



Burn Severity Map di aree colpite  
da incendio attraverso immagini  
satellitari

Radars and Remote Sensing

Stefano Hinic

**DISIM**

**Dipartimento di Ingegneria e Scienze dell'Informazione  
e Matematica**

**Via Vetoio, 67100 L'Aquila**

**<http://disim.univaq.it>**

Università degli Studi dell'Aquila

Palazzo Camponeschi

Piazza Santa Margherita 2, 67100 L'Aquila

**<http://www.univaq.it>**

# Abstract

---

L’obiettivo del presente lavoro è stato quello di individuare le aree percorse da incendio attraverso l’utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione. L’acquisizione dei dati e la mappatura delle aree incendiate sono state effettuate ricorrendo alle immagini satellitari Sentinel-2. L’indice utilizzato per individuare le aree interessate dal fuoco, e il grado di severità delle bruciature, è stato il Normalized Burn Ratio (NBR). Il lavoro è stato realizzato utilizzando Google Earth Engine (GEE), una potente piattaforma web che permette di elaborare in cloud i dati di Remote Sensing su larga scala. La modalità di utilizzo di GEE impiegata, è stata quella mediante Python API. Il codice realizzato è disponibile al seguente link.

Questo lavoro si compone di 3 capitoli ed è organizzato nel seguente modo: nel capitolo 1 sono riportate alcune nozioni teoriche ed è presentato l’environment di lavoro; nel capitolo 2 è introdotto il caso di studio, utilizzato per mostrare il modello realizzato e i risultati ottenuti; risultati che vengono mostrati e commentati nel capitolo 3; nel capitolo 4 sono invece riassunte le conclusioni.

# Indice

---

<b>Abstract</b>	<b>i</b>
<b>Indice</b>	<b>ii</b>
<b>Elenco delle figure</b>	<b>iv</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1 Copernicus e Sentinel-2 . . . . .	1
1.1.1 Sentinel-2 . . . . .	1
1.1.1.1 Dettagli tecnici . . . . .	2
1.2 Spettro di riflettività, NBR e differenced NBR (dNBR) . . . . .	3
1.2.1 Spettro di riflettività e NBR . . . . .	3
1.2.2 differenced NBR . . . . .	4
1.3 GEE . . . . .	5
1.3.1 Modalità di interazione con GEE . . . . .	5
1.3.2 geemap . . . . .	5
<b>2 Implementazione di un modello per la realizzazione di Burn Severity Map</b>	<b>8</b>
2.1 Modello implementato . . . . .	8
2.1.1 Selezionare l'Area of Interest . . . . .	9
2.1.2 Selezionare un time frame pre-incendio e post-incendio, per gli eventi del 2017 e del 2023 . . . . .	10
2.1.3 Eseguire un filtraggio per ottenere granuli meno nuvolosi . . . . .	10
2.1.4 Calcolo di una statistica di tutti i passaggi . . . . .	11
2.1.5 Calcolare l'NBR pre-incendio e post-incendio per gli eventi del 2017 e del 2023 . . . . .	11
2.1.6 Calcolare il dNBR per gli eventi del 2017 e del 2023, e per il periodo intercorso tra i due incendi . . . . .	11
2.1.7 Classificare i dNBR in classi di severità, con riferimento allo standard United States Geological Survey (USGS) . . . . .	12
2.1.8 Plottare e visualizzare i risultati ottenuti . . . . .	12
<b>3 Risultati</b>	<b>13</b>
3.1 Confronto immagini a colori pre e post-incendio . . . . .	13

3.2	Valutazione di estensione e severità delle bruciature causate dagli incendi del 2017 e del 2023 . . . . .	13
3.3	Ricrescita della vegetazione nel periodo intercorso tra i due incendi . . . . .	14
3.4	Confronto dei risultati . . . . .	16
3.5	Limiti del modello . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>19</b>
<b>A</b>	<b>Acronimi</b>	<b>20</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>21</b>

# Elenco delle figure

---

1.1	Bande spettrali dei sensori di Sentinel-2 (S2A e S2B) . . . . .	2
1.2	Risposta spettrale di vegetazione sana e di aree bruciate . . . . .	3
1.3	Tabella con livelli di severità di bruciature causate da incendi proposta dall'USGS ottenuti calcolando il dNBR . . . . .	4
1.4	GEE Code Editor . . . . .	6
1.5	GEE e geemap in Jupyter Notebook . . . . .	7
2.1	Incendio monte Morrone estate 2023 . . . . .	9
2.2	Area of Interest (AOI) . . . . .	10
3.1	Confronto immagini a colori pre e post-incendio 2017 . . . . .	14
3.2	dNBR classificato secondo USGS per gli incendi 2017 e 2023 . . . . .	15
3.3	dNBR classificato secondo USGS calcolato tra i due incendi . . . . .	16
3.4	Confronto dNBR classificato secondo USGS ottenuto con il modello e da [5] . . . . .	17
3.5	dNBR classificato secondo USGS per la Piana del Fucino . . . . .	18

# CAPITOLO 1

## Introduzione

---

In questo capitolo è descritta la missione Sentinel-2, sono presentate nozioni teoriche come spettro di riflettività e NBR e viene infine presentato GEE, le sue funzionalità principali e come integrarlo in un environment basato su Python.

### 1.1 Copernicus e Sentinel-2

Il Global Monitoring for Environment and Security (GMES) rinominato Copernicus, è un'iniziativa dell'European Space Agency (ESA) e della European Commission (EC) finalizzata a fornire la capacità all' European Union (EU) di agire autonomamente nel settore della sicurezza e dell'ambiente, tramite rilevazioni satellitari. Copernicus è la componente di osservazione della Terra del programma spaziale dell'EU, che osserva il nostro pianeta e il suo ambiente a beneficio di tutti i cittadini europei. Vaste quantità di dati globali collezionati da satelliti e da sistemi di misura a terra, aerei e marini forniscono informazioni di supporto ad autorità pubbliche, fornitori di servizi ed organizzazioni internazionali, per migliorare la qualità della vita dei cittadini europei e non solo. La disponibilità di questi dati è utile per studiare diversi fenomeni, tra cui: urbanizzazione, innalzamento del livello del mare, diminuzione dei ghiacci polari, monitoraggio atmosferico, disastri naturali e cambiamenti climatici. Questi servizi informativi sono accessibili liberamente e gratuitamente dagli utenti. Nell'ambito di questo programma, l'ESA ha sviluppato una famiglia di satelliti, chiamati Sentinel. Attualmente sono in orbita due costellazioni complete di due satelliti, Sentinel-2 e Sentinel-3, più altri due satelliti singoli, Sentinel-5P e Sentinel-6[2]. Ai fini del progetto, i dati utilizzati sono stati quelli raccolti nel contesto della missione Sentinel-2.

#### 1.1.1 Sentinel-2

La missione Sentinel-2 prevede l'acquisizione di immagini multispettrali ad alta risoluzione in orbita polare per il monitoraggio del territorio terrestre. Consiste in una costellazione composta da due satelliti: Sentinel-2A, lanciato il 23 giugno 2015 e Sentinel-2B lanciato il 7 marzo 2017. I dati raccolti e messi a disposizione risultano utili per applicazioni di monitoraggio della vegetazione, del suolo e della copertura idrica, dei corsi d'acqua interni e delle zone costiere[3].

### 1.1.1.1 Dettagli tecnici

I satelliti della missione Sentinel-2 hanno orbita polare ed eliosincrona, di altezza 786 km. Sono caratterizzati da uno swath di 290 km e da frequenza di rivisitazione all'equatore di 10 giorni. Di conseguenza la rivisitazione combinata della costellazione è di 5 giorni in condizioni cloud-free, e risulta pari 2-3 giorni a medie latitudini. Sentinel-2 fornisce una copertura sistematica delle superfici terrestri tra i 56° di latitudine Sud e gli 82,8° di latitudine Nord, delle acque costiere fino a 20 km dalla costa, delle isole con superficie superiore a 100  $km^2$  e di tutte le isole dell'EU, del Mar Mediterraneo e di tutti i mari chiusi. I satelliti della costellazione sono equipaggiati con un Multispectral Instrument (MSI) in grado di acquisire dati in 13 bande spettrali. L'MSI misura infatti la radianza riflessa terrestre nelle 13 bande descritte in figura 1.1, che vanno dal Visible

<b>Band Number</b>	<b>S2A</b>		<b>S2B</b>		<b>Spatial resolution (m)</b>
	<b>Central wavelength (nm)</b>	<b>Bandwidth (nm)</b>	<b>Central wavelength (nm)</b>	<b>Bandwidth (nm)</b>	
<b>1</b>	442.7	20	442.3	20	60
<b>2</b>	492.7	65	492.3	65	10
<b>3</b>	559.8	35	558.9	35	10
<b>4</b>	664.6	30	664.9	31	10
<b>5</b>	704.1	14	703.8	15	20
<b>6</b>	740.5	14	739.1	13	20
<b>7</b>	782.8	19	779.7	19	20
<b>8</b>	832.8	105	832.9	104	10
<b>8a</b>	864.7	21	864.0	21	20
<b>9</b>	945.1	19	943.2	20	60
<b>10</b>	1373.5	29	1376.9	29	60
<b>11</b>	1613.7	90	1610.4	94	20
<b>12</b>	2202.4	174	2185.7	184	20

**Figura 1.1:** Bande spettrali dei sensori di Sentinel-2 (S2A e S2B).

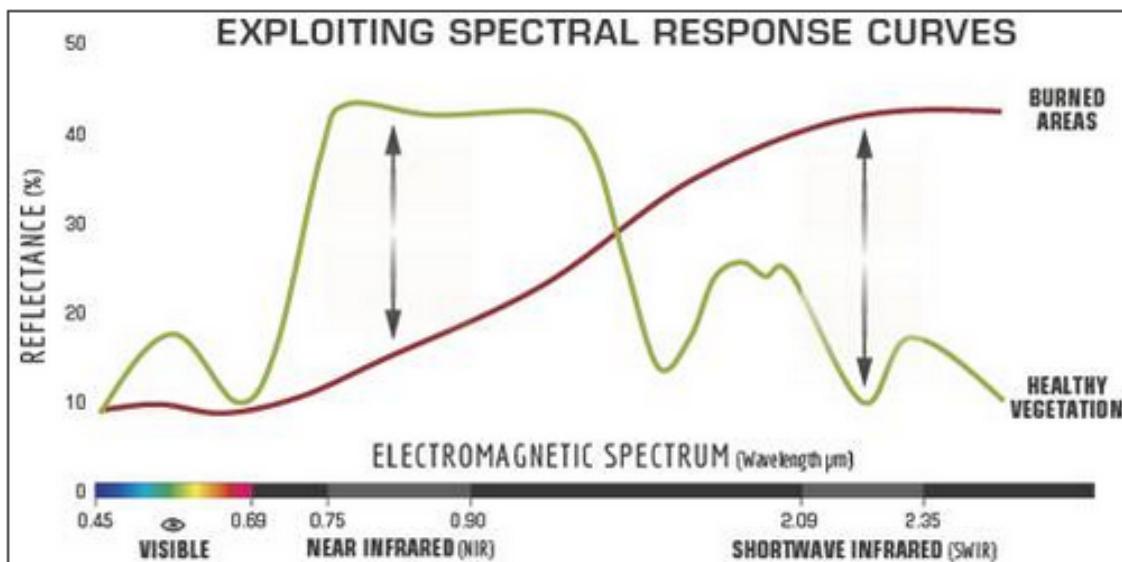
and Near-Infrared (VNIR) allo Short-Wave Infrared (SWIR). Dalla stessa figura si può notare che la risoluzione spaziale di Sentinel-2 dipende dalla particolare banda spettrale, ed è pari ad un valore di 10, 20 o 60 m. I dati raccolti da Sentinel-2 si possono trovare

in 5 livelli di processamento. Level-0 consiste in dati grezzi e compressi, e contiene le informazioni necessarie per generare i dati di tipo Level-1A, Level-1B, Level-1C e Level-2A. Mentre i primi tre non vengono rilasciati agli utenti, gli ultimi due sono accessibili. In particolare l'ultimo, utilizzato nel presente lavoro, fornisce la riflettanza di superficie ortorettificata e corretta atmosfericamente ed una mappa di classificazione che include vegetazione, deserti, nuvole, acqua, neve, ecc[4].

## 1.2 Spettro di riflettività, NBR e dNBR

### 1.2.1 Spettro di riflettività e NBR

Il Normalized Burn Ratio (NBR) è un indice progettato ed utilizzato per evidenziare le aree bruciate in zone colpite da incendi[9]. Si definisce in modo molto simile al modo in cui è definito il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), utilizzato per studiare il livello di vigoria della vegetazione, ma sfrutta le lunghezze d'onda del Near-Infrared (NIR) e dell'SWIR, al posto dell'NIR e del rosso. Guardando la figura 1.2 si osserva



**Figura 1.2:** Risposta spettrale di vegetazione sana e di aree bruciate.

come la vegetazione sana sia caratterizzata da una riflettanza molto alta nell'NIR e allo stesso tempo molto bassa nell'SWIR come mostrato. Si verifica invece l'opposto nelle aree devastate dagli incendi, in quanto tali aree bruciate di recente, mostrano una bassa riflettanza nell'NIR e un'alta riflettanza nell'SWIR. Grazie a questo ragionamento si può affermare che la differenza tra le risposte spettrali della vegetazione sana e delle aree bruciate, raggiunge il picco proprio nelle porzioni dello spettro dell'NIR e dell'SWIR. Per trarre vantaggio del diverso comportamento spettrale, l'NBR utilizza il rapporto tra

le bande dell’NIR e dell’SWIR, e risulta quindi naturale definire l’NBR come riportato nell’equazione 1.1.

$$NBR = (NIR - SWIR)/(NIR + SWIR) \quad (1.1)$$

Un valore di NBR elevato indica una vegetazione sana, mentre un valore basso indica terreno spoglio e aree bruciate di recente. Alle aree non bruciate vengono normalmente attribuiti valori prossimi allo zero.

## 1.2.2 differenced NBR

Per valutare la severità dell’incendio che ha interessato un’area, è utile ricorrere al dNBR. Per calcolarlo basta sottrarre l’NBR calcolato dopo l’incendio all’NBR calcolato prima dell’incendio, come riportato nell’equazione 1.2.

$$dNBR = PreFireNBR - PostFireNBR \quad (1.2)$$

Per comodità, spesso si preferisce lavorare con il dNBR scalato, ottenuto moltiplicando il dNBR per un fattore  $10^3$ . Quanto più è alto il valore del dNBR tanto più il danno provocato dall’incendio è significativo. Aree con valori negativi di dNBR possono invece indicare una ricrescita dopo l’incendio stesso. I valori di dNBR possono variare da caso a caso e quindi, quando possibile, l’interpretazione di questa grandezza in casi specifici, dovrebbe essere effettuata anche attraverso una valutazione sul campo, al fine di ottenere risultati più consistenti. Tuttavia, l’USGS ha proposto una tabella di classificazione per interpretare la severità delle bruciature, riportata in figura 1.3. Bisogna tener presente che anche cambiamenti non legati ad incendi possono essere rilevati come danni provocati da incendio. Tra gli esempi vi sono i cambiamenti nella vegetazione, la deforestazione e altri cambiamenti nella copertura del suolo.

Severity Level	dNBR Range (scaled by $10^3$ )	dNBR Range (not scaled)
Enhanced Regrowth, high (post-fire)	-500 to -251	-0.500 to -0.251
Enhanced Regrowth, low (post-fire)	-250 to -101	-0.250 to -0.101
Unburned	-100 to +99	-0.100 to +0.99
Low Severity	+100 to +269	+0.100 to +0.269
Moderate-low Severity	+270 to +439	+0.270 to +0.439
Moderate-high Severity	+440 to +659	+0.440 to +0.659
High Severity	+660 to +1300	+0.660 to +1.300

**Figura 1.3:** Tabella con livelli di severità di bruciature causate da incendi proposta dall’USGS ottenuti calcolando il dNBR.

## 1.3 GEE

Google Earth Engine GEE è una piattaforma di analisi geospaziale basata su tecnologia cloud computing, che consente agli utenti di visualizzare e analizzare immagini satellitari del nostro pianeta[7]. GEE viene utilizzato da ricercatori e organizzazioni non profit per condurre ricerche di telerilevamento e per molti altri scopi. Presenta un’interfaccia semplificata ed offre l’accesso ad un vasto insieme di dataset regionali e globali, disponibili nell’Earth Engine Data Catalog. Consente di visualizzare velocemente ed agevolmente i dati, aumentando o diminuendo lo zoom o fare una panoramica su qualsiasi luogo della Terra. Permette inoltre di regolare le impostazioni di visualizzazione e sovrapporre i dati in livelli per analizzare i cambiamenti nel tempo. Tutto questo senza il bisogno di dover scaricare GigaByte di dati in locale e potendo beneficiare della capacità di calcolo dei server di Google per elaborare una quantità di dati così elevata. Inoltre, per alcune categorie di utenti, tra cui organizzazioni non profit, agenzie governative, istituzioni accademiche e di ricerca, e per fini non commerciali, è prevista la possibilità di beneficiare di un piano di utilizzo gratuito.

### 1.3.1 Modalità di interazione con GEE

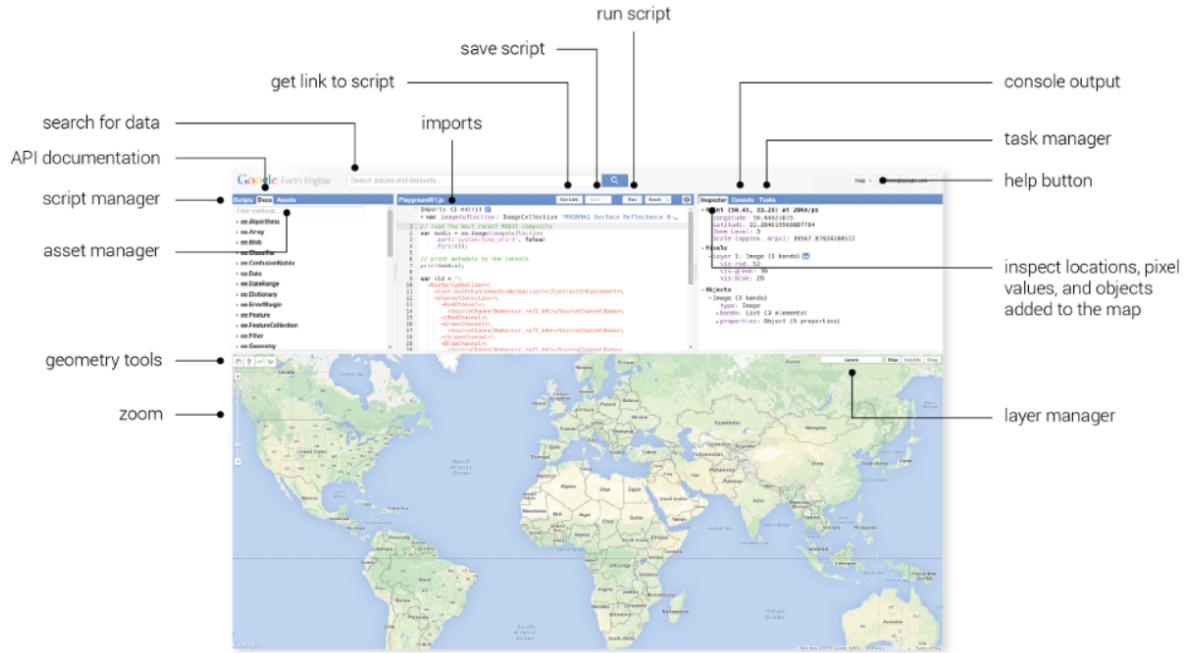
Esistono diversi modi per interagire con la piattaforma GEE tra cui Code Editor e librerie client[8]. Il primo è un IDE javascript e web-based, che permette di scrivere ed eseguire script. Le funzioni dell’Editor sono progettate per rendere facile e veloce lo sviluppo di progetti geospaziali complessi. La schermata mostrata e con cui si interagisce quando lo si utilizza, è quella riportata in figura 1.4, che mette in evidenza anche i principali elementi.

Le librerie client forniscono funzioni in JavaScript e Python per interagire con le API che GEE espone. È possibile utilizzarle per creare applicazioni custom e per sviluppare il codice di Earth Engine localmente, utilizzando un interprete JavaScript o Python. Rispetto alla documentazione completa dell’IDE interattivo di GEE in JavaScript, GEE Python API ha una documentazione relativamente poco dettagliata e funzionalità limitate per la visualizzazione interattiva dei risultati. Proprio per colmare questo gap, è stato realizzato il package Python geemap [6].

### 1.3.2 geemap

Geemap consente agli utenti di analizzare e visualizzare i dataset di Earth Engine in modo interattivo in un ambiente basato su Jupyter. Si può affermare che geemap è pensato per coloro che desiderano utilizzare l’ecosistema Python, i suoi tool e le sue librerie, per interagire con GEE. Tra le diverse funzionalità offerte ci sono:

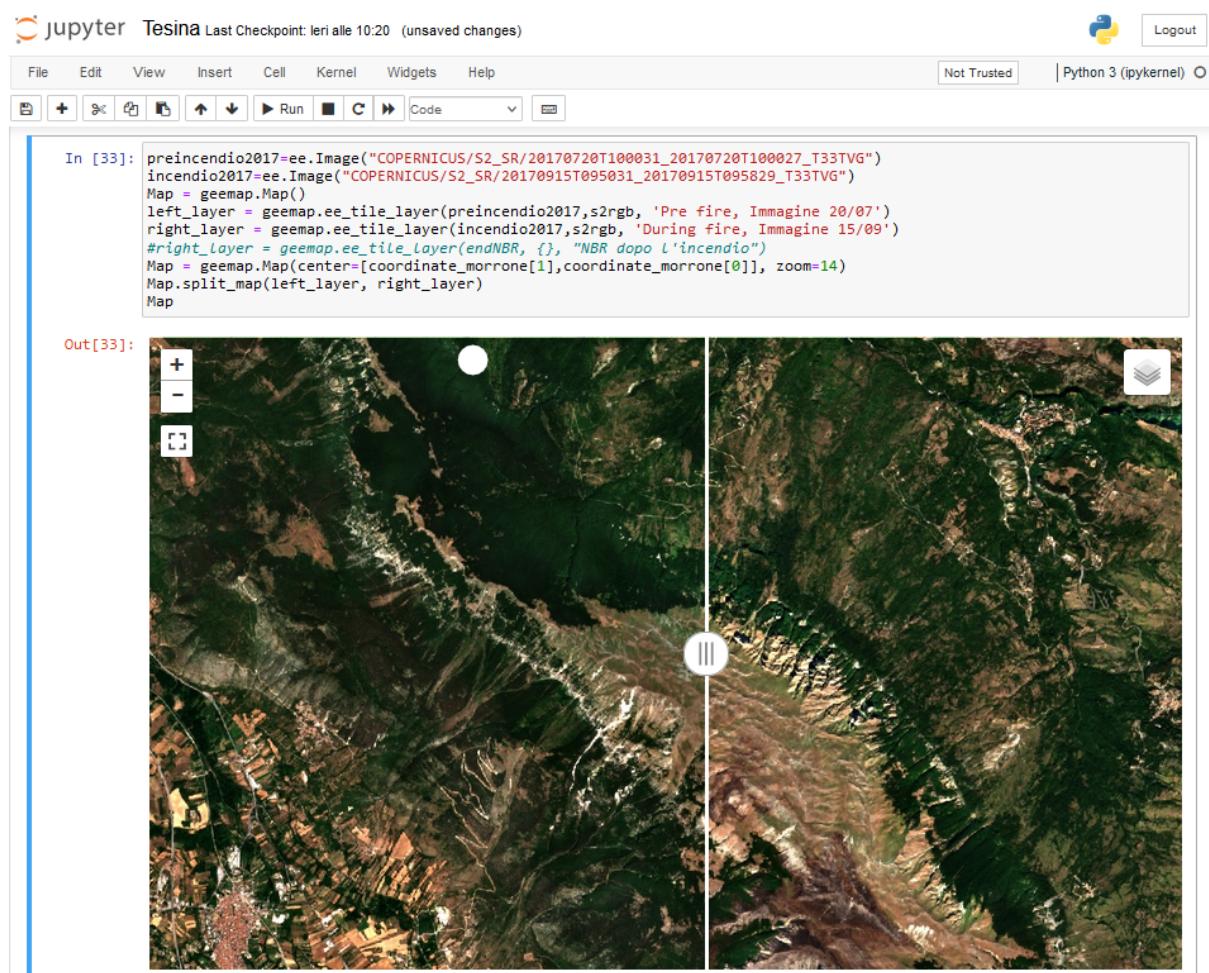
- Recupero dei dati di Earth Engine in modo interattivo
- Plot interattivo dei dati di Earth Engine con un semplice clic sulla mappa



**Figura 1.4:** GEE Code Editor.

- Utilizzo di drawing tools per interagire con i dati di Earth Engine
- Calcolo di statistiche territoriali
- Classificazione di immagini e valutazione dell'accuratezza

In figura 1.5, è riportata la cattura di un frammento di un Jupyter-Notebook, in cui si può osservare l'ambiente di sviluppo e le sue principali funzionalità, alcune righe di codice Python e il relativo output interattivo.



**Figura 1.5:** GEE e geemap in Jupyter Notebook.

# CAPITOLO 2

## Implementazione di un modello per la realizzazione di Burn Severity Map

---

Al giorno d'oggi, grazie alla disponibilità di immagini satellitari ad alta risoluzione, è possibile mappare e monitorare gli incendi con un dettaglio molto maggiore rispetto a quanto fatto in passato. In particolare la costellazione di satelliti Sentinel-2, offre una serie di informazioni utili al monitoraggio delle risorse terrestri, e permette di studiare anche disastri naturali come gli incendi. Come anticipato nell'abstract, l'obiettivo del presente lavoro è stato quello di individuare le aree percorse da incendio attraverso l'utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione, caratterizzando anche la severità dell'evento. Tali informazioni risultano utili per fornire indicazioni gestionali per la prevenzione degli incendi, ma anche per programmare attività di monitoraggio ed interventi di ripristino o di messa in sicurezza. I dati presi in esame riguardano due incendi che si sono verificati nell'estate del 2017 e nella scorsa estate del 2023, che hanno interessato il Parco Nazionale della Majella. L'area attraversata dal fuoco si colloca prevalentemente sul versante occidentale del Monte Morrone, nei comuni di Sulmona, Pratola Peligna, Roccacasale, Pacentro e Caramanico Terme. Nel primo incendio sono andati in fumo più di 1000 ettari[10], mentre nel più recente più di 500 ettari[1]. La figura 2.1 ritrae l'incendio avvenuto nell'estate 2023, ed è riportata per dare un'idea della gravità e dell'estensione dell'evento. Si è deciso di prendere in esame questa calamità in quanto si tratta di un evento molto esteso, e potendo contare sulla disponibilità di dati tra due fenomeni abbastanza ravvicinati e riguardanti grossomodo la stessa area, ha permesso di mettere a confronto non solo la severità degli incendi che hanno colpito la regione, ma, utilizzando la stessa metrica, il dNBR, è stato possibile osservare anche il processo di ricrescita avvenuto tra i due eventi.

### 2.1 Modello implementato

Il modello implementato può essere riassunto nei seguenti step:

1. Selezionare l'AOI

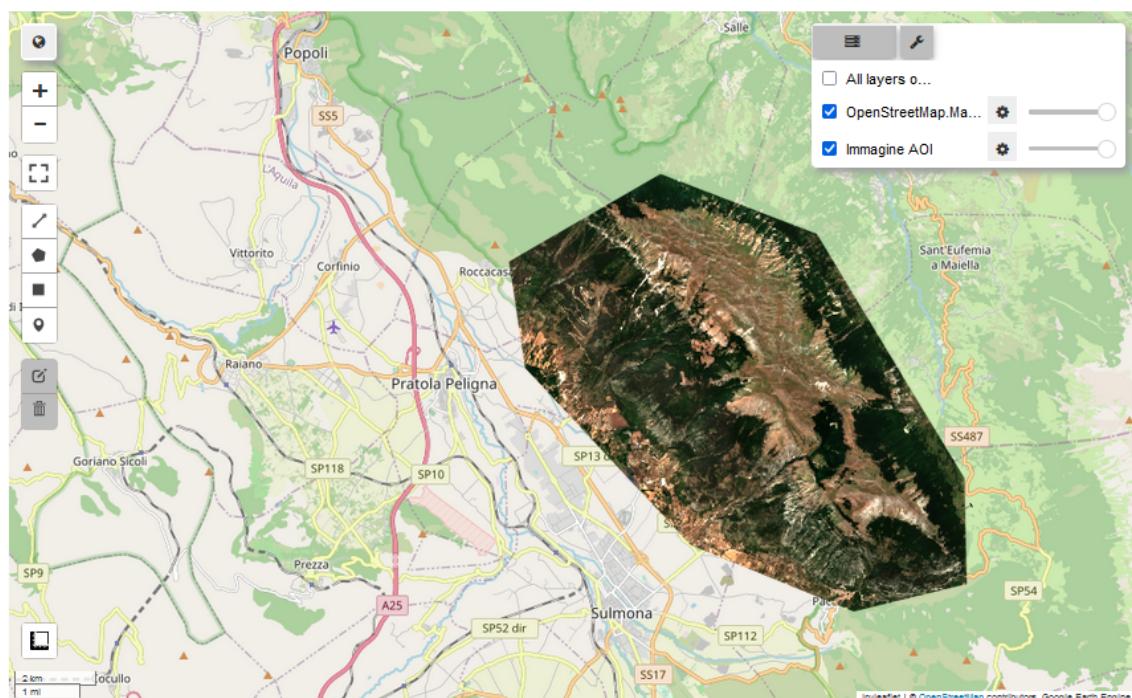


**Figura 2.1:** Incendio monte Morrone estate 2023.

2. Selezionare un time frame pre-incendio e post-incendio, per gli eventi del 2017 e del 2023
3. Eseguire un filtraggio per ottenere granuli meno nuvolosi
4. Calcolo di una statistica di tutti i passaggi (come mediana o media)
5. Calcolare il NBR pre-incendio e post-incendio per gli eventi del 2017 e del 2023
6. Calcolare il dNBR per gli eventi del 2017 e del 2023, e per il periodo intercorso tra i due incendi
7. Classificare i dNBR in classi di severità, con riferimento allo standard USGS
8. Plottare e visualizzare i risultati ottenuti

### 2.1.1 Selezionare l'Area of Interest

L'AOI, mostrata in figura 2.2, è stata definita attraverso un poligono composto da otto lati, che racchiudesse l'area interessata dall'incendio. Per definire tale poligono, è stato sufficiente indicare le coordinate dei suoi otto vertici. Tali coordinate sono state ottenute grazie all'utilizzo dei Drawing Tools, ma per poter poi rieseguire simulazioni e test esattamente sulla stessa AOI, si è preferito definire direttamente il poligono descritto dalle stesse, senza dover ogni volta ridisegnarlo.



**Figura 2.2:** AOI.

### 2.1.2 Selezionare un time frame pre-incendio e post-incendio, per gli eventi del 2017 e del 2023

Il motivo per cui si considera un time frame per il periodo pre-incendio, e per quello post-incendio, è perché si è preferito lavorare con una statistica dei diversi dati raccolti dal satellite, al posto di un unico granulo. Tali intervalli sono stati scelti di una durata di circa un mese per entrambi gli eventi in accordo con le date in cui gli incendi sono stati attivi. Più nello specifico per i periodi pre e post-incendio del 2017 sono stati selezionati gli intervalli 20/07/2017-18/08/2017 e 02/09/2017-30/09/2017, rispettivamente. Per l'evento del 2023 i periodi pre e post-incendio selezionati sono 01/07/2023-24/07/2023 e 01/08/2023-30/08/2023, rispettivamente.

### 2.1.3 Eseguire un filtraggio per ottenere granuli meno nuvolosi

Avendo selezionato nello step precedente intervalli sufficientemente lunghi, è stato possibile filtrare e successivamente utilizzare, solo i granuli con una percentuale di pixel nuvolosi, inferiore all'1%. Per farlo è stato eseguito un check sul campo '*CLOUDY\_PIXEL\_PERCENTAGE*' dei metadati del granulo.

## 2.1.4 Calcolo di una statistica di tutti i passaggi

Come già anticipato nel paragrafo 2.1.2, si è preferito lavorare con una statistica dei diversi dati raccolti dal satellite, al posto di un unico granulo. La statistica utilizzata è stata la mediana, ma si sarebbe potuto optare anche per altre scelte, come ad esempio la media. La trattazione seguente sarebbe stata del tutto analoga anche se si fosse deciso di lavorare con un singolo granulo pre-incendio e un altro post-incendio, prediligendo magari quello con percentuale minima di pixel nuvolosi e non troppo distante temporalmente dal momento dell'incendio.

## 2.1.5 Calcolare l’NBR pre-incendio e post-incendio per gli eventi del 2017 e del 2023

In questo step, sono stati calcolati i NBR pre-incendio e post-incendio per gli eventi del 2017 e del 2023 e per farlo è stata utilizzata la formula 1.1. Avendo optato in questo lavoro per i dati della missione Sentinel-2 con livello di processamento Level-2A, si è fatto uso dei valori di riflettanza nelle bande spettrali B8 e B12 tra quelle acquisite dall’MSI, per la porzione dell’NIR e dell’SWIR, rispettivamente. In seguito a questa precisazione, nel caso specifico della piattaforma Sentinel-2, la formula 1.1 per il calcolo dell’NBR, può essere riscritta come riportato in 2.1,

$$NBR = (B8 - B12)/(B8 + B12) \quad (2.1)$$

in cui  $B_n$  indica il valore della riflettanza misurato nella banda  $B_n$ .

## 2.1.6 Calcolare il dNBR per gli eventi del 2017 e del 2023, e per il periodo intercorso tra i due incendi

Potendo contare sui valori di NBR pre e post-incendio calcolati nello step precedente, si è proceduto al calcolo dei dNBR non solo per gli eventi del 2017 e del 2023, ma anche per il periodo intercorso tra i due incendi. La formula utilizzata è la 1.2. Grazie a questa grandezza è stato possibile comprendere quali aree sono state bruciate dagli incendi e con che grado di severità. Al tempo stesso questo indice ha permesso di studiare anche l’effetto opposto, ovvero quello della ricrescita di vegetazione nelle aree precedentemente devastate dalle fiamme, nel periodo tra il primo e il secondo incendio. Per questa ultima applicazione la formula 1.2 è stata sostituita con la formula 2.2.

$$dNBR = PostFireNBR\_2017 - PreFireNBR\_2023 \quad (2.2)$$

### 2.1.7 Classificare i dNBR in classi di severità, con riferimento allo standard USGS

Per interpretare il plot del dNBR in modo più semplice ed intuitivo, si è fatto riferimento alla tabella di classificazione proposta dall'USGS già mostrata in figura 1.3. Grazie ad essa si riescono a distinguere agevolmente i diversi gradi di severità delle bruciature o il tasso di ricrescita della vegetazione, rispetto al caso di grayscale, ad esempio.

### 2.1.8 Plottare e visualizzare i risultati ottenuti

L'ultima sezione del codice è dedicata al plot e alla visualizzazione dei risultati ottenuti. In particolare sono mostrati le immagini a colori (ottenute combinando le bande Red Green Blue (RGB), nello specifico le bande B4, B3 e B2 dell'MSI), i valori di NBR in scala di grigi e dei dNBR sia in grayscale che secondo lo standard USGS per l'AOI. Per concludere, viene mostrata un'applicazione del codice sviluppato, su un'AOI diversa, la Piana del Fucino. Questo ultimo esempio permetterà di comprendere le limitazioni del modello realizzato e le accortezze che richiede.

# CAPITOLO 3

# Risultati

---

In questo capitolo sono riportati e commentati i risultati ottenuti con il modello implementato. Possono essere elencati in:

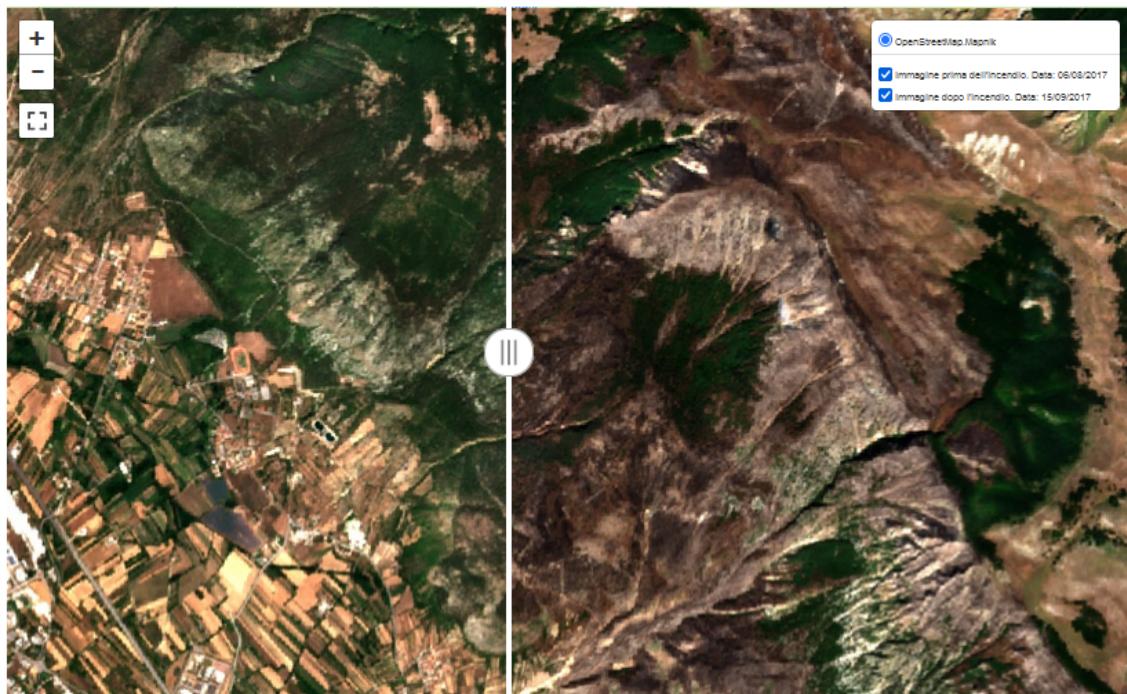
- Confronto immagini a colori pre e post-incendio
- Valutazione di estensione e severità delle bruciature causate dagli incendi del 2017 e del 2023
- Ricrescita della vegetazione nel periodo intercorso tra i due incendi
- Confronto dei risultati
- Limiti del modello

## 3.1 Confronto immagini a colori pre e post-incendio

La figura 3.1 mostra alla sinistra del separatore verticale mobile l'immagine a colori pre-incendio 2017, mentre alla sua destra, l'immagine sempre a colori post-incendio 2017. Grazie alle librerie Python ee e geemap, è stato possibile ottenere con poche righe di codice tali immagini, in cui si possono confrontare agilmente le condizioni del terreno prima e dopo l'incendio, e da cui già si possono evincere i danni provocati dalle fiamme. Nell'immagine sulla destra si possono osservare aree di colore molto scuro, tendente al nero, non presenti nell'immagine sulla sinistra, in cui le tonalità sono più vicine al verde, come ci si aspetterebbe in presenza di vegetazione. Queste aree rappresentano proprio una firma dell'incendio avvenuto.

## 3.2 Valutazione di estensione e severità delle bruciature causate dagli incendi del 2017 e del 2023

La seconda firma dell'incendio, è stata ottenuta come già anticipato attraverso il dNBR, che non solo ha permesso di comprendere l'estensione dell'evento, ma anche la

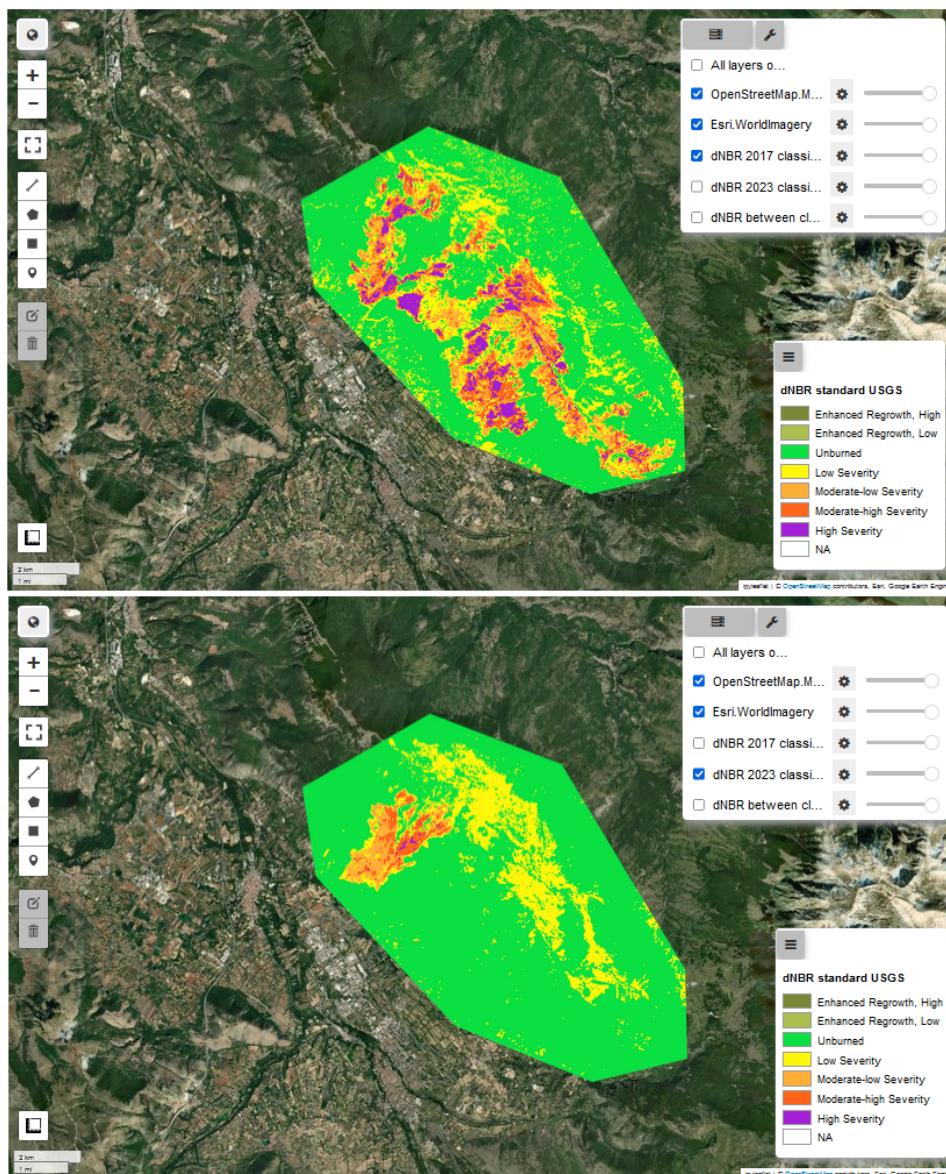


**Figura 3.1:** Confronto immagini a colori pre e post-incendio 2017.

severità dello stesso. Quest'ultimo aspetto in modo semplificato grazie alla classificazione proposta dall'USGS. In figura 3.2 sono mostrati i plot del dNBR per l'incendio del 2017, in alto, e quello del 2023 in basso. Dal confronto di essi si evince come i danni provocati dal primo incendio siano stati molto più gravi rispetto a quelli dovuti al più recente. Si osserva infatti sia un'estensione maggiore della superficie incendiata, ma anche un numero maggiore di aree classificate come "High Severity" o "Moderate-high Severity". Questo dato è in linea con le notizie riportate dai giornali locali, che parlano di più di 1000 ettari[10] bruciati durante l'incendio del 2017 e più di 500 ettari[1] andati in fumo in seguito alle fiamme del 2023. Bisogna precisare che anche lievi cambiamenti nella vegetazione possono essere rilevati dall'algoritmo come bruciature di grado "Low Severity", motivo per cui questa classe deve essere trattata con particolare attenzione.

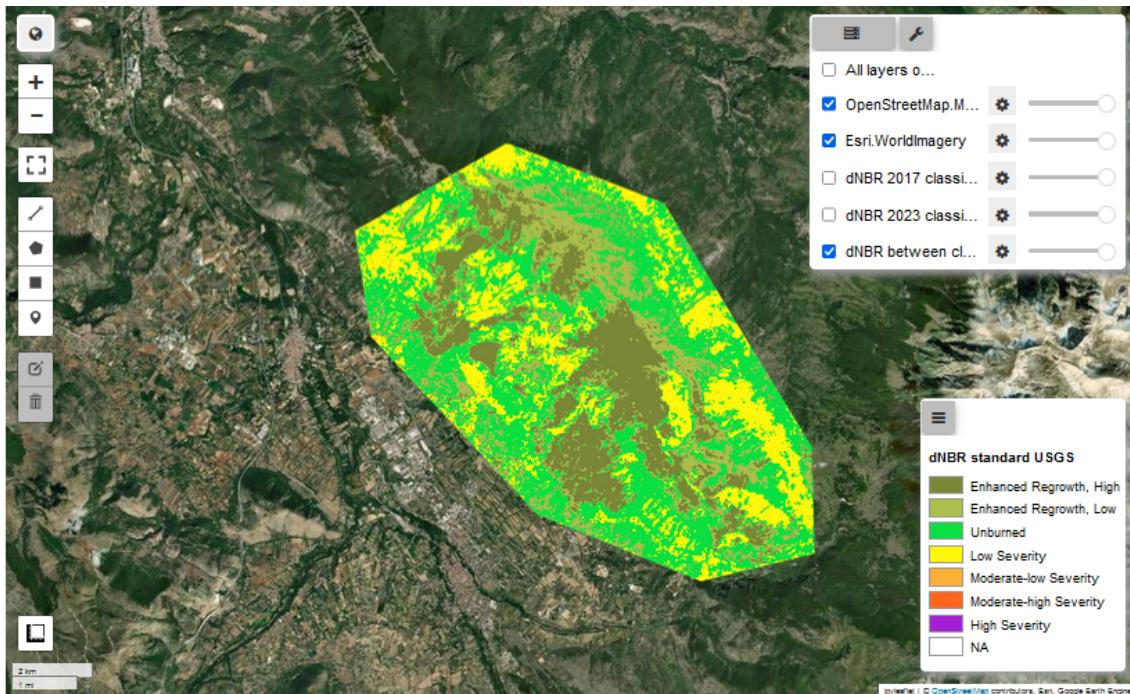
### 3.3 Ricrescita della vegetazione nel periodo intercorso tra i due incendi

Sebbene il dNBR sia l'indice preso in considerazione per studiare l'estensione e la severità delle bruciature causate dagli incendi, in questa sezione viene mostrato come possa essere utile anche per studiare il processo di ricrescita della vegetazione nelle aree precedentemente distrutte dalle fiamme. La figura 3.3 mette in risalto diverse aree segnate da un alto livello di ricrescita della vegetazione. Se si confronta la figura 3.3



**Figura 3.2:** dNBR classificato secondo USGS per gli incendi 2017 e 2023.

con il plot superiore della figura 3.2, si può osservare come le aree caratterizzate da un alto livello di ricrescita della vegetazione si sovrappongano quasi perfettamente alle aree che erano state colpite dalle fiamme del 2017. Questo risultato permette di affermare che nelle aree colpite dall’incendio del 2017, sia avvenuto un processo di ricrescita della vegetazione.



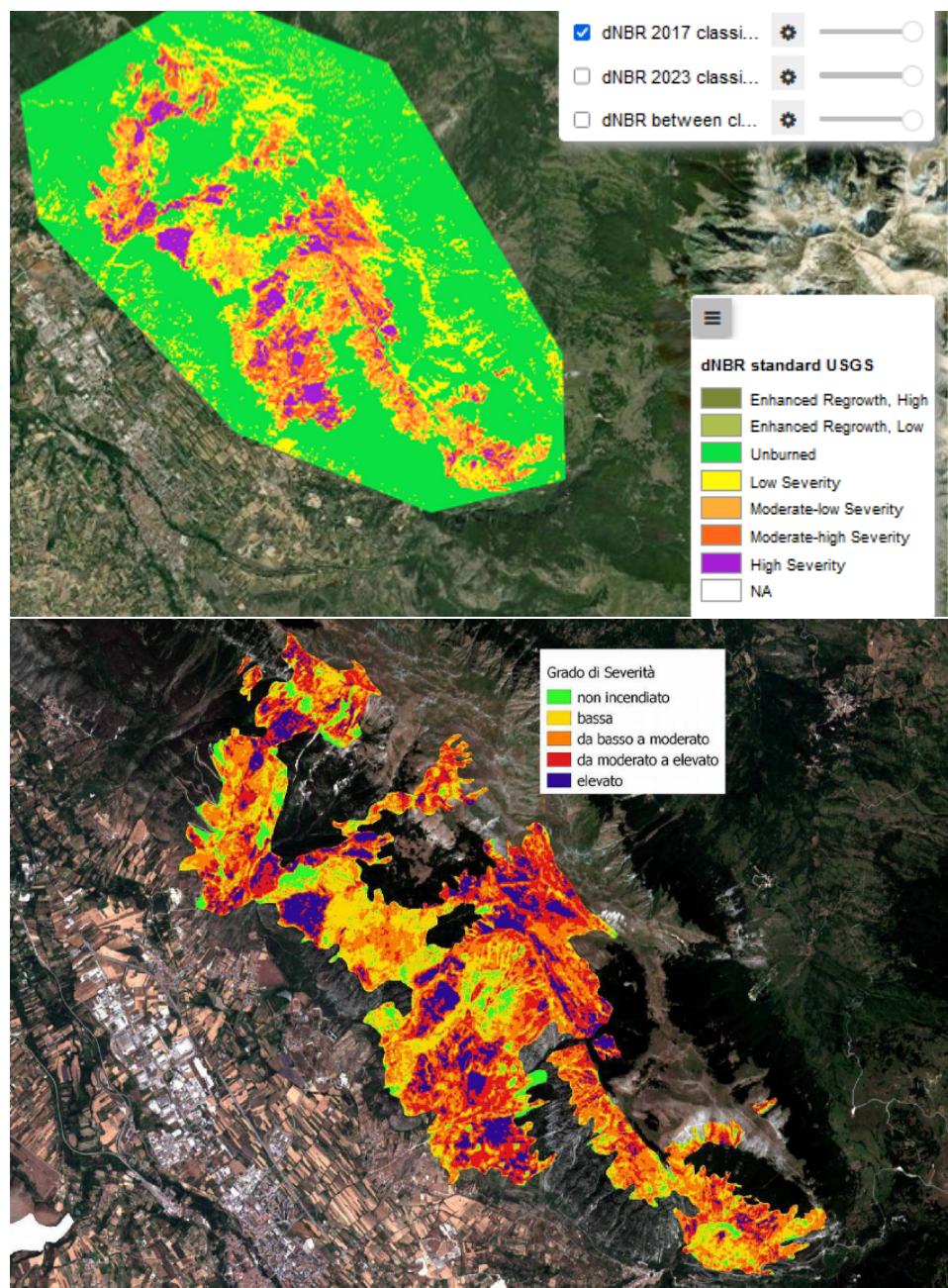
**Figura 3.3:** dNBR classificato secondo USGS calcolato tra i due incendi.

## 3.4 Confronto dei risultati

Per comprendere l'esattezza e l'accuratezza del modello, i risultati ottenuti per l'incendio del 2017 sono stati confrontati con quelli ottenuti in [5]. In figura 3.4 vengono accostati gli uni agli altri. Esaminandoli, sembrerebbe che i risultati ottenuti con il modello realizzato, siano in linea con quelli ottenuti in [5], confermandone così la validità.

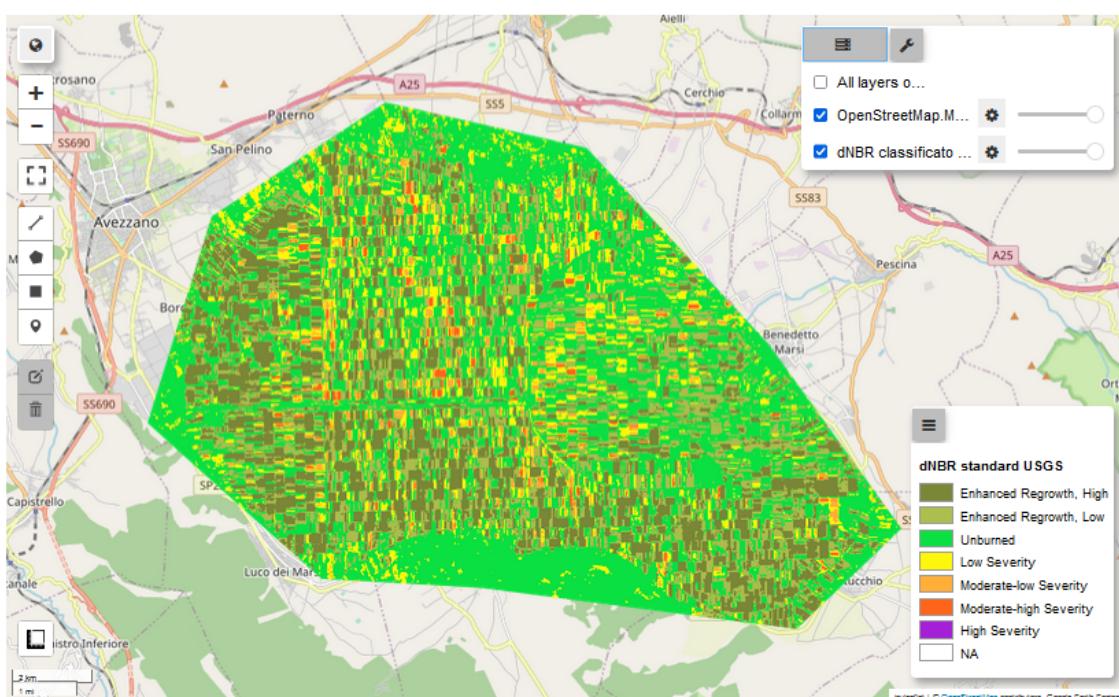
## 3.5 Limiti del modello

La figura 3.5 mostra i limiti dell'approccio seguito. Infatti, pur non essendoci stati incendi, l'algoritmo tramite classificazione del dNBR, ha classificato alcune aree come bruciate da incendio con grado di severità anche "Moderate-high Severity". Potremmo pensare a questo risultato come ad un falso positivo, in quanto l'AOI analizzata non è stata colpita da incendi. In figura si distinguono i diversi appezzamenti di terreni coltivati di forma perlopiù rettangolare, alcuni caratterizzati da una ricrescita della vegetazione, mentre altri da bruciature di severità anche elevate. Questo risultato mostra come anche cambiamenti della vegetazione, della copertura del suolo, o deforestazione, potrebbero essere rilevati dall'algoritmo come aree colpite da incendio, anche se così non è. Per ottenere risultati più consistenti sui danni causati dagli incendi, l'interpretazione del



**Figura 3.4:** Confronto dNBR classificato secondo USGS ottenuto con il modello e da [5].

dNBR andrebbe confrontata anche con una valutazione sul campo (dove possibile) o sfruttando informazioni aggiuntive sulle aree studiate.



**Figura 3.5:** dNBR classificato secondo USGS per la Piana del Fucino.

# CAPITOLO 4

## Conclusioni

---

In questo lavoro è stato proposto un metodo per individuare le aree colpite da incendio, e studiarne il grado di severità, attraverso l'utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione come quelle rese disponibili dalla missione Sentinel-2. Si è visto come gli indici NBR e dNBR siano risultati molto utili a tal proposito, mostrando però criticità nel caso di AOI caratterizzate da cambiamenti della vegetazione o della copertura del suolo, o da deforestazione. L'utilizzo di GEE, grazie al paradigma del Cloud Computing, ha reso possibile l'elaborazione di un'elevata quantità di dati satellitari senza criticità legate alla capacità computazionale del calcolatore su cui si è lavorato. Le GEE API e le librerie Python, hanno permesso di realizzare il modello lavorando in un ecosistema Python che potrebbe risultare più familiare ed intuitivo ad alcuni ricercatori, rispetto ad un environment JavaScript. Un possibile sviluppo futuro potrebbe essere un confronto dei risultati ottenuti, con quelli raccolti da enti forestali. In questo modo si potrebbe valutare l'accuratezza del modello sviluppato e al tempo stesso renderlo più completo integrando le informazioni sulla composizione del territorio.

# APPENDICE A

## Acronimi

---

**TR** Technical Report

**NBR** Normalized Burn Ratio

**dNBR** differenced NBR

**GEE** Google Earth Engine

**GMES** Global Monitoring for Environment and Security

**ESA** European Space Agency

**EC** European Commission

**EU** European Union

**MSI** Multispectral Instrument

**VNIR** Visible and Near-Infrared

**NIR** Near-Infrared

**SWIR** Short-Wave Infrared

**NDVI** Normalized Difference Vegetation Index

**USGS** United States Geological Survey

**AOI** Area of Interest

**RGB** Red Green Blue

# Bibliografia

---

- [1] AbruzzoWeb. *INCENDIO DIVORA IL MORRONE CARO A CELESTINO V, 500 ETTARI IN FUMO, IN AZIONE CANADAIR*. Available on line. URL: <https://abruzzoweb.it/le-fiamme-divorano-la-montagna-di-celestino-v-sul-morrone-in-azione-canadair/>.
- [2] ESA. *Europe's Copernicus programme*. Available on line. URL: [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Europe\\_s\\_Copernicus\\_programme](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Europe_s_Copernicus_programme).
- [3] ESA. *SENTINEL-2 MISSION GUIDE*. Available on line. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>.
- [4] ESA. *Sentinel-2 MSI User Guide*. Available on line. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>.
- [5] L Frate et al. «Analisi spaziale dell'incendio del Morrone nel Parco Nazionale della Majella mediante l'utilizzo di immagini satellitari». In: *Forest@ - Rivista di Selvicoltura ed Ecologia Forestale* 3 (2018), pagine 59–64. DOI: 10.3832/efor2775-015. eprint: <http://foresta.sisef.org/pdf/?id=efor2775-015>. URL: <http://foresta.sisef.org/contents/?id=efor2775-015>.
- [6] GEE. *A Python package for interactive geospatial analysis and visualization with Google Earth Engine*. Available on line. URL: <https://geemap.org/>.
- [7] GEE. *Google Earth Engine Platform*. Available on line. URL: <https://earthengine.google.com/platform/>.
- [8] GEE. *Introduzione a Google Earth Engine*. Available on line. URL: [https://www.google.com/intl/it\\_ALL/earth/outreach/learn/introduction-to-google-earth-engine/](https://www.google.com/intl/it_ALL/earth/outreach/learn/introduction-to-google-earth-engine/).
- [9] Jon Keeley. «Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage». In: *International Journal of Wildland Fire* 18 (gennaio 2009), pagine 116–126. DOI: 10.1071/WF07049.
- [10] rete5. *Il Morrone presenta il conto ad un anno dagli incendi*. Available on line. URL: <https://abruzzoweb.it/le-fiamme-divorano-la-montagna-di-celestino-v-sul-morrone-in-azione-canadair/>.