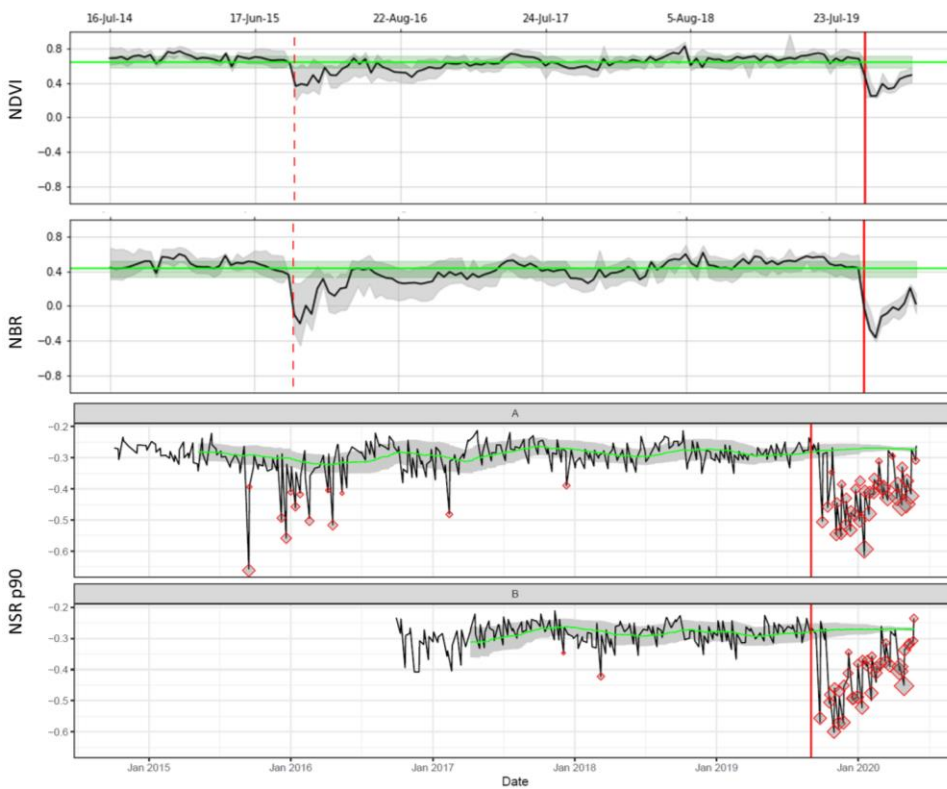
### Prescribed Fires 2019\_15



### Summer Wildfire 2016\_1



### Summer Wildfire 2019\_6





### Summer Wildfires 2019\_15



### Summer Wildfire 2019\_18



### Winter Wildfire 2018\_1



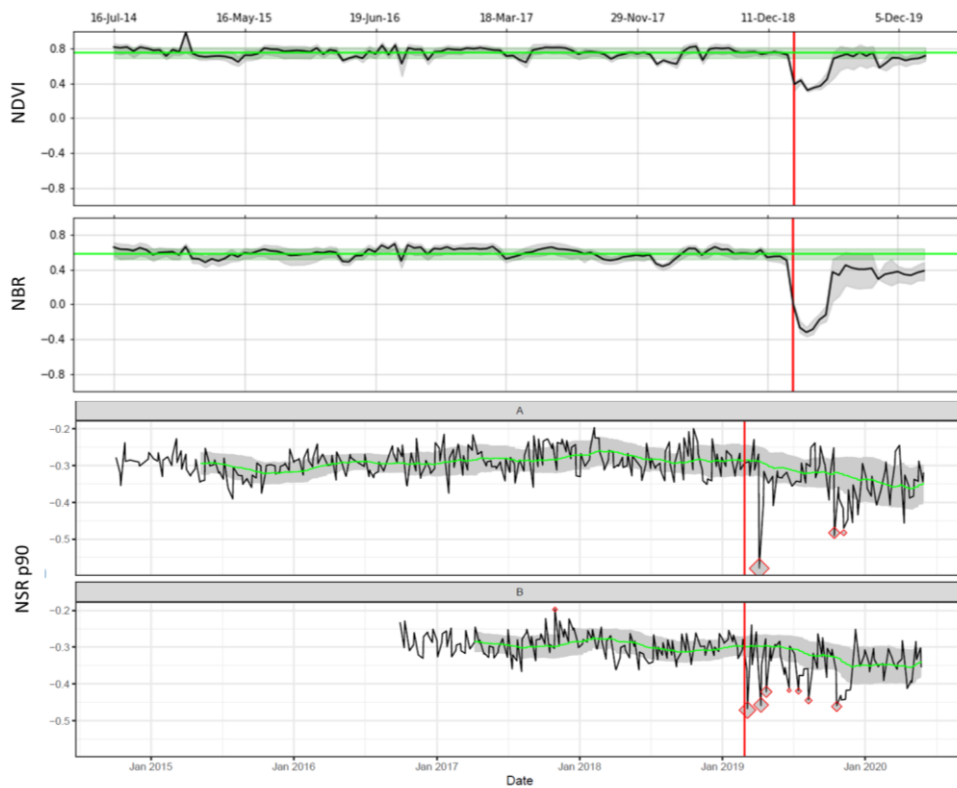
### Winter Wildfire 2018\_2



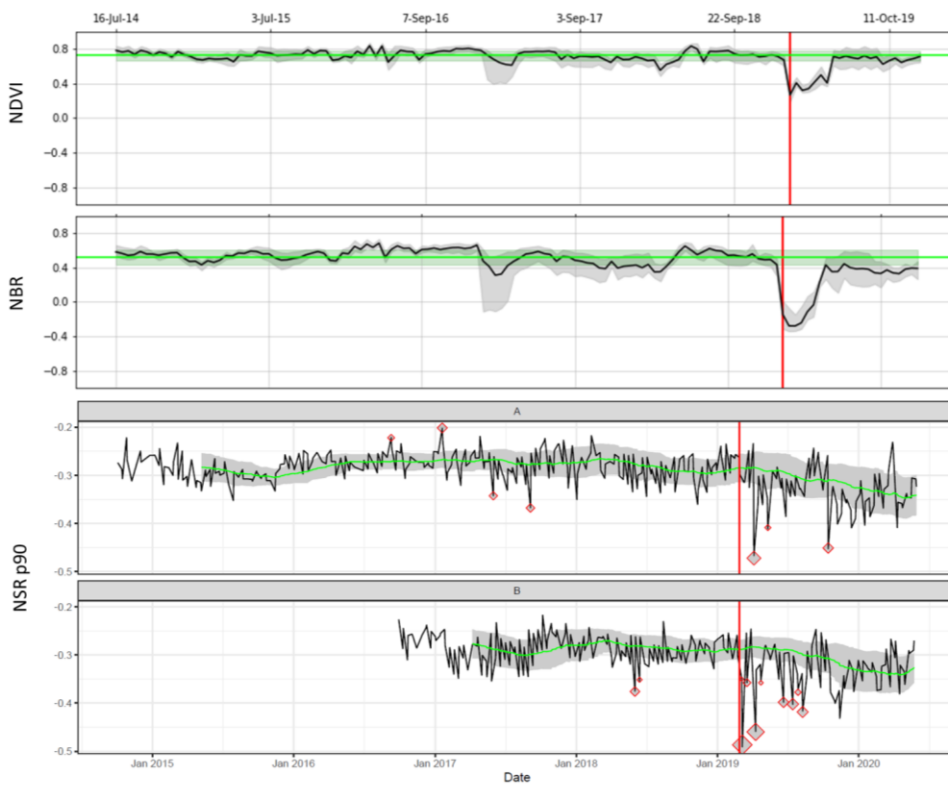
### Winter Wildfire 2019\_6



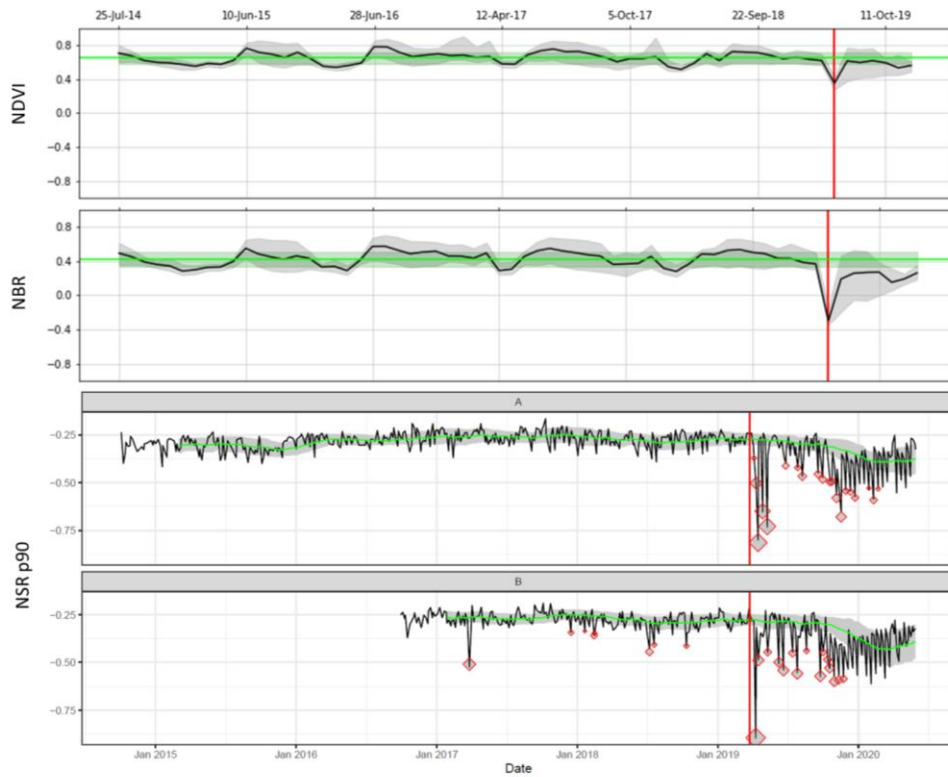
### Winter Wildfire 2019\_8



### Winter Wildfire 2019\_11



### Winter Wildfires 2019\_12



### Winter Wildfires 2019\_13

