

DATABASE DI TELERILEVAMENTO

KARST FIREWALL 5.0

Adattamento innovativo al cambiamento climatico basato sugli ecosistemi nella regione del Carso. Promuovere una silvicoltura resistente agli incendi con il supporto di Industria 5.0

Inovativno ekosistemsko-zasnovano prilagajanje podnebnim spremembam na Krasu.
Spodbujanje požarno odporne gmajne s podporo industrije 5.0

INFORMAZIONI SUL PROGETTO / INFORMACIJE

Acronimo del progetto / Akronim projekta:	KARST FIREWALL 5.0
Titolo del progetto / Naslov projekta:	Adattamento innovativo al cambiamento climatico basato sugli ecosistemi nella regione del Carso. Promuovere una silvicoltura resistente agli incendi con il supporto dell'Industria 5.0 Inovativno ekosistemsko-zasnovano prilagajanje podnebnim spremembam na Krasu. Spodbujanje požarno odporne gmajne s podporo industrije 5.0
Area prioritaria / Prednostno področje:	Un'Europa più verde e a basse emissioni di carbonio, che si muove verso un'economia a zero emissioni di carbonio e resiliente Bolj zelena, nizkoogljikna Evropa, ki prehaja na gospodarstvo z ničelno stopnjo neto emisij ogljika in je odporna
Obiettivo specifico del programma / Specifični cilj programa:	SO4: Promuovere l'adattamento ai cambiamenti climatici, la prevenzione dei rischi di catastrofi e la resilienza, tenendo conto degli approcci ecosistemici. SO4: Spodbujanje prilagajanja podnebnim spremembam in preprečevanja tveganja nesreč ter odpornosti ob upoštevanju ekosistemskih pristopov
URL del sito web del progetto / URL spletne strani projekta:	www.ita-slo.eu/karst-firewall-50
Numero del documento / Številka dokumenta:	KFW50-D231
Titolo del documento / Naslov dokumenta:	Database di telerilevamento
Work Package:	2
Attività / Aktivnost:	3.1
Partner responsabili (autori) / Odgovorni partnerji (avtorji):	ZRC SAZU (Breg Valjavec, Mateja; Ciglič, Rok; Štut, Lenart; Geršič, Matjaž; Jakob, Aljaž) Infordata Sistemi (Petelin, Marko; Zidaric, Samuel; Zuccato, Nicola)
Luogo e data di pubblicazione / Kraj in datum objave:	26. 3. 2026

INDICE

1	INTRODUZIONE.....	4
2	RACCOLTA DI DATI SATELLITARI.....	4
2.1	ELENCO DELLE IMMAGINI SATELLITARI.....	4
2.2	ANALISI DELLE IMMAGINI SATELLITARI CON GOOGLE EARTH ENGINE.....	6
2.2.1	CALCOLO DEGLI INDICI	7
2.2.2	SELEZIONE DELLE IMMAGINI SATELLITARI	8
2.2.3	DETERMINAZIONE DELL'AREA DELL'INCENDIO	9
2.3	BANCA DATI E MAPPA DELLE AREE DEGLI INCENDI PASSATI.....	9
3	BANCA DATI DI IMMAGINI MULTISPETTRALI DA DRONI E NUVOLE DI PUNTI 3D ..	11
3.1	IMMAGINI MULTISPETTRALI CON DRONI	11
3.2	ARCHIVIAZIONE DEL DATABASE DELLE RILEVAZIONI CON DRONI	12
4	BANCA DATI DI TELERILEVAMENTO SULLA PIATTAFORMA KARST FIREWALL.....	18
4.1	PANORAMICA DELLA PIATTAFORMA	18
4.2	INTEGRAZIONE DEI DATI DI TELERILEVAMENTO	18
4.3	MAPPA INTERATTIVA 2D E VISUALIZZAZIONE DEI DATI.....	22
4.4	LIVELLO DI PREVISIONE DEL PERICOLO DI INCENDIO	23
4.5	INTEGRAZIONE CON IL MODELLO DI PREVISIONE DEL RISCHIO INCENDIO	25
4.5.1	PANORAMICA DEL MODELLO	25
4.5.2	PIPELINE OPERATIVA	26
4.6	ACCESSIBILITÀ E INTEROPERABILITÀ DEI DATI.....	27
5	RIFERIMENTI	28

1 INTRODUZIONE

La banca dati di telerilevamento comprende immagini satellitari, fotografie aeree RGB e multispettrali e nuvole di punti 3D. Alcuni dati saranno presentati sul portale Karst Firewall (A2.1.1), mentre altri saranno archiviati nel database. Il sistema fornirà supporto ai sistemi transfrontalieri congiunti per il rilevamento precoce degli incendi carsici e la gestione dell'escalation, nonché per il monitoraggio del ripristino della vegetazione naturale post-incendio. Le serie di dati più lunghe saranno utili anche per l'analisi e l'ottenimento di nuove informazioni, ad esempio nelle aree pilota.

2 RACCOLTA DI DATI SATELLITARI

I dati satellitari sono stati raccolti e utilizzati per l'intera area bruciata (incendio del 2022), mentre le immagini dei droni sono state ottenute (registrate) solo per le aree pilota all'interno dei comuni (per una presentazione più dettagliata, si veda il risultato D.2.3.2).

Il sistema di immagini satellitari si basa sui dati satellitari Sentinel del programma Copernicus dell'Agenzia Spaziale Europea. Abbiamo utilizzato una serie temporale di bande spettrali Sentinel-2, che ci consentono di rilevare le aree bruciate con una risoluzione spaziale fino a 20 m per aree estese. Abbiamo utilizzato Google Earth Engine, una piattaforma cloud open-source per l'elaborazione e l'analisi dei dati geospaziali, per acquisire ed elaborare i dati satellitari Sentinel-2. Per gli incendi più vecchi, abbiamo utilizzato immagini satellitari Landsat.

2.1 ELENCO DELLE IMMAGINI SATELLITARI

Nella prima fase dell'attività, ci siamo concentrati sulla compilazione di un elenco di immagini satellitari rilevanti che coprono l'area transfrontaliera di Kras, ovvero la parte slovena del comune di Miren-Kostanjevica e parte del comune di Komen, e la parte italiana del comune di Devin-Nabrežina. Le immagini satellitari che abbiamo selezionato soddisfano i seguenti criteri:

- immagini satellitari scattate prima dell'incendio
- immagini satellitari scattate dopo l'incendio (le prime disponibili)
- per il periodo coperto dalle immagini Sentinel, vengono selezionate queste ultime, mentre per i periodi precedenti vengono utilizzate immagini satellitari appropriate disponibili (ad es. Landsat) che consentono la mappatura degli incendi

Abbiamo ricevuto due serie di dati sugli incendi: una per Kras in Slovenia e una per il Friuli-Venezia Giulia. Entrambe le serie sono state filtrate in modo da mantenere solo gli incendi che interessavano i comuni rilevanti, ovvero Miren-Kostanjevica, Komen e Devin-Nabrežina. I dati Sentinel-2 hanno una risoluzione spaziale di 10 m (100 m² per pixel), mentre i dati Landsat hanno una risoluzione di 30 m (900 m² per pixel). Poiché un incendio deve coprire completamente almeno alcuni pixel contigui, abbiamo selezionato per l'ulteriore elaborazione solo gli incendi che erano già stati stimati in più di 0,5 ha (5000 m²). Una tabella contenente le date di inizio e fine dell'incendio, i dati di localizzazione, gli identificatori univoci (ID) e gli identificatori di origine degli incendi è stata esportata per un'ulteriore elaborazione. Le immagini satellitari sono disponibili sul portale Google Earth Engine e, se necessario, possono anche essere scaricate su un'unità locale (esterna). L'elenco si presenta sotto forma di tabella Excel, allegata al presente rapporto come PRILOGA1 (PRILOGA1.xls).

Seznam_satelitski_posnetki_požari_KarstFirewall5.0 - Excel

Orodja za tabelle Orodja za poizvedbe

Datoteka Osnovno Vstavljanje Postavitev strani Formule Podatki Pregled Ogled Pomoč Acrobat Power Pivot Načrt Poizvedba Povejte mi, kaj želite narediti

Prilepi Izreži Kopiraj Preslikovalnik oblik Odložilce

Calibri 11 A A

K L P

Pisava Poravnava

Število

Splošno

Pogojno oblikovanje Oblikuj kot tabelo Slogi celic Vstavi Izbrisi Oblika

Samodejno Zapolni Počisti

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Country	FID	id_orig	ID	after_scene_name	after_timestamp	before_scene_name	before_timestamp	idpozar
2	ITA	31	15725	ITA15725	L5_L2SP_191028_19900813_02_T1	13.08.1990 09:12	L5_L2SP_191028_19900728_02_T1	28.07.1990 09:12	15725
3	ITA	34	15728	ITA15728	L5_L2SP_191028_19900813_02_T1	13.08.1990 09:12	L5_L2SP_191028_19900728_02_T1	28.07.1990 09:12	15728
4	ITA	35	15547	ITA15547	L5_L2SP_191028_19900829_02_T1	29.08.1990 09:12	L5_L2SP_191028_19900712_02_T1	12.07.1990 09:12	15547
5	ITA	37	15550	ITA15550	L5_L2SP_191028_19900829_02_T1	29.08.1990 09:12	L5_L2SP_191028_19900813_02_T1	13.08.1990 09:12	15550
6	ITA	38	15549	ITA15549	L5_L2SP_191028_19900914_02_T1	14.09.1990 09:12	L5_L2SP_191028_19900712_02_T1	12.07.1990 09:12	15549
7	ITA	40	13990	ITA13990	L5_L2SP_191028_19910205_02_T1	5.02.1991 09:12	L5_L2SP_191028_19900829_02_T1	29.08.1990 09:12	13990
8	ITA	39	15551	ITA15551	L5_L2SP_191028_19910205_02_T1	5.02.1991 09:12	L5_L2SP_191028_19900829_02_T1	29.08.1990 09:12	15551
9	ITA	32	16488	ITA16488	L5_L2SP_191028_19930821_02_T1	21.08.1993 09:14	L5_L2SP_191028_19930805_02_T1	5.08.1993 09:14	16488
10	ITA	31	16487	ITA16487	L5_L2SP_191028_19930821_02_T1	21.08.1993 09:14	L5_L2SP_191028_19930805_02_T1	5.08.1993 09:14	16487
11	ITA	32	19868	ITA19868	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	L7_L2SP_191028_20120801_02_T1	1.08.2012 09:47	19868
12	ITA	35	19871	ITA19871	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	L7_L2SP_191028_20120801_02_T1	1.08.2012 09:47	19871
13	ITA	34	19881	ITA19881	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	L7_L2SP_191028_20120801_02_T1	1.08.2012 09:47	19881
14	ITA	37	19873	ITA19873	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	19873
15	ITA	38	19874	ITA19874	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	19874
16	ITA	40	19875	ITA19875	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	19875
17	ITA	41	19876	ITA19876	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	19876
18	ITA	42	19877	ITA19877	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	19877
19	ITA	43	19878	ITA19878	L7_L2SP_191028_20121121_02_T1	21.11.2012 09:48	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	19878
20	ITA	39	19962	ITA19962	L7_L2SP_191028_20121121_02_T1	21.11.2012 09:48	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	19962
21	ITA	45	20041	ITA20041	L7_L2SP_191028_20121121_02_T1	21.11.2012 09:48	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	20041
22	ITA	1	15999	ITA15999	L5_L2SP_191028_19900218_02_T1	18.02.1990 09:13	L5_L2SP_191028_19891130_02_T1	30.11.1989 09:16	15999
23	ITA	1	13991	ITA13991	L5_L2SP_191028_19910205_02_T1	5.02.1991 09:12			13991
24	ITA	1	15479	ITA15479	L5_L2SP_191028_19920412_02_T1	12.04.1992 09:16			15479
25	ITA	1	15522	ITA15522	L5_L2SP_191028_19930210_02_T1	10.02.1993 09:14	L5_L2SP_191028_19921224_02_T1	24.12.1992 09:13	15522
26	ITA	1	16490	ITA16490	L5_L2SP_191028_19940504_02_T1	4.05.1994 09:11			16490
27	ITA	1	14745	ITA14745	L5_L2SP_191028_19950131_02_T1	31.01.1995 09:04	L5_L2SP_190028_19950108_02_T1	8.01.1995 08:58	14745
28	ITA	1	16615	ITA16615	L5_L2SP_190028_19950430_02_T1	30.04.1995 08:54	L5_L2SP_191028_19950405_02_T1	5.04.1995 09:01	16615
29	ITA	1	14562	ITA14562	L5_L2SP_191028_19960407_02_T1	7.04.1996 09:01	L5_L2SP_191028_19951115_02_T1	15.11.1995 08:51	14562
30	ITA	1	16018	ITA16018	L5_L2SP_191028_19970410_02_T1	10.04.1997 09:19	L5_L2SP_191028_19970221_02_T1	21.02.1997 09:17	16018
31	ITA	1	15815	ITA15815	L5_L2SP_191028_19980328_02_T1	28.03.1998 09:28	L5_L2SP_191028_19971120_02_T1	20.11.1997 09:26	15815
32	ITA	1	14111	ITA14111	L5_L2SP_191028_19990227_02_T1	27.02.1999 09:31	L5_L2SP_191028_19981107_02_T1	7.11.1998 09:31	14111
33	ITA	1	15673	ITA15673	L7_L2SP_191028_20000121_02_T1	21.01.2000 09:44	L7_L2SP_191028_20000105_02_T1	5.01.2000 09:45	15673
34	ITA	1	15679	ITA15679	L7_L2SP_191028_20010413_02_T1	13.04.2001 09:42	L7_L2SP_191028_20001222_02_T1	22.12.2000 09:42	15679

Figura 1 - Panoramica del database delle immagini satellitari.

2.2 ANALISI DELLE IMMAGINI SATELLITARI CON GOOGLE EARTH ENGINE

L'obiettivo principale dell'analisi delle immagini satellitari era determinare la posizione esatta dell'incendio e valutare le condizioni della vegetazione dopo l'incendio. Sulla base dell'elenco delle immagini satellitari, abbiamo creato livelli vettoriali (poligoni) dell'area di ciascun sito di incendio e una tabella degli attributi, in cui a ciascun poligono sono assegnati i seguenti attributi: data dell'incendio, data dell'immagine, valutazione delle condizioni della vegetazione, area del sito di incendio. Gli identificatori dei poligoni sono allineati con quelli presenti nel database ZGS per la parte slovena dell'area studiata.

2.2.1 CALCOLO DEGLI INDICI

Abbiamo utilizzato tre indici per identificare le aree bruciate e i cambiamenti della vegetazione: BAIS2, BAI e NDVI. BAIS2 e BAI sono indici utilizzati per rilevare la combustione superficiale e sono sensibili al grado di annerimento delle aree bruciate.

BAI sta per *Burned Area Index* (Indice delle aree bruciate). La sua formula è (Chuvieco et. al. 2002):

$$BAI = \frac{1}{(0,1 + RED)^2 + (0,06 + NIR)^2}$$

RED e NIR sono i nomi delle bande sui sensori Landsat. La banda RED rileva la luce rossa nella gamma 640-670 nm, mentre la banda NIR rileva la luce nel vicino infrarosso nella gamma 850-880 nm.

BAIS2 sta per *Burned Area Index for Sentinel-2 (S2)*. La sua formula è (Filipponi 2018):

$$BAIS2 = \left(1 - \sqrt{\frac{B06 \cdot B07 \cdot B8A}{B4}} \right) \cdot \left(\frac{B12 - B8A}{\sqrt{B12 + B81}} + 1 \right)$$

Le variabili sono i valori delle bande del sensore Sentinel 2. B06, B07, B8A fanno parte dello spettro del vicino infrarosso, con rilevamento rispettivamente intorno a 740 nm, 783 nm e 865 nm, B04 è rosso, con rilevamento a 665 nm, e B12 è SWIR (infrarosso a onde corte) a 2190 nm. BAIS2 utilizza bande spettrali (in particolare, la parte NIR dello spettro è suddivisa in diverse bande) specifiche dei sensori Sentinel-2, quindi non è adatto alle immagini Landsat. L'abbreviazione NDVI sta per *indice di vegetazione normalizzato*. Si tratta di un indice semplice che è diventato lo standard per la valutazione delle condizioni della vegetazione. Si basa sull'assorbimento della clorofilla delle lunghezze d'onda rosse e sull'elevata riflettanza nella parte del vicino infrarosso dello spettro (Tucker 1979).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

2.2.2 SELEZIONE DELLE IMMAGINI SATELLITARI

Abbiamo dato la priorità alle immagini Sentinel-2 (S2) quando erano disponibili. Sentinel-2 ha iniziato a acquisire immagini nel marzo 2015, ma è diventato pienamente operativo solo all'inizio del 2017. Per gli incendi nel periodo 2015-2017, abbiamo quindi spesso utilizzato immagini Landsat 8 o Landsat 9. Le immagini Landsat 5 sono disponibili dagli anni '80.

Per ogni evento di incendio, abbiamo preparato una raccolta di immagini relative al periodo compreso tra 150 giorni prima e 150 giorni dopo l'incendio. Abbiamo filtrato le immagini in base alla copertura nuvolosa e, di norma, abbiamo escluso quelle con una copertura nuvolosa superiore al 30%. Abbiamo rimosso i pixel con nuvole dalle immagini rimanenti.

Per valutare le aree bruciate, abbiamo selezionato le prime tre immagini disponibili prima e dopo l'incendio per ridurre l'impatto di fattori casuali, problemi dei sensori ed errori dovuti alla rimozione delle nuvole. Abbiamo combinato le immagini selezionate calcolando la mediana in un'unica scena "prima dell'incendio" e "dopo l'incendio". Se questa selezione non produceva risultati soddisfacenti, cercavamo di identificare la causa del problema:

- Spesso, una delle scene combinate presentava troppo rumore. In questo caso, abbiamo aumentato il numero di immagini utilizzate per calcolare la mediana e/o verificato se il problema fosse causato da una singola immagine con rumore eccessivo, che abbiamo quindi eliminato.
- Se il segnale di incendio era molto debole, abbiamo utilizzato solo la prima immagine prima o dopo l'incendio. Ciò ha garantito la massima comparabilità possibile delle scene, mentre il segnale di incendio era più pronunciato nella prima immagine dopo l'evento.
- Se le immagini prima e dopo l'incendio appartenevano a fasi fenologiche della vegetazione nettamente diverse, abbiamo cercato di trovare immagini pre-incendio dell'anno precedente nella stessa fase fenologica delle immagini post-incendio.

Per molti incendi, abbiamo combinato tutte e tre le rettifiche fino a ottenere un risultato soddisfacente. Per gli incendi successivi al 2017, abbiamo generalmente utilizzato solo la prima immagine idonea prima e dopo l'evento. Una risoluzione spaziale più elevata e una migliore qualità dell'immagine hanno in gran parte eliminato la necessità di combinare più immagini in una sola.

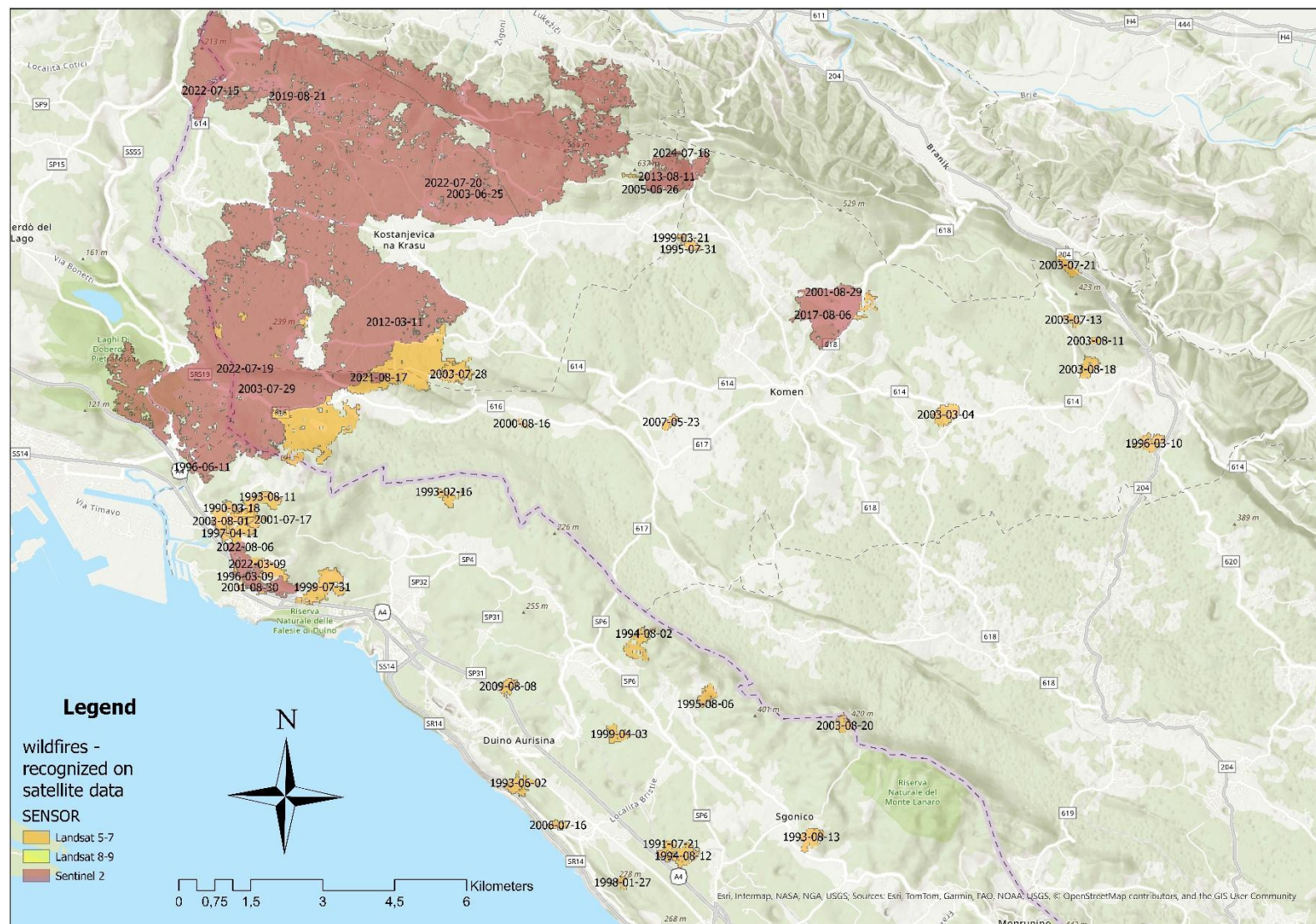
2.2.3 DETERMINAZIONE DELL'AREA DELL'INCENDIO

Per le scene prima e dopo l'incendio, abbiamo prima calcolato gli indici BAIS2 e BAI, e poi la loro differenza (dBAIS2 e dBAI). Abbiamo vettorializzato il raster risultante con i valori di differenza impostando una soglia. Dai poligoni risultanti, abbiamo mantenuto solo quelli che contenevano il punto di origine dell'incendio (per la Slovenia) o il baricentro del poligono dato dai dati di input (per l'Italia). Questo ci ha fornito un unico poligono finale per ogni incendio. La soglia è stata determinata individualmente per ogni incendio, poiché la raccolta e la selezione delle immagini differivano da un caso all'altro. Di solito era intorno a 0,2 per dBAIS2 e tra 20 e 30 per dBAI. I poligoni finali sono stati esportati e poi uniti in un unico shapefile in ArcGIS Pro (PRILOGA2.zip).

2.3 BANCA DATI E MAPPA DELLE AREE DEGLI INCENDI PASSATI

Abbiamo ricevuto un set di dati relativo a 288 incendi dai comuni di Miren-Kostanjevica e Komen e a 394 incendi dal comune di Devin-Nabrežina. Dopo aver filtrato i dati in base all'estensione degli incendi, sono rimasti rispettivamente 118 e 120 incendi, per un totale di 238 incendi idonei all'analisi. Siamo riusciti a determinare i poligoni delle aree bruciate per 171 incendi. Per gli incendi rimanenti, ciò non è stato possibile con i metodi utilizzati. Per alcuni, le immagini erano disponibili, ma di qualità insufficiente, il che ha comportato risultati con troppo rumore, rendendo impossibile determinare in modo affidabile le aree bruciate, oppure le immagini non contenevano tracce distinguibili di incendio. Ciò era particolarmente comune per gli incendi precedenti al 2017 verificatisi all'inizio o alla fine dell'inverno. La minore frequenza di sorvolo dei satelliti Landsat e la copertura nuvolosa invernale hanno spesso reso difficile ottenere immagini pre e post-incendio nella stessa fase fenologica, poiché la crescita primaverile e i cambiamenti vegetazionali autunnali oscurano il segnale dell'incendio. Negli incendi invernali, a volte è stato difficile stimare l'area di foresta bruciata, poiché i cambiamenti tra foresta spoglia e foresta bruciata sono molto meno pronunciati rispetto a quelli tra foresta verde e foresta bruciata. Problemi sono sorti frequentemente anche con gli incendi del 2011 e del 2012. Questi sono stati rilevati dal satellite Landsat 7, che dal 2003 aveva avuto difficoltà tecniche, diventate così gravi nel 2011 e nel 2012 da rendere difficile trovare immagini utilizzabili per questi periodi. Dopo il lancio di Landsat 8 nel 2013, è stato possibile calcolare nuovamente gli indici.

Figura 2 - Mappa delle aree interessate da incendi rilevate sulle immagini satellitari.



3 BANCA DATI DI IMMAGINI MULTISPETTRALI DA DRONI E NUVOLE DI PUNTI 3D

3.1 IMMAGINI MULTISPETTRALI CON DRONI

Nell'ambito del progetto, abbiamo monitorato la situazione in due località situate all'estremità occidentale del comune di Miren-Kostanjevica. La prima si trova a sud-est di Nova vas, mentre la seconda si trova lungo il confine di Stato a nord della collina di Kremenjak (236 m). Abbiamo raccolto dati sul campo in diversi periodi dell'anno: 27 maggio 2025 (primavera), 16 luglio 2025 (estate), 7 novembre 2025 (autunno), 13 febbraio 2026 (inverno).

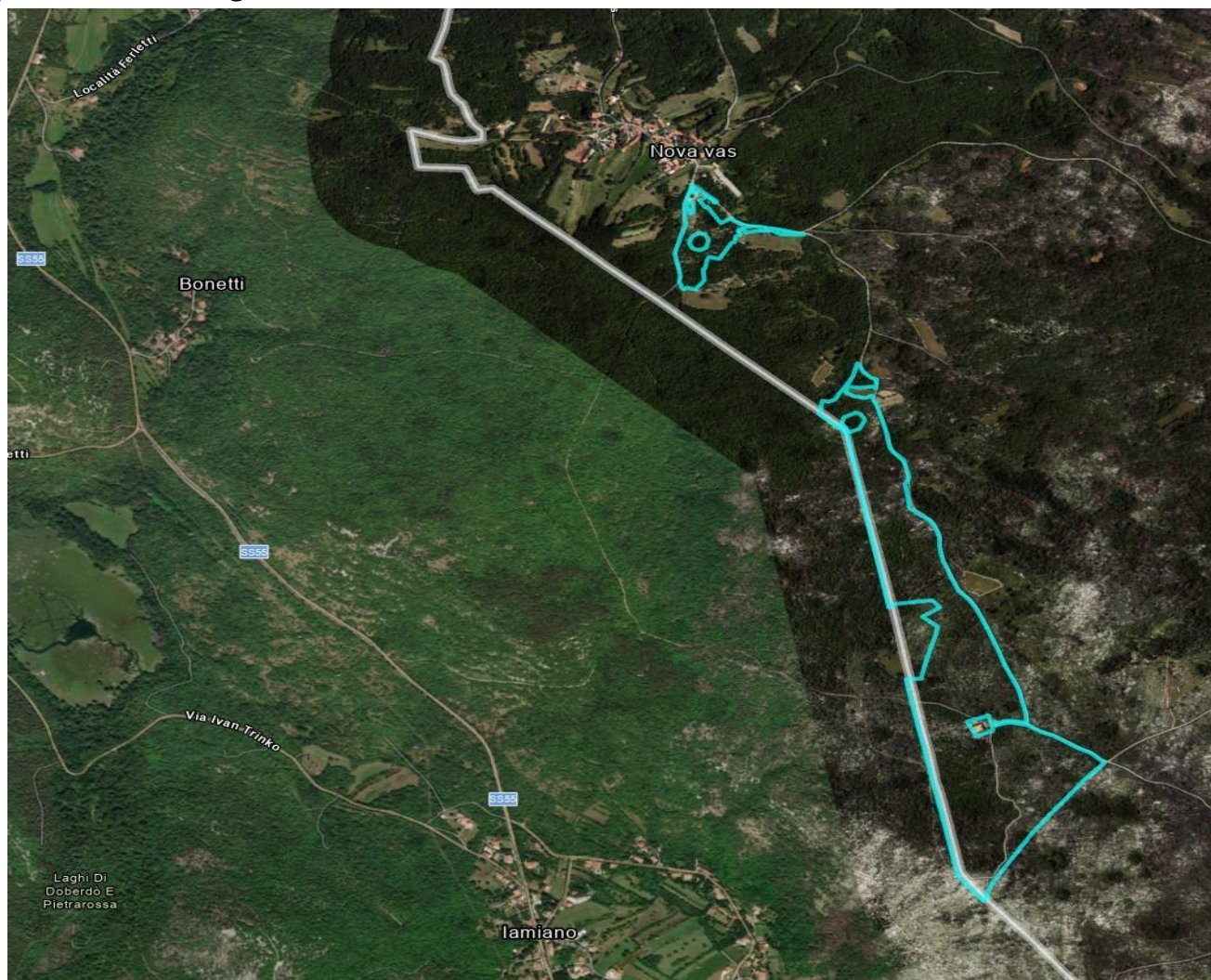


Figura 3 - Aree pilota per il monitoraggio stagionale con droni nel Comune di Miren-Kostanjevica.

Abbiamo inoltre effettuato una registrazione pilota a distanza con i droni nel comune di Devin-Nabrežina, precisamente a Medjevasi, vicino al confine italo-sloveno. Finora abbiamo effettuato una sola registrazione, poiché il comune di Devin-Nabrežina non ha ancora designato un'area pilota.



Figura 4 - Area pilota per il rilevamento con droni nei pressi di Medjevas nel comune di Devin-Nabrežina.

3.2 ARCHIVIAZIONE DEL DATABASE DELLE RILEVAZIONI CON DRONI

Accesso alla raccolta delle registrazioni effettuate con i droni:

<https://oblak.zrc-sazu.si/index.php/s/Wx8LWpPTEam8ZHt>

KARSTFW Prejmi ?

Javna objava

Vrsta Spremenjeno

Ime	File type	Veli...	Spreme...
kremenjak_20250527_navadna_d96_popravljeno.tif	TIFF image	3,7 GB	11. januar
novava_20250527_oblak_tock.las	Unknown file type	2,8 GB	pred 2 tednoma
novavas_20250527_infrardeca_d96_popravljena.tif	TIFF image	271,8 MB	10. januar
novavas_20250527_infrardeca_d96_popravljena.tif.aux.xml	XML document	4 KB	pred 2 tednoma
novavas_20250527_navadna_d96_popravljena.tif	TIFF image	1,2 GB	12. januar
novavas_20250527_navadna_d96_popravljena.tif.aux.xml	XML document	10 KB	pred 2 tednoma
novavas_20250527_NDVI_d96.tfw	Unknown file type	< 1 KB	pred 2 tednoma
novavas_20250527_NDVI_d96.tif	TIFF image	1,6 GB	pred 2 tednoma
novavas_20250527_NDVI_d96.tif.ovr	Unknown file type	180,6 MB	pred 2 tednoma
novavas_20250527_NDVI_d96.tif.aux.xml	XML document	4 KB	pred 2 tednoma
novavas_20250527_rdeca_d96_popravljena.tif	TIFF image	268,1 MB	10. januar
novavas_20250527_rdeca_d96_popravljena.tif.aux.xml	XML document	4 KB	pred 2 tednoma

Figura 5 - Screenshot dell'archivio online per la raccolta dei dati di telerilevamento.

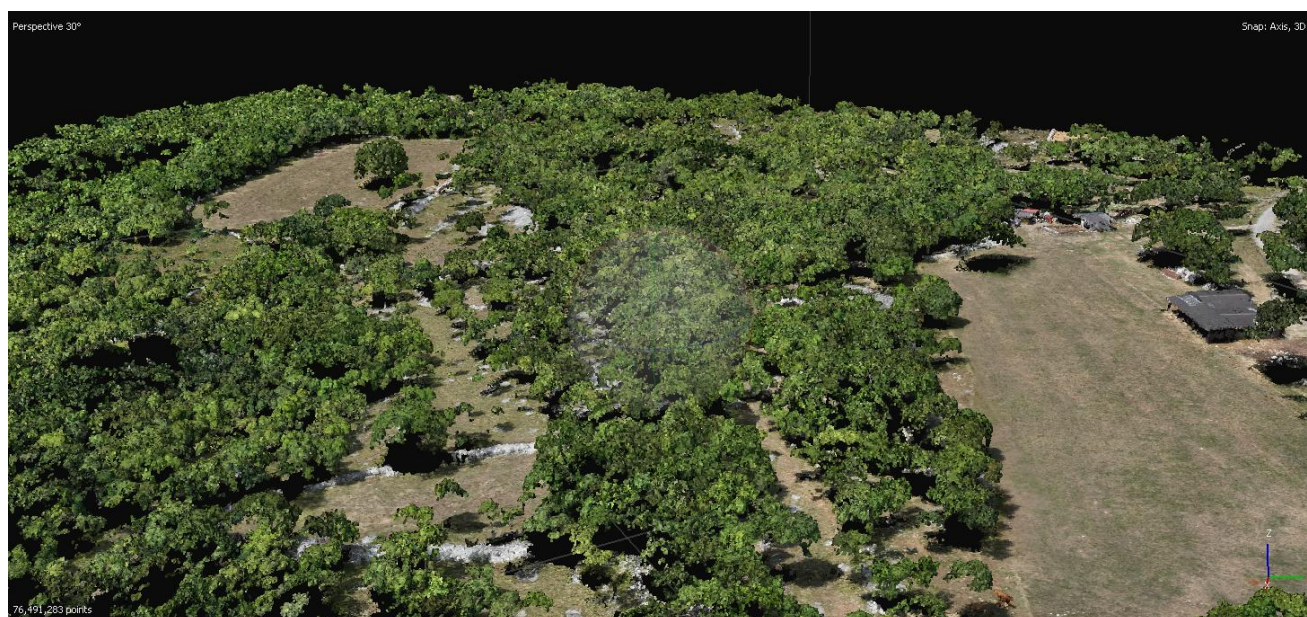
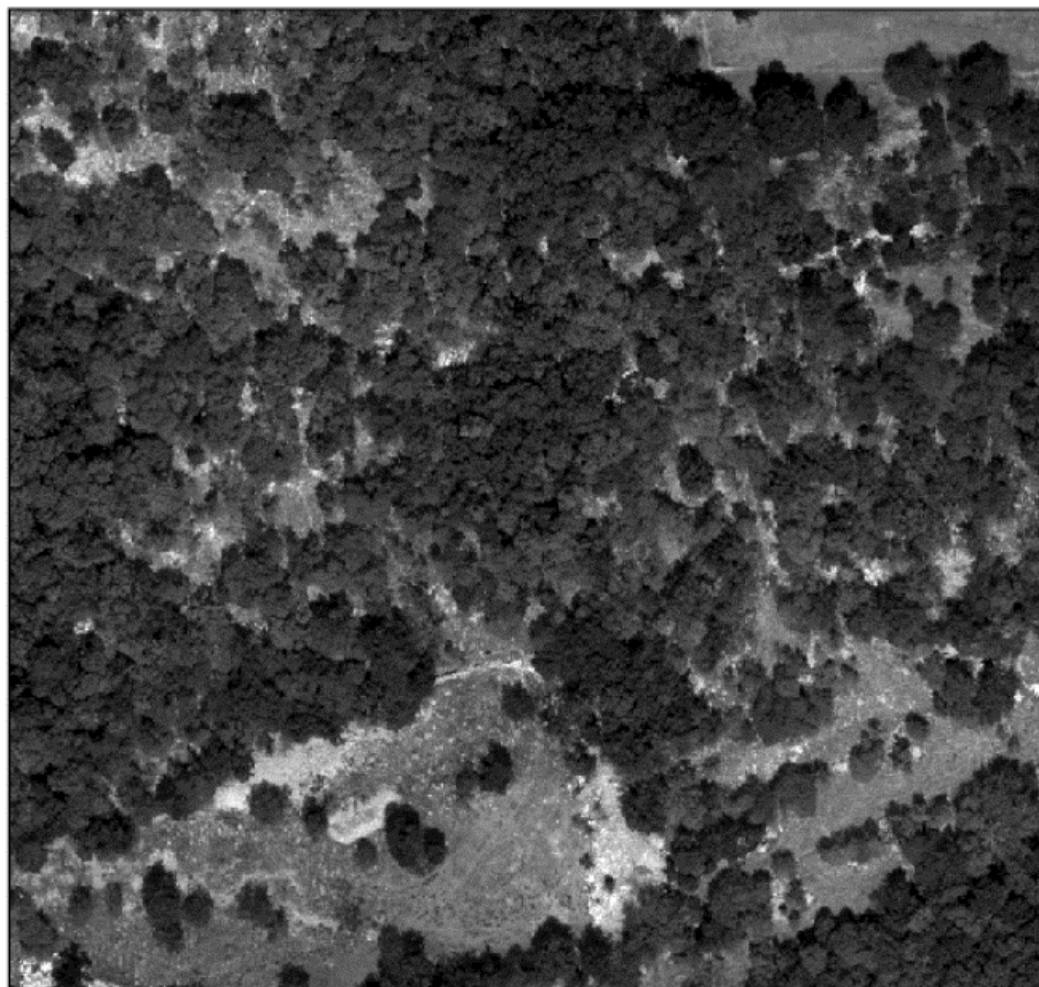


Figura 6 - Esempio di nuvola di punti ricavata da immagini acquisite con una fotocamera ottica ed elaborate fotogrammetricamente per l'area di Nova vas (periodo estivo).

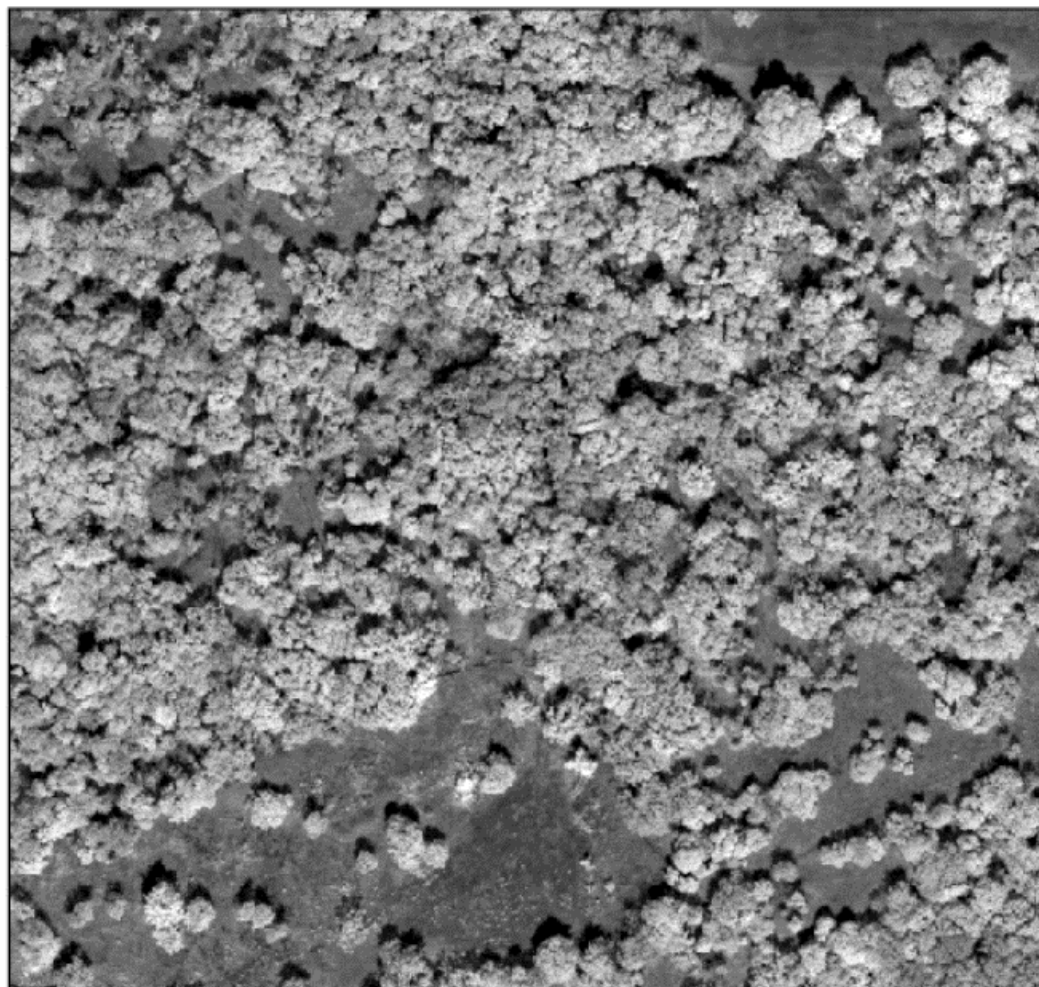


Figura 7 - Esempio di ortofoto ricavata da immagini scattate con una fotocamera ottica standard per l'area di Nova vas in estate.



0 10 20 30 m

Figura 8 - Esempio di ortofoto ricavata da immagini della fotocamera a spettro rosso per l'area di Nova vas in estate.



0 10 20 30 m

Figura 9 - Esempio di ortofoto ricavata da immagini della fotocamera a infrarossi per l'area di Nova vas in estate.

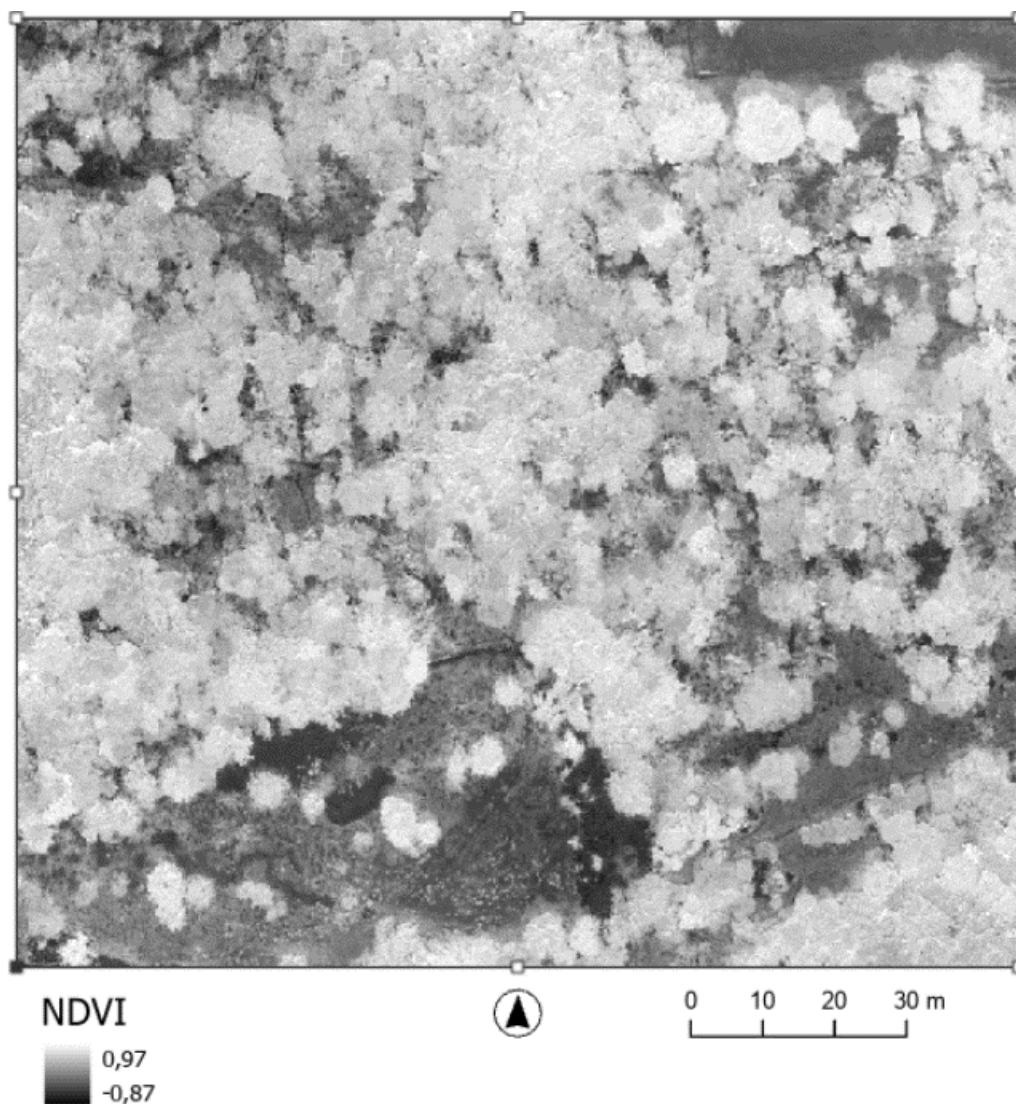


Figura 10 - Esempio di valori NDVI calcolati dallo spettro rosso e infrarosso per l'area di Nova vas in estate. I valori più alti (tonalità più chiare) rappresentano la vegetazione, mentre i valori più bassi (tonalità più scure) rappresentano altre superfici, come il terreno roccioso o i muri a secco.

Questo database ha supportato l'elaborazione del D.2.3.2. e alcuni dati sono parzialmente disponibili sulla piattaforma online del progetto.

4 BANCA DATI DI TELERILEVAMENTO SULLA PIATTAFORMA KARST FIREWALL

4.1 PANORAMICA DELLA PIATTAFORMA

La piattaforma online Karst Firewall è un portale web sviluppato da Infordata Sistemi nell'ambito del progetto Karst Firewall 5.0 (Deliverable D.2.1.1). Funge da hub centrale per l'accesso ai dati, la visualizzazione e il processo decisionale operativo in tutta la regione transfrontaliera del Carso. La piattaforma è accessibile all'indirizzo <https://karst.way.to.it> e fornisce una serie completa di strumenti per il monitoraggio ambientale, la valutazione del rischio di incendi boschivi e la gestione degli incidenti.

Il portale integra dati provenienti da diverse fonti, tra cui stazioni meteorologiche terrestri (archiviati in un database di serie temporali InfluxDB), immagini satellitari provenienti dal Copernicus Dataspace Ecosystem, prodotti di telerilevamento derivati da droni e risultati di un modello di previsione del rischio di incendi basato sull'apprendimento automatico. Una descrizione completa dell'architettura della piattaforma, della gestione degli utenti (RBAC), della raccolta dei dati meteorologici, del sistema di attivazione delle notifiche, della mappa 3D e dello schema del database è fornita nel Deliverable D.2.1.1. La presente sezione si concentra specificamente su come i dati di telerilevamento descritti nelle sezioni 2 e 3 del presente documento siano resi disponibili attraverso la piattaforma.

4.2 INTEGRAZIONE DEI DATI DI TELERILEVAMENTO

Il database di telerilevamento prodotto dallo ZRC-SAZU, comprendente poligoni delle aree bruciate derivati dai satelliti, ortofoto multispettrali acquisite da droni, livelli NDVI e nuvole di punti 3D, è integrato nella piattaforma Karst Firewall attraverso una serie di livelli di dati dedicati. Questi livelli sono accessibili tramite l'interfaccia cartografica 2D interattiva della piattaforma (Dashboard), che si basa sull'ecosistema Copernicus Dataspace e supporta sia la mappatura web standard (Leaflet/OpenStreetMap) sia l'integrazione diretta con i servizi di dati Sentinel dell'Agenzia Spaziale Europea.

La piattaforma organizza i dati di telerilevamento nei seguenti livelli tematici, ciascuno dei quali può essere attivato o disattivato dall'utente tramite un pannello di controllo dei livelli sul lato destro dell'interfaccia cartografica.

Tabella 1 - Descrizione dei livelli (layers) di telerilevamento integrati nella piattaforma Karst Firewall.

Nome del livello	Descrizione
Satellite	Riquadri di immagini satellitari Sentinel-2 di base del programma Copernicus, che forniscono un riferimento visivo del territorio con una risoluzione spaziale fino a 10 m. Aggiornati regolarmente tramite l'API dell'ecosistema Copernicus Dataspace.
NDVI	Livello dell'Indice di Vegetazione Normalizzato (NDVI) derivato dalle bande spettrali di Sentinel-2 (rosso e vicino infrarosso). Fornisce una visione sinottica dello stato di salute della vegetazione nell'area di studio, integrando i prodotti NDVI ad alta risoluzione basati su droni descritti nella Sezione 3.
Aree bruciate	Perimetri storici degli incendi ricavati dall'analisi delle immagini satellitari descritta nella Sezione 2.2, inclusi i 171 poligoni di incendio generati utilizzando gli indici dBAIS2 e dBAI. Questi poligoni sono visualizzati come sovrapposizioni vettoriali sulla mappa.
Aree bruciate Sentinel	Prodotti relativi alle aree bruciate derivati direttamente dal Servizio di gestione delle emergenze di Copernicus o dall'elaborazione in tempo quasi reale di Sentinel-2, che forniscono un set di dati di riferimento indipendente per la convalida e il confronto con la mappatura delle aree bruciate specifica del progetto.

Incendi attivi	Rilevamenti di incendi attivi in tempo quasi reale provenienti da servizi di rilevamento delle anomalie termiche basati su satellite (ad esempio, FIRMS/MODIS, VIIRS), visualizzati come elementi puntiformi sulla mappa.
Video	Integrazione di feed video provenienti da telecamere di sorveglianza installate nell'area di studio, a supporto del monitoraggio visivo delle zone a rischio di incendio.

Oltre ai livelli di telerilevamento sopra elencati, la piattaforma include diversi livelli meteorologici e di rischio di incendio che forniscono il contesto ambientale per l'interpretazione dei dati di telerilevamento.

Tabella 2 - Livelli informativi relativi al contesto meteorologico e alla previsione del rischio incendio.

Nome del livello	Descrizione
Previsione del pericolo di incendio	Livello di previsione dell'Indice Meteorologico di Rischio Incendio (FWI), che mostra la distribuzione spaziale del pericolo di incendio nell'area di studio utilizzando una classificazione con codice cromatico. L'FWI viene calcolato dai dati meteorologici seguendo la metodologia dell'Indice Meteorologico di Rischio Incendio canadese.
Rischio di incendi carsici	Mappa giornaliera del rischio di insorgenza di incendi boschivi prodotta dal modello di previsione basato sull'apprendimento automatico (vedere la Sezione 4.5). Questo livello mostra la probabilità prevista di insorgenza di incendi su una griglia di circa 40.000 punti che copre l'area di studio.

Temperatura	Interpolazione spaziale delle letture di temperatura provenienti dalla rete di stazioni meteorologiche, che fornisce un contesto termico in tempo reale.
Vento	Dati sulla velocità e la direzione del vento provenienti dalle stazioni meteorologiche, fondamentali per valutare il potenziale di propagazione degli incendi nella regione del Carso, che è regolarmente interessata dal vento Bora.

Tutti i livelli supportano la selezione della data tramite un selettore di date, consentendo agli utenti di visualizzare i dati storici per qualsiasi data disponibile. L'interfaccia della mappa fornisce anche un selettore di livelli di base (ad es. CartoDBLight, OpenStreetMap) e controlli di navigazione standard (zoom, panoramica).

Web Integration with Copernicus Dataspace Ecosystem

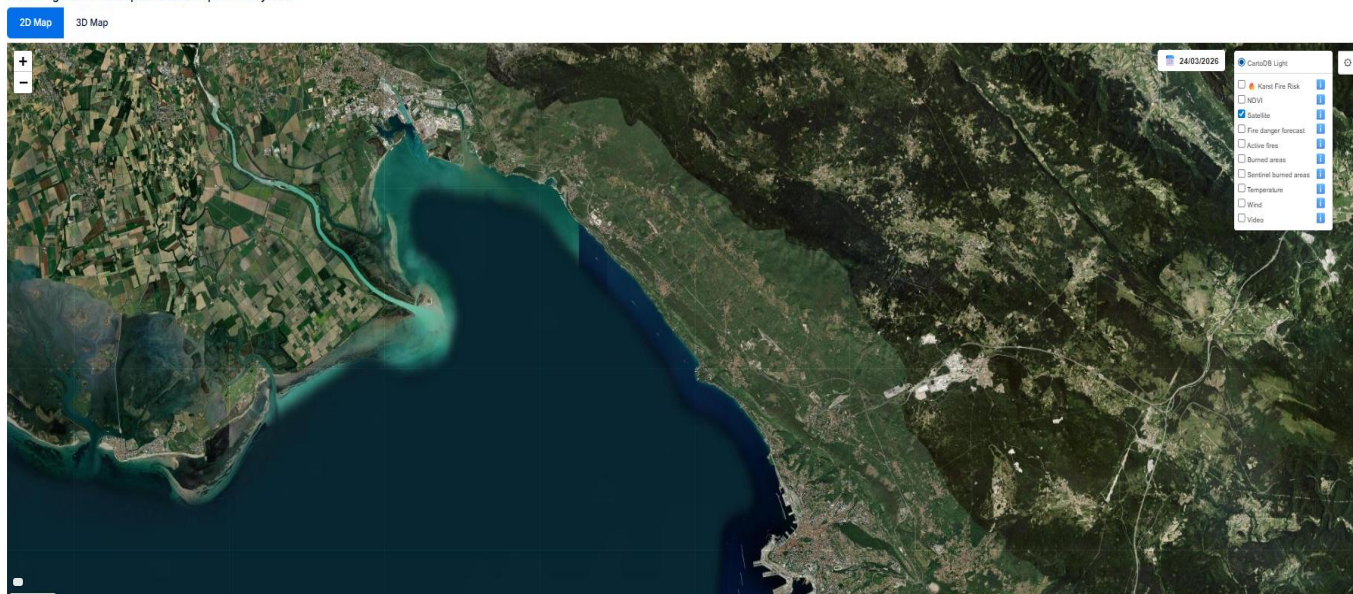


Figura 11 - Screenshot della dashboard della piattaforma Karst Firewall che mostra il livello di base satellitare proveniente dall'ecosistema Copernicus Dataspace, con il pannello di controllo dei livelli e il selettore di date visibili sul lato destro dell'interfaccia.

4.3 MAPPA INTERATTIVA 2D E VISUALIZZAZIONE DEI DATI

L'interfaccia principale per accedere al database di telerilevamento è la pagina Dashboard della piattaforma, che presenta una mappa interattiva a schermo intero. La mappa offre due modalità di visualizzazione:

- Mappa 2D: una vista cartografica standard basata sul web che utilizza Leaflet.js e tessere OpenStreetMap/CartoDB, a supporto di tutti i livelli tematici descritti nella Sezione 4.2. Questa è la vista predefinita per l'uso operativo quotidiano.
- Mappa 3D: una vista tridimensionale del globo basata su Cesium che fornisce una visualizzazione sensibile al terreno di incidenti di incendio, stazioni meteorologiche e zone di incendio. Questa modalità supporta il filtraggio avanzato per data, intervallo di date e ID dell'incidente, nonché l'interazione diretta con i dati relativi agli incidenti e alle stazioni.

Quando viene attivato un livello di telerilevamento (ad es. il livello di previsione del pericolo di incendio), i dati corrispondenti vengono visualizzati come una sovrapposizione codificata a colori sulla mappa. Una legenda viene visualizzata automaticamente nell'angolo in basso a sinistra della mappa, fornendo le soglie di classificazione e la scala cromatica per il livello attivo. Gli utenti possono cliccare sui singoli elementi della mappa (stazioni meteorologiche, incidenti di incendio, celle della griglia) per accedere a informazioni dettagliate in finestre pop-up. Per le stazioni meteorologiche, ciò include gli ultimi parametri meteorologici disponibili (temperatura, umidità, velocità del vento, precipitazioni). Per gli incidenti di incendio, include le coordinate di localizzazione, le date di inizio e fine e l'area bruciata stimata.

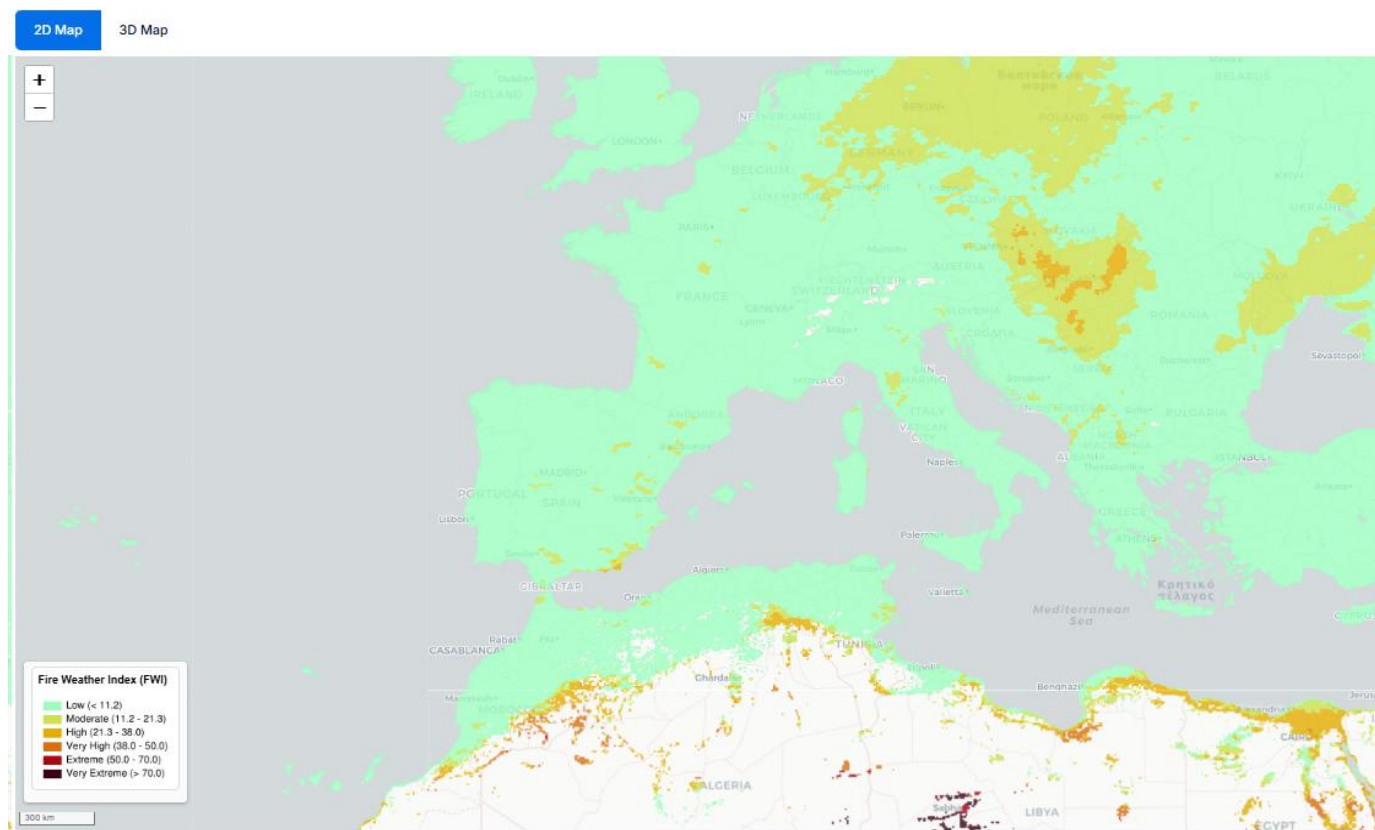


Figura 12 - Livello di previsione dell'Indice Meteorologico di Rischio Incendio (FWI) visualizzato sulla piattaforma Karst Firewall, che mostra la distribuzione spaziale del pericolo di incendio in Europa e nella regione mediterranea. La legenda nell'angolo in basso a sinistra mostra le sei classi di pericolo da Basso (< 11,2) a Molto Estremo (> 70,0).

4.4 LIVELLO DI PREVISIONE DEL PERICOLO DI INCENDIO

Il livello di previsione del pericolo di incendio fornisce una rappresentazione spaziale dell'Indice meteorologico di incendio (FWI) nell'area di studio. L'FWI viene calcolato quotidianamente utilizzando i dati meteorologici raccolti dalla rete di stazioni meteorologiche integrate nella piattaforma (cfr. D.2.1.1, Sezione 4.3). Il calcolo segue la metodologia dell'Indice meteorologico di incendio canadese, che combina temperatura, umidità relativa, velocità del vento e precipitazioni in un unico indice numerico che rappresenta il pericolo meteorologico di incendio. I valori dell'FWI sono classificati in sei livelli di pericolo, ciascuno rappresentato da un colore distinto sulla mappa.

Tabella 3 – Classi di pericolo confrontate con relativi range di FWI

Classe di pericolo	Intervallo FWI	Colore sulla mappa
Basso	< 11,2	Verde chiaro
Moderato	11,2 – 21,3	Giallo
Elevato	21,3 – 38,0	Arancione
Molto alto	38,0 – 50,0	Rosso
Estremo	50,0 – 70,0	Rosso scuro
Molto estremo	> 70,0	Marrone scuro/marrone rossiccio

Questa classificazione consente agli utenti operativi di valutare rapidamente l'attuale pericolo di incendio in tutta la regione del Carso. Il livello FWI viene aggiornato quotidianamente ed è possibile visualizzarlo per qualsiasi data passata tramite il selettore di date. Se combinato con il livello del rischio di incendio nel Carso e con quello delle aree bruciate, fornisce un quadro completo sia delle attuali condizioni meteorologiche favorevoli agli incendi sia dei

modelli storici degli incendi. I dati di telerilevamento integrati nella piattaforma supportano direttamente i sistemi transfrontalieri congiunti di rilevamento precoce e gestione dell'escalation previsti dal progetto. Le aree bruciate storicamente fungono da dati di addestramento per il modello di apprendimento automatico. Quando le soglie di pericolo di incendio vengono superate, il sistema di attivazione delle notifiche della piattaforma

(descritto in dettaglio in D.2.1.1) genera automaticamente degli allarmi che vengono inoltrati alle parti interessate — comprese le agenzie governative e le squadre di pronto intervento sia sul versante italiano che su quello sloveno — tramite canali di comunicazione configurabili (e-mail, SMS, WhatsApp). Questa integrazione di dati di telerilevamento, modellizzazione predittiva e allerta automatizzata garantisce una catena continua dal monitoraggio ambientale alla risposta operativa in tutta la regione carsica transfrontaliera.

4.5 INTEGRAZIONE CON IL MODELLO DI PREVISIONE DEL RISCHIO INCENDIO

Oltre alle previsioni sul pericolo di incendio basate sull'indice FWI, la piattaforma integra un modello di previsione del rischio di incendio basato sull'apprendimento automatico, sviluppato nell'ambito del progetto Karst Firewall 5.0. Questo modello, accessibile tramite il livello Karst Fire Risk sulla mappa 2D, fornisce una valutazione complementare e più granulare della probabilità di insorgenza di incendi boschivi nell'area di studio.

4.5.1 PANORAMICA DEL MODELLO

Il sistema di previsione adotta un approccio in due fasi. La prima fase utilizza un classificatore Random Forest addestrato sui dati storici degli incendi dal 1995 al 2024 (eventi sia dal versante italiano che da quello sloveno della regione del Carso). Per ciascun punto di una griglia di circa 40.000 punti che copre l'area di studio, il modello prevede la probabilità che si verifichi un incendio, sulla base di caratteristiche spaziali (vicinanza a strade, ferrovie, linee elettriche e focolai storici di incendio) e caratteristiche temporali (mese, giorno della settimana, stagione). Il modello raggiunge un'area sotto la curva ROC (AUC) di 0,854 sui dati di test tenuti fuori, indicando una forte performance discriminante.

La seconda fase applica un aggiustamento di gravità basato sull'Indice Meteorologico di Incendio (FWI). Il valore giornaliero dell'FWI, calcolato a partire da dati meteorologici reali provenienti dalla rete di stazioni meteorologiche, modula la probabilità di accensione di base per produrre un punteggio di rischio composito finale per ciascun punto della griglia. Questo

punteggio viene quindi classificato in livelli di allerta (ROSSO – alta priorità, GIALLO – rischio moderato che richiede monitoraggio, VERDE – rischio basso).



Figura 13 - Livello "Karst Fire Risk" sulla piattaforma, che mostra la mappa giornaliera della probabilità di innesco di incendi boschivi prodotta dal modello di machine learning su una griglia di circa 40.000 punti. Gli indicatori delle stazioni meteorologiche (punti blu) mostrano i dati meteorologici in tempo reale in finestre pop-up, inclusi FWI, temperatura, umidità, velocità del vento e precipitazioni.

4.5.2 PIPELINE OPERATIVA

La pipeline di previsione del rischio di incendio viene eseguita automaticamente con cadenza giornaliera. Il sistema recupera le ultime osservazioni meteorologiche dall'API Open-Meteo per tutte le stazioni meteorologiche della rete, calcola le componenti FWI, esegue il modello Random Forest sull'intera griglia di 40.000 punti e produce due file di output: un riepilogo JSON leggero contenente il livello di allerta regionale, i valori FWI, il conteggio delle zone, e un file GeoJSON completo contenente la valutazione del rischio per ogni punto della griglia.

La pipeline è containerizzata utilizzando Docker e orchestrata tramite Docker Compose, garantendo un'esecuzione riproducibile e coerente in tutti gli ambienti. Il sistema è distribuito su un server dedicato con meccanismo anti-standby per garantire un funzionamento quotidiano ininterrotto.

4.6 ACCESSIBILITÀ E INTEROPERABILITÀ DEI DATI

Tutti i dati di telerilevamento e i risultati relativi al rischio di incendio integrati nella piattaforma Karst Firewall sono progettati per l'interoperabilità con sistemi esterni. La piattaforma segue le convenzioni HTTP standard e restituisce i dati in formati ampiamente supportati (JSON, GeoJSON), consentendo l'integrazione con strumenti GIS di terze parti, sistemi di allerta precoce e piattaforme di supporto decisionale utilizzate dalle agenzie di protezione civile su entrambi i lati del confine.

I prodotti di telerilevamento acquisiti dai droni (ortofoto multispettrali, livelli NDVI, nuvole di punti) prodotti da ZRC-SAZU sono archiviati nel repository cloud di ZRC-SAZU (<https://oblak.zrc-sazu.si/index.php/s/Wx8LWpPTEam8ZHt>) in formati geospaziali standard (GeoTIFF per i prodotti raster, LAS per le nuvole di punti). Alcuni prodotti selezionati vengono inoltre pubblicati sulla piattaforma online Karst Firewall per la visualizzazione diretta, garantendo il supporto sia per l'analisi dettagliata (tramite download) che per la panoramica operativa (tramite il portale web).

I poligoni delle aree bruciate derivati dai satelliti (PRILOGA2.zip, cfr. Sezione 2.3) sono disponibili come shapefile e vengono visualizzati sull'interfaccia cartografica della piattaforma come sovrapposizioni vettoriali. Il database delle immagini satellitari (PRILOGA1.xls, cfr. Sezione 2.1) fornisce un inventario completo di tutte le immagini Sentinel-2 e Landsat utilizzate nell'analisi, con riferimenti diretti all'archivio di Google Earth Engine per l'accesso completo alle immagini.

5 RIFERIMENTI

- 1 Chuvieco, E., Martín, M. P., & Palacios, A. (2002). Valutazione di diversi indici spettrali nel dominio spettrale rosso-infrarosso vicino per la discriminazione dei terreni bruciati. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23), 5103–5110.
<https://doi.org/10.1080/01431160210153129>
- 2 Filipponi, F. (18 marzo 2018). BAIS2: Indice delle aree bruciate per Sentinel-2 †. 2a Conferenza elettronica internazionale sul telerilevamento. <https://doi.org/10.3390/ecrs-2-05177>
- 3 Tucker, C. J. (1979). Combinazioni lineari di rosso e infrarosso fotografico per il monitoraggio della vegetazione. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

PODATKOVNA ZBIRKA PODATKOV DALJINSKEGA ZAZNAVANJA

KARST FIREWALL 5.0

Adattamento innovativo al cambiamento climatico basato sugli ecosistemi nella regione del Carso. Promuovere una silvicoltura resistente agli incendi con il supporto di Industria 5.0

**Inovativno ekosistemsko-zasnovano prilagajanje podnebnim spremembam na Krasu.
Spodbujanje požarno odporne gmajne s podporo industrije 5.0**

INFORMACIJE O PROJEKTU	
Akronim projekta:	KARST FIREWALL 5.0
Naslov projekta:	Inovativno ekosistemsko-zasnovano prilagajanje podnebnim spremembam na Krasu. Spodbujanje požarno odporne gmajne s podporo industrije 5.0
Prednostno področje:	Bolj zelena, nizko-ogljikna Evropa, ki prehaja na gospodarstvo z ničelno stopnjo neto emisij ogljika in je odporna
Specifični cilj programa:	SO4: Spodbujanje prilagajanja podnebnim spremembam in preprečevanja tveganja nesreč ter odpornosti ob upoštevanju ekosistemskih pristopov
URL spletne strani projekta:	https://www.ita-slo.eu/sl/karst-firewall-50
Številka dokumenta:	KFW50-D231
Naslov dokumenta:	Podatkovna zbirka podatkov daljinskega zaznavanja
Delovni paket:	2
Dejavnost:	2.3
Odgovorni partnerji (avtorji):	ZRC SAZU (Breg Valjavec, Mateja; Ciglič, Rok; Štaut, Lenart; Geršič, Matjaž; Jakob, Aljaž) Infordata Sistemi (Petelin, Marko; Zidaric, Samuel; Zuccato, Nicola)
Citiranje:	
Kraj in datum objave:	26. 3. 2026

KAZALO

1	UVOD	4
2	PODATKOVNA ZBIRKA SATELITSKIH PODATKOV	4
2.1	SEZNAM SATELITSKIH POSNETKOV	4
2.2	ANALIZA SATELITSKIH SLIK Z GOOGLE EARTH ENGINE	6
2.2.1	IZRAČUN INDEKSOV	7
2.2.2	IZBIRA SATELITSKIH SLIK	8
2.2.3	DOLOČANJE POVRŠINE POŽARA	8
2.3	ZBIRKA PODATKOV IN ZEMLJEVID PRETEKLIH POŽAROV	9
3	ZBIRKA MULTISPEKTRALNIH SLIK IZ DRONOV IN 3D OBLAKOV TOČK	11
3.1	MULTISPEKTRALNE SLIKE Z DRONI	11
3.2	ARHIVIRANJE BAZE PODATKOV ZAPISOV Z DRONI	12
4	ZBIRKA PODATKOV TELEDETEKCIJE NA PLATFORMI KARST FIREWALL	18
4.1	PREGLED PLATFORME	18
4.2	INTEGRACIJA PODATKOV DALJINSKEGA ZAZNAVANJA	18
4.3	INTERAKTIVNI 2D ZEMLJEVID IN PRIKAZ PODATKOV	21
4.4	RAVEN NAPOVEDI NEVARNOSTI POŽARA	22
4.5	INTEGRACIJA Z MODELOM NAPOVEDI TVEGANJA POŽARA	24
4.5.1	PREGLED MODELA	24
4.5.2	POSTOPEK	25
4.6	DOSTOPNOST IN INTEROPERABILNOST PODATKOV	26
5	VIRI IN LITERATURA	26

1 UVOD

Baza podatkov daljinskega zaznavanja vključuje satelitske posnetke, RGB in multispektralne letalske fotografije ter 3D-točkovne oblake. Nekateri podatki bodo predstavljeni na portalu Karst Firewall (A2.1.1), drugi pa bodo shranjeni v bazi podatkov. Sistem bo podpiral skupne čezmejne sisteme za zgodnje odkrivanje požarov v kraškem okolju in obvladovanje njihovega širjenja ter za spremljanje obnove naravne vegetacije po požaru. Daljše podatkovne serije bodo koristne tudi za analizo in pridobivanje novih informacij, na primer na pilotnih območjih.

2 PODATKOVNA ZBIRKA SATELITSKIH PODATKOV

Satelitski podatki so bili zbrani in uporabljeni v merilu celotnega požganega območja (požar 2022), medtem ko so posnetki iz drona pridobljeni (posneti) le za pilotna območja znotraj občin (za podrobnejšo predstavitev glej dosežek D.2.3.2).

Sistem satelitskih posnetkov temelji na satelitskih podatkih Sentinel iz programa Copernicus Evropske vesoljske agencije. Uporabili smo časovno vrsto spektralnih pasov Sentinel-2, ki nam omogočajo zaznavanje požganih območij s prostorsko ločljivostjo do 20 m za velika območja. Za pridobivanje in obdelavo satelitskih podatkov Sentinel-2 smo uporabili Google Earth Engine, odprtokodno platformo v oblaku za obdelavo in analizo geoprostorskih podatkov. Za starejše požare smo uporabili posnetke satelita Landsat..

2.1 SEZNAM SATELITSKIH POSNETKOV

V prvi fazi dejavnosti smo se osredotočili na sestavo seznama relevantnih satelitskih slik, ki pokrivajo čezmejno območje Krasa, tj. slovenski del občine Miren-Kostanjevica in del občine Komen ter italijanski del občine Devin-Nabrežina. Satelitske slike, ki smo jih izbrali, izpolnjujejo naslednja merila:

- satelitske slike, posnete pred požarom
- satelitske slike, posnete po požaru (prve, ki so na voljo)

- za obdobje, ki ga pokrivajo posnetki Sentinel, so izbrani slednji, za predhodna obdobja pa se uporabljajo ustrezni razpoložljivi satelitski posnetki (npr. Landsat), ki omogočajo kartiranje požarov

Prejeli smo dva niza podatkov o požarih: enega za Kras v Sloveniji in enega za Furlanijo-Julijsko krajino. Oba niza sta bila filtrirana tako, da so bili ohranjeni le požari, ki so zadevali ustrezne občine, in sicer Miren-Kostanjevica, Komen in Devin-Nabrežina.

Podatki Sentinel-2 imajo prostorsko ločljivost 10 m (100 m² na piksel), medtem ko imajo podatki Landsat ločljivost 30 m (900 m² na piksel). Ker mora požar v celoti pokrivati vsaj nekaj sosednjih pikslov, smo za nadaljnjo obdelavo izbrali le tiste požare, ki so bili že ocenjeni na več kot 0,5 ha (5000 m²). Za nadaljnjo obdelavo smo izvozili tabelo z datumi začetka in konca požara, lokacijskimi podatki, edinstvenimi identifikatorji (ID) in identifikatorji izvora požarov. Satelitske slike so na voljo na portalu Google Earth Engine in jih je po potrebi mogoče prenesti tudi na lokalni (zunanji) nosilec podatkov. Seznam je v obliki Excelove tabele, priložene temu poročilu kot PRILOGA 1 (PRILOGA1.xls).

Seznam_satelitski_posnetki_požari_KarstFirewall5.0 - Excel

Country	FID	id_orig	ID	after_scene_name	after_timestamp	before_scene_name	before_timestamp	idpozar
ITA	31	15725	ITA15725	L5_L2SP_191028_19900813_02_T1	13.08.1990 09:12	L5_L2SP_191028_19900728_02_T1	28.07.1990 09:12	15725
ITA	34	15728	ITA15728	L5_L2SP_191028_19900813_02_T1	13.08.1990 09:12	L5_L2SP_191028_19900728_02_T1	28.07.1990 09:12	15728
ITA	35	15547	ITA15547	L5_L2SP_191028_19900829_02_T1	29.08.1990 09:12	L5_L2SP_191028_19900712_02_T1	12.07.1990 09:12	15547
ITA	37	15550	ITA15550	L5_L2SP_191028_19900829_02_T1	29.08.1990 09:12	L5_L2SP_191028_19900813_02_T1	13.08.1990 09:12	15550
ITA	38	15549	ITA15549	L5_L2SP_191028_19900914_02_T1	14.09.1990 09:12	L5_L2SP_191028_19900712_02_T1	12.07.1990 09:12	15549
ITA	40	13990	ITA13990	L5_L2SP_191028_19910205_02_T1	5.02.1991 09:12	L5_L2SP_191028_19900829_02_T1	29.08.1990 09:12	13990
ITA	39	15551	ITA15551	L5_L2SP_191028_19910205_02_T1	5.02.1991 09:12	L5_L2SP_191028_19900829_02_T1	29.08.1990 09:12	15551
ITA	32	16488	ITA16488	L5_L2SP_191028_19930821_02_T1	21.08.1993 09:14	L5_L2SP_191028_19930805_02_T1	5.08.1993 09:14	16488
ITA	31	16487	ITA16487	L5_L2SP_191028_19930821_02_T1	21.08.1993 09:14	L5_L2SP_191028_19930805_02_T1	5.08.1993 09:14	16487
ITA	32	19868	ITA19868	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	L7_L2SP_191028_20120801_02_T1	1.08.2012 09:47	19868
ITA	35	19871	ITA19871	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	L7_L2SP_191028_20120801_02_T1	1.08.2012 09:47	19871
ITA	34	19881	ITA19881	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	L7_L2SP_191028_20120801_02_T1	1.08.2012 09:47	19881
ITA	37	19873	ITA19873	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	19873
ITA	38	19874	ITA19874	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	19874
ITA	40	19875	ITA19875	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	19875
ITA	41	19876	ITA19876	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	19876
ITA	42	19877	ITA19877	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	19877
ITA	43	19878	ITA19878	L7_L2SP_191028_20121121_02_T1	21.11.2012 09:48	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	19878
ITA	39	19962	ITA19962	L7_L2SP_191028_20121121_02_T1	21.11.2012 09:48	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	19962
ITA	45	20041	ITA20041	L7_L2SP_191028_20121121_02_T1	21.11.2012 09:48	L7_L2SP_191028_20120817_02_T1	17.08.2012 09:47	20041
ITA	1	15999	ITA15999	L5_L2SP_191028_19900218_02_T1	18.02.1990 09:13	L5_L2SP_191028_19891130_02_T1	30.11.1989 09:16	15999
ITA	1	13991	ITA13991	L5_L2SP_191028_19910205_02_T1	5.02.1991 09:12			13991
ITA	1	15479	ITA15479	L5_L2SP_191028_19920412_02_T1	12.04.1992 09:16			15479
ITA	1	15522	ITA15522	L5_L2SP_191028_19930210_02_T1	10.02.1993 09:14	L5_L2SP_191028_19921224_02_T1	24.12.1992 09:13	15522
ITA	1	16490	ITA16490	L5_L2SP_191028_19940504_02_T1	4.05.1994 09:11			16490
ITA	1	14745	ITA14745	L5_L2SP_191028_19950131_02_T1	31.01.1995 09:04	L5_L2SP_190028_19950108_02_T1	8.01.1995 08:58	14745
ITA	1	16615	ITA16615	L5_L2SP_190028_19950430_02_T1	30.04.1995 08:54	L5_L2SP_191028_19950405_02_T1	5.04.1995 09:01	16615
ITA	1	14562	ITA14562	L5_L2SP_191028_19960407_02_T1	7.04.1996 09:01	L5_L2SP_191028_19951115_02_T1	15.11.1995 08:51	14562
ITA	1	16018	ITA16018	L5_L2SP_191028_19970410_02_T1	10.04.1997 09:19	L5_L2SP_191028_19970221_02_T1	21.02.1997 09:17	16018
ITA	1	15815	ITA15815	L5_L2SP_191028_19980328_02_T1	28.03.1998 09:28	L5_L2SP_191028_19971120_02_T1	20.11.1997 09:26	15815
ITA	1	14111	ITA14111	L5_L2SP_191028_19990227_02_T1	27.02.1999 09:31	L5_L2SP_191028_19981107_02_T1	7.11.1998 09:31	14111
ITA	1	15673	ITA15673	L7_L2SP_191028_20000121_02_T1	21.01.2000 09:44	L7_L2SP_191028_20000105_02_T1	5.01.2000 09:45	15673
ITA	1	15679	ITA15679	L7_L2SP_191028_20010413_02_T1	13.04.2001 09:42	L7_L2SP_191028_20001222_02_T1	22.12.2000 09:42	15679

Slika 1 – Pregled baze podatkov satelitskih posnetkov.

2.2 ANALIZA SATELITSKIH SLIK Z GOOGLE EARTH ENGINE

Glavni cilj analize satelitskih posnetkov je bil določiti natančno lokacijo požara in oceniti stanje vegetacije po požaru. Na podlagi seznama satelitskih posnetkov smo ustvarili vektorske plasti (poligone) območja vsakega požarišča in tabelo atributov, v kateri so vsakemu poligonu dodeljeni naslednji atributi: datum požara, datum posnetka, ocena stanja vegetacije, površina požarišča. Identifikatorji poligonov so usklajeni s tistimi v bazi podatkov ZGS za slovenski del obravnavanega območja.

2.2.1 IZRAČUN INDEKSOV

Za identifikacijo pogorelih površin in sprememb v vegetaciji smo uporabili tri indekse: BAIS2, BAI in NDVI. BAIS2 in BAI sta indeksa, ki se uporabljata za zaznavanje površinskega gorenja in sta občutljiva na stopnjo ožganosti pogorelih površin.

BAI pomeni *Burned Area Index* (indeks pogorelih območij). Njegova formula je (Chuvieco et. al. 2002):

$$BAI = \frac{1}{(0,1 + RED)^2 + (0,06 + NIR)^2}$$

RED in NIR sta imeni pasov na senzorjih Landsat. Pas RED zazna rdečo svetlobo v območju 640–670 nm, medtem ko pas NIR zazna svetlobo v bližnjem infrardečem območju 850–880 nm.

BAIS2 pomeni *Burned Area Index for Sentinel-2 (S2)*. Njegova formula je (Filipponi 2018):

$$BAIS2 = \left(1 - \sqrt{\frac{B06 \cdot B07 \cdot B8A}{B4}} \right) \cdot \left(\frac{B12 - B8A}{\sqrt{B12 + B81}} + 1 \right)$$

Spremenljivke so vrednosti pasov senzorja Sentinel 2. B06, B07, B8A so del bližnjega infrardečega spektra, z zaznavanjem okoli 740 nm, 783 nm oziroma 865 nm, B04 je rdeč, z zaznavanjem pri 665 nm, B12 pa je SWIR (kratkovalovni infrardeči) pri 2190 nm. BAIS2 uporablja spektralne pasove (zlasti je del spektra NIR razdeljen na več pasov), ki so specifični za senzorje Sentinel-2, zato ni primeren za slike Landsat. Okrajšava NDVI pomeni *normalizirani indeks vegetacije*. Gre za preprost indeks, ki je postal standard za ocenjevanje stanja vegetacije. Temelji na absorpciji klorofila rdečih valovnih dolžin in visoki odbojnosti v bližnjem infrardečem delu spektra (Tucker 1979).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

2.2.2 IZBIRA SATELITSKIH SLIK

Prednost smo dali slikam **Sentinel-2 (S2)**, kadar so bile na voljo. Sentinel-2 je začel zajemati slike marca 2015, vendar je postal v celoti operativen šele v začetku leta 2017. Za požare v obdobju 2015–2017 smo zato pogosto uporabili slike Landsat 8 ali Landsat 9. Slike Landsat 5 so na voljo od 80. let.

Za vsak požar smo pripravili **zbirko slik za obdobje 150 dni pred in 150 dni po** požaru. Slike smo filtrirali glede na oblačnost in praviloma izključili tiste, kjer je bila oblačnost večja od 30 %. Iz preostalih slik smo odstranili piksele z oblaki.

Za oceno pogorelih površin smo izbrali prve tri slike, ki so bile na voljo pred in po požaru, da bi zmanjšali vpliv naključnih dejavnikov, težav s senzorji in napak zaradi odstranjevanja oblakov. Izbrane slike smo združili tako, da smo izračunali mediano v eni sami sceni »pred požarom« in »po požaru«. Če ta izbira ni prinesla zadovoljivih rezultatov, smo poskušali ugotoviti vzrok težave:

- Pogosto je ena od združenih prizorov vsebovala preveč šuma. V tem primeru smo povečali število slik, uporabljenih za izračun mediane, in/ali preverili, ali je problem povzročila ena sama slika s prekomernim šumom, ki smo jo nato odstranili.
- Če je bil signal požara zelo šibak, smo uporabili le prvo sliko pred ali po požaru. To je zagotovilo največjo možno primerljivost prizorov, medtem ko je bil signal požara izrazitejši na prvi sliki po dogodku.
- Če so slike pred in po požaru pripadale jasno različnim fenološkim fazam vegetacije, smo poskušali najti slike izpred požara iz prejšnjega leta v isti fenološki fazi kot slike po požaru.

Za mnoge požare smo združili vse tri popravke, dokler nismo dobili zadovoljivega rezultata. Za požare po letu 2017 smo na splošno uporabili le prvo primerno sliko pred in po dogodku. Višja prostorska ločljivost in boljša kakovost slike sta v veliki meri odpravili potrebo po združevanju več slik v eno.

2.2.3 DOLOČANJE POVRŠINE POŽARA

Za stanje pred in po požaru smo najprej izračunali indeksa BAIS2 in BAI, nato pa še njuno razliko (dBAIS2 in dBAI). Nastali raster z vrednostmi razlike smo vektorializirali z določitvijo praga. Iz dobljenih poligonov smo obdržali le tiste, ki so vsebovali izvorni točki požara (za Slovenijo) ali težišče poligona, ki ga določajo vhodni podatki (za Italijo). Tako smo dobili en

sam končni poligon za vsak požar. Prag smo določili individualno za vsak požar, saj sta se zbiranje in izbira slik razlikovala od primera do primera. Običajno je bila okoli 0,2 za dBAIS2 in med 20 in 30 za dBAI. Končne poligone smo izvozili in nato združili v en sam shapefile v ArcGIS Pro (PRILOGA2.zip).

2.3 ZBIRKA PODATKOV IN ZEMLJEVID PRETEKLIH POŽAROV

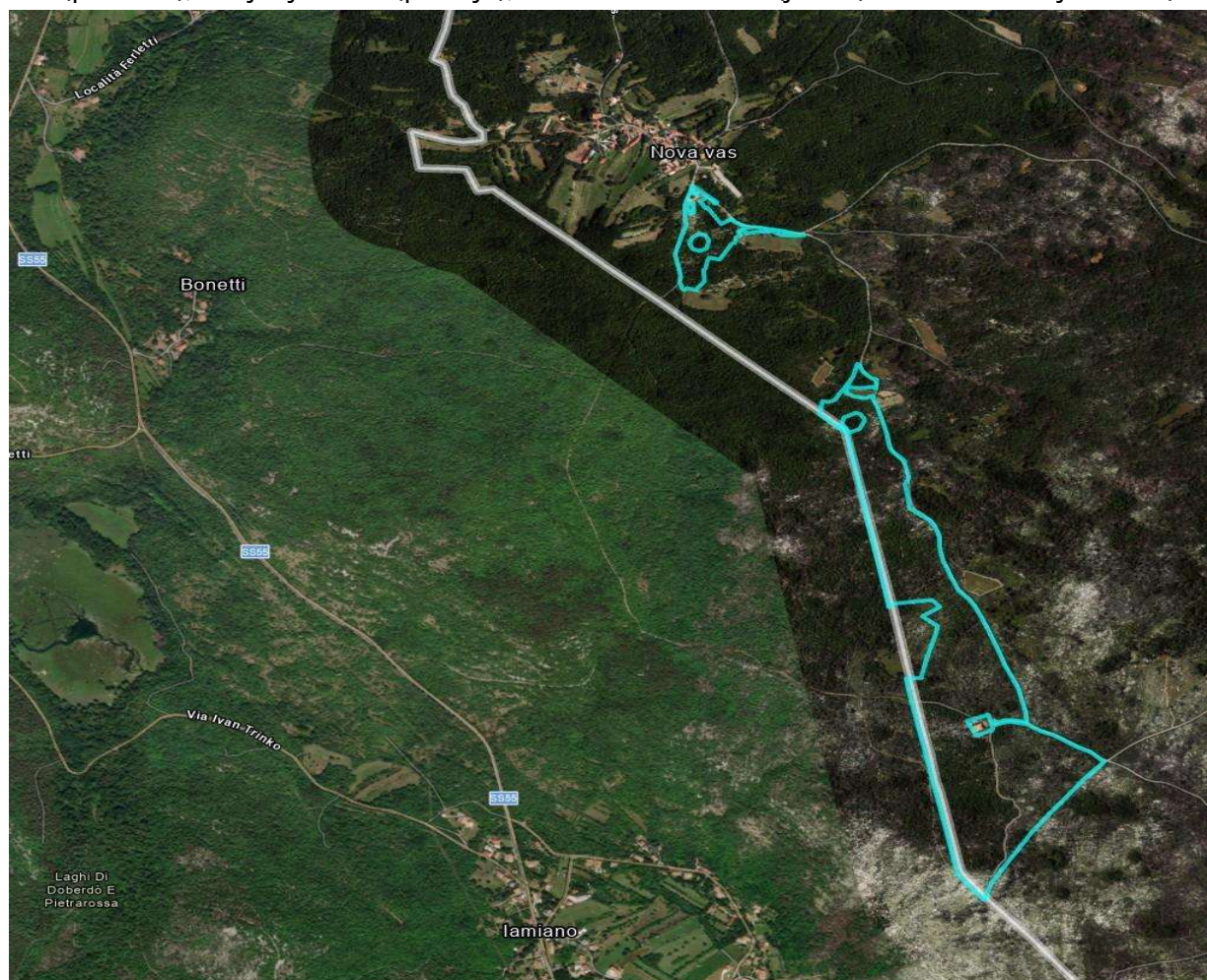
Prejeli smo niz podatkov o 288 požarih iz občin Miren-Kostanjevica in Komen ter o 394 požarih iz občine Devin-Nabrežina. Po filtriranju podatkov glede na obseg požarov je ostalo 118 oziroma 120 požarov, skupaj torej 238 požarov, primernih za analizo. Uspelo nam je določiti poligone pogorelih površin za 171 požarov. Za preostale požare to z uporabljenimi metodami ni bilo mogoče. Za nekatere so bile slike sicer na voljo, vendar so bile slabe kakovosti, kar je povzročilo preveč šuma v rezultatih, zaradi česar ni bilo mogoče zanesljivo določiti pogorelih površin, ali pa slike niso vsebovale razpoznavnih sledov požara. To je bilo še posebej pogosto pri požarih pred letom 2017, ki so se zgodili na začetku ali koncu zime. Manjša pogostost preletov satelitov Landsat in zimsko oblačnost sta pogosto oteževala pridobivanje posnetkov pred in po požaru v isti fenološki fazi, saj spomladanska rast in jesenske spremembe vegetacije zakrivajo signal požara. Pri zimskih požarih je bilo včasih težko oceniti površino pogorelega gozda, saj so spremembe med golim gozdom in pogorelim gozdom veliko manj izrazite kot med zelenim gozdom in pogorelim gozdom. Težave so se pogosto pojavljale tudi pri požarih v letih 2011 in 2012. Te je zaznal satelit Landsat 7, ki je od leta 2003 imel tehnične težave, ki so se v letih 2011 in 2012 tako poslabšale, da je bilo težko najti uporabne slike za ta obdobja. Po izstrelitvi satelita Landsat 8 leta 2013 je bilo mogoče ponovno izračunati indekse.

Slika 2 – Zemljevid območij, prizadetih v požarih, zaznanih na satelitskih slikah.

3 ZBIRKA MULTISPEKTRALNIH SLIK IZ DRONOV IN 3D OBLAKOV TOČK

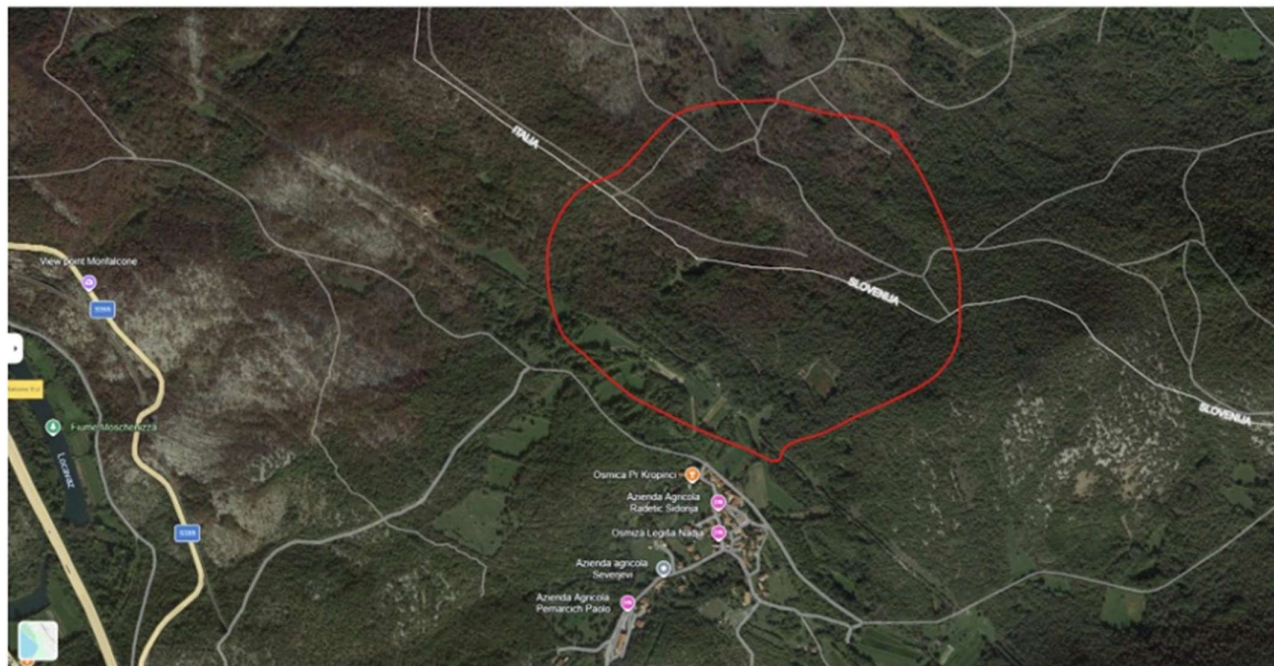
3.1 MULTISPEKTRALNE SLIKE Z DRONI

V okviru projekta smo spremljali razmere na dveh lokacijah na zahodnem robu občine Miren-Kostanjevica. Prva se nahaja jugovzhodno od Nove vasi, druga pa ob državni meji severno od hriba Kremenjak (236 m). Podatke smo zbrali na terenu v različnih letnih obdobjih: 27. maja 2025 (pomlad), 16. julija 2025 (poletje), 7. novembra 2025 (jesen) in 13. februarja 2026 (zima).



Slika 3 – Pilotna območja za sezonsko spremljanje z droni v občini Miren-Kostanjevica.

Poleg tega smo izvedli pilotno snemanje na daljavo z droni v občini Devin-Nabrežina, natančneje v Medjevasi, blizu italijansko-slovenske meje. Doslej smo izvedli le eno snemanje, saj občina Devin-Nabrežina pred tem še ni določila pilotnega območja.



Slika 4 – Pilotno območje za snemanje z droni v bližini Medjevasov v občini Devin-Nabrežina.

3.2 ARHIVIRANJE BAZE PODATKOV ZAPISOV Z DRONI

Dostop do zbirke posnetkov, posnetih z droni:

<https://oblak.zrc-sazu.si/index.php/s/Wx8LWpPTEam8ZHt>

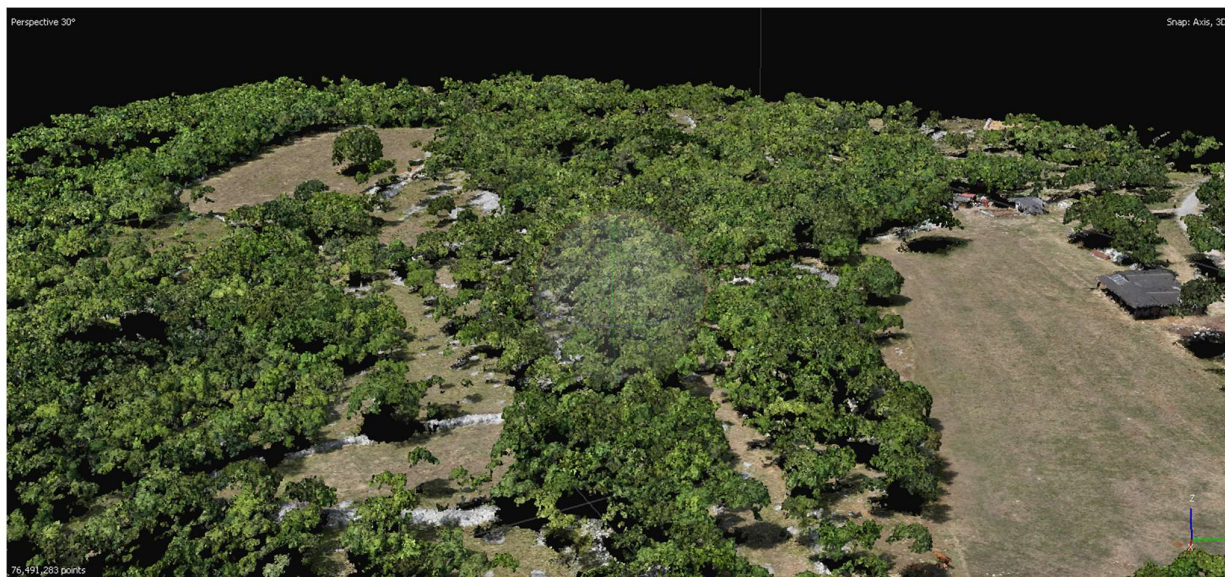
KARSTFW Prejmi ?

Javna objava

Vrsta Spremenjeno

☐	Ime	File type	Veli...	Spreme...
☐	kremenjak_20250527_navadna_d96_popravljeno.tif	TIFF image	3,7 GB	11. januar
☐	novava_20250527_oblak_tock.ias	Unknown file type	2,8 GB	pred 2 tednoma
☐	novavas_20250527_infrardeca_d96_popravljena.tif	TIFF image	271,8 MB	10. januar
☐	novavas_20250527_infrardeca_d96_popravljena.tif.aux.xml	XML document	4 KB	pred 2 tednoma
☐	novavas_20250527_navadna_d96_popravljena.tif	TIFF image	1,2 GB	12. januar
☐	novavas_20250527_navadna_d96_popravljena.tif.aux.xml	XML document	10 KB	pred 2 tednoma
☐	novavas_20250527_NDVI_d96.tifw	Unknown file type	< 1 KB	pred 2 tednoma
☐	novavas_20250527_NDVI_d96.tif	TIFF image	1,6 GB	pred 2 tednoma
☐	novavas_20250527_NDVI_d96.tif.ovr	Unknown file type	180,6 MB	pred 2 tednoma
☐	novavas_20250527_NDVI_d96.tif.aux.xml	XML document	4 KB	pred 2 tednoma
☐	novavas_20250527_rdeca_d96_popravljena.tif	TIFF image	268,1 MB	10. januar
☐	novavas_20250527_rdeca_d96_popravljena.tif.aux.xml	XML document	4 KB	pred 2 tednoma

Slika 5 – Posnetek zaslona spletnega arhiva za zbirko podatkov daljinskega zaznavanja.

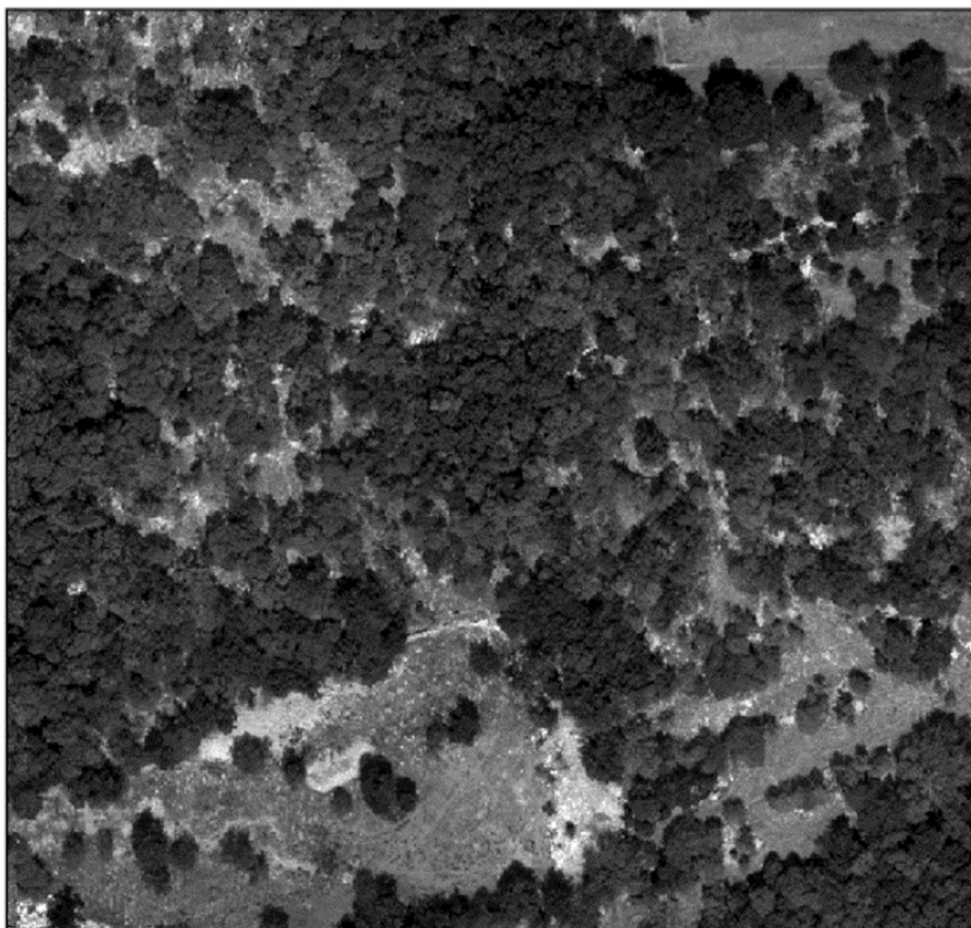


Slika 6 – Primer oblaka točk, pridobljenega iz slik, posnetih z optično kamero in fotogrametrično obdelanih za območje Nove vasi (poletno obdobje).



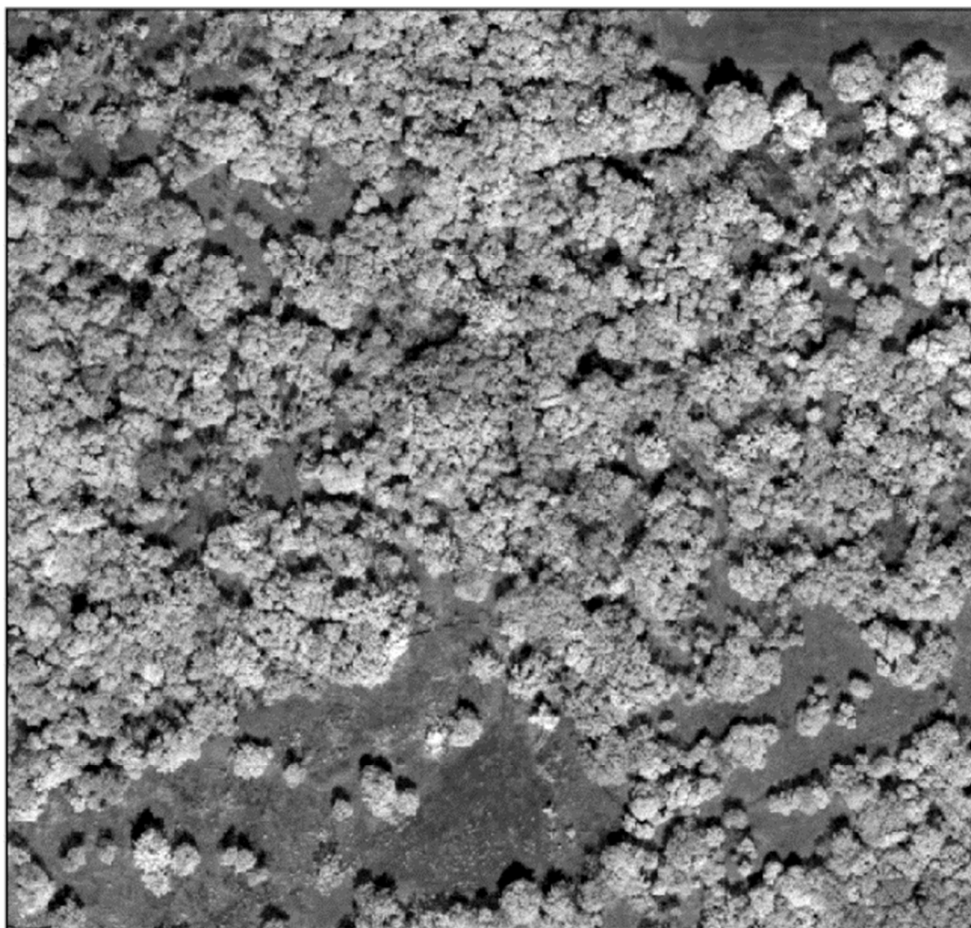
0 10 20 30 m

Slika 7 – Primer ortofotografije, pridobljene iz slik, posnetih s standardno optično kamero za območje Nove vasi poleti.



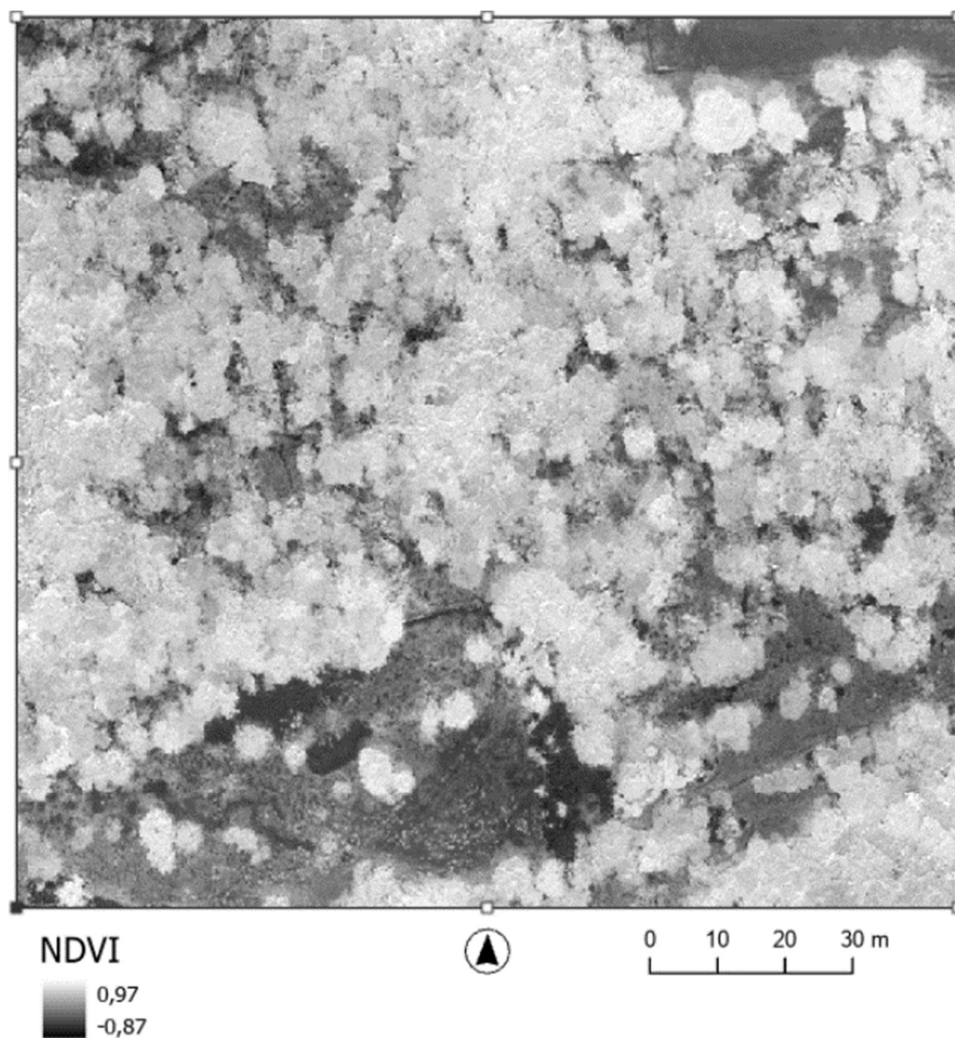
0 10 20 30 m

Slika 8 – Primer ortofotografije, pridobljene iz slik rdečega spektra kamere za območje Nove vasi poleti.



0 10 20 30 m

Slika 9 – Primer ortofotografije, pridobljene iz slik infrardeče kamere za območje Nove vasi poleti.



Slika 10 – Primer vrednosti NDVI, izračunanih iz rdečega in infrardečega spektra za območje Nove vasi poleti. Višje vrednosti (svetlejši odtenki) predstavljajo vegetacijo, medtem ko nižje vrednosti (temnejši odtenki) predstavljajo druge površine, kot so skalnata tla ali suhozidi.

Ta baza podatkov je podpora za izdelavo D.2.3.2., nekateri podatki pa so delno na voljo na spletni platformi projekta.

4 ZBIRKA PODATKOV TELEDETEKCIJE NA PLATFORMI KARST FIREWALL

4.1 PREGLED PLATFORME

Spletna platforma Karst Firewall je spletni portal, ki ga je razvilo podjetje *Infordata Sistemi* v okviru projekta Karst Firewall 5.0 (izdelek D.2.1.1). Deluje kot osrednje vozlišče za dostop do podatkov, vizualizacijo in operativno odločanje v celotni čezmejni regiji Krasa. Platforma je dostopna na naslovu <https://karst.way.to.it> in ponuja celoten nabor orodij za spremljanje okolja, oceno tveganja gozdnih požarov in upravljanje naravnih nesreč.

Portal združuje podatke iz različnih virov, vključno z zemeljskimi meteorološkimi postajami (shranjene v časovni podatkovni bazi InfluxDB), satelitskimi slikami iz sistema Copernicus Dataspace, izdelki daljinskega zaznavanja, pridobljenimi z droni, in rezultati modela za napovedovanje tveganja požarov, ki temelji na avtomatskem učenju. Celoten opis arhitekture platforme, upravljanja uporabnikov (RBAC), zbiranja meteoroloških podatkov, sistema sprožanja obvestil, 3D-zemljevida in sheme baze podatkov je na voljo v D.2.1.1. Ta poglavje se osredotoča zlasti na to, kako so podatki daljinskega zaznavanja, opisani v poglavjih 2 in 3 tega dokumenta, na voljo prek platforme.

4.2 INTEGRACIJA PODATKOV DALJINSKEGA ZAZNAVANJA

Zbirka podatkov daljinskega zaznavanja, ki jo je pripravil ZRC-SAZU in vključuje poligone pogorelih območij, pridobljene iz satelitov, multispektralne ortofotografije, posnete z droni, stopnje NDVI in 3D-točkovne oblake, je integrirana v platformo Karst Firewall prek niza namenskih ravni podatkov. Do teh plasti je mogoče dostopati prek interaktivnega 2D kartografskega vmesnika platforme (Dashboard), ki temelji **na sistemu Copernicus Dataspace** in podpira tako standardno spletno kartografijo (Leaflet/OpenStreetMap) kot tudi neposredno integracijo s storitvami podatkov Sentinel Evropske vesoljske agencije.

Platforma organizira podatke daljinskega zaznavanja v naslednje tematske plasti, od katerih lahko uporabnik vsako vklopi ali izklopi prek nadzorne plošče plasti na desni strani kartografskega vmesnika.

Tabela 1 – Opis ravni (slojev) daljinskega zaznavanja, integriranih v platformo Karst Firewall.

Ime plasti	Opis
Satelit	Okvirji satelitskih slik Sentinel-2 iz programa Copernicus, ki zagotavljajo vizualno referenco ozemlja s prostorsko ločljivostjo do 10 m. Redno se posodablja preko API ekosistema Copernicus Dataspace.
NDVI	Raven normaliziranega indeksa vegetacije (NDVI), izpeljana iz spektralnih pasov Sentinel-2 (rdeči in bližnji infrardeči). Zagotavlja sinoptičen pregled zdravstvenega stanja vegetacije na območju študije, pri čemer dopolnjuje visokoločljive izdelke NDVI na podlagi dronov, opisane v poglavju 3.
Pogorela območja	Zgodovinski obsegi požarov, pridobljeni z analizo satelitskih posnetkov, opisano v poglavju 2.2, vključno s 171 poligoni požarov, ustvarjenimi z uporabo indeksov dBAIS2 in dBAI. Ti poligoni so prikazani kot vektorske prekrivne plasti na zemljevidu.
Ožgana območja Sentinel	Produkti v zvezi z pogorelimi območji, ki izhajajo neposredno iz storitve Copernicus za upravljanje izrednih razmer ali iz obdelave podatkov Sentinel-2 v skoraj realnem času, ki zagotavljajo neodvisen referenčni niz podatkov za validacijo in primerjavo s kartiranjem pogorelih območij, specifičnim za projekt.
Aktivni požari	Zaznave aktivnih požarov v skoraj realnem času iz satelitskih storitev za zaznavanje toplotnih anomalij (npr. FIRMS/MODIS, VIIRS), prikazane kot točkovni elementi na zemljevidu.
Videoposnetki	Vključitev video posnetkov iz nadzornih kamer, nameščenih na območju študije, za podporo vizualnemu spremljanju območij, ogroženih s požari.

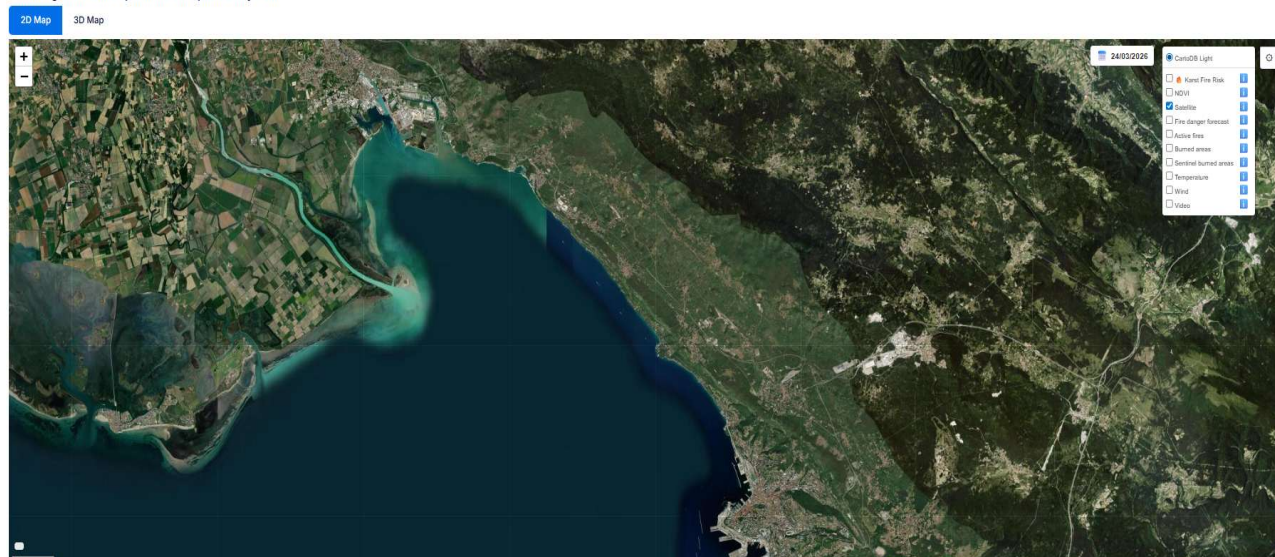
Poleg zgoraj navedenih ravni daljinskega zaznavanja platforma vključuje različne meteorološke ravni in ravni požarne nevarnosti, ki zagotavljajo okoljski kontekst za interpretacijo podatkov daljinskega zaznavanja.

Tabela 2 – Informacijske plasti v zvezi z meteorološkim kontekstom in napovedjo tveganja za požar.

Ime ravni	Opis
Napoved nevarnosti požara	Raven napovedi meteorološkega indeksa požarne nevarnosti (FWI), ki prikazuje prostorsko porazdelitev nevarnosti požara na območju študije z uporabo barvne klasifikacije. FWI se izračuna iz meteoroloških podatkov po metodologiji kanadskega meteorološkega indeksa požarne nevarnosti.
Nevarnost kraških požarov	Dnevni zemljevid tveganja za nastanek gozdnih požarov, ki ga je pripravil model napovedi na podlagi strojnega učenja (glej poglavje 4.5). Ta raven prikazuje predvideno verjetnost nastanka požarov na mreži s približno 40.000 točkami, ki pokriva območje študije.
Temperatura	Prostorska interpolacija temperaturnih meritev iz mreže meteoroloških postaj, ki zagotavlja toplotni kontekst v realnem času.
Veter	Podatki o hitrosti in smeri vetra iz meteoroloških postaj, ki so ključni za oceno potenciala širjenja požarov v regiji Kras, kjer redno piha bora.

Vse plasti podpirajo izbiro datuma prek izbirnika datumov, kar uporabnikom omogoča ogled zgodovinskih podatkov za kateri koli razpoložljivi datum. Vmesnik zemljevida ponuja tudi izbirnik osnovnih plasti (npr. CartoDBLight, OpenStreetMap) in standardne navigacijske nadzorne elemente (povečava, premikanje).

Web Integration with Copernicus Dataspace Ecosystem



Slika 11 – Posnetek zaslona nadzorne plošče platforme Karst Firewall, ki prikazuje osnovno satelitsko plast iz ekosistema Copernicus Dataspace, s ploščo za nadzor plasti in izbirnikom datumov, vidnima na desni strani vmesnika.

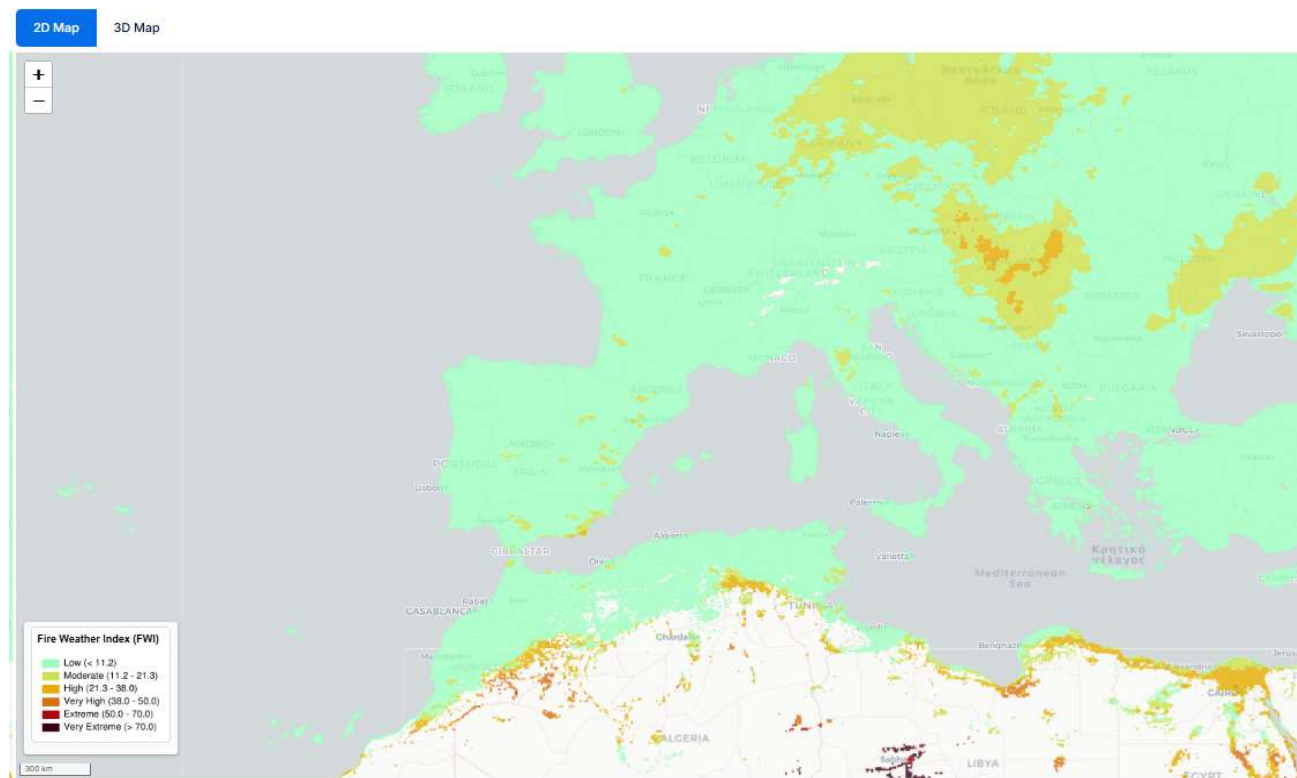
4.3 INTERAKTIVNI 2D ZEMLJEVID IN PRIKAZ PODATKOV

Glavni vmesnik za dostop do baze podatkov daljinskega zaznavanja je stran **Nadzorna** plošča platforme, ki prikazuje interaktivni zemljevid v polnem zaslonu. Zemljevid ponuja dva načina prikazovanja:

- **2D zemljevid:** standardni spletni kartografski prikaz, ki uporablja Leaflet.js in ploščice OpenStreetMap/CartoDB ter podpira vse tematske plasti, opisane v poglavju 4.2. To je privzeti prikaz za vsakodnevno operativno uporabo.
- **3D zemljevid:** tridimenzionalni pogled na zemljo, ki temelji na Cesiumu in omogoča prikaz požarov, meteoroloških postaj in požarnih območij, prilagojen terenom. Ta način podpira napredno filtriranje po datumu, časovnem obdobju in ID dogodka ter neposredno interakcijo s podatki o dogodkih in postajah.

Ko se aktivira raven daljinskega zaznavanja (npr. raven napovedi nevarnosti požara), se ustrezni podatki prikažejo kot barvno kodirana prekrivna plast na zemljevidu. V levem spodnjem kotu zemljevida se samodejno prikaže legenda, ki prikazuje pragove razvrščanja

in barvno lestvico za aktivno raven. Uporabniki lahko kliknejo na posamezne elemente na zemljevidu (vremenske postaje, požari, mrežne celice), da v pojavnih oknih dostopajo do podrobnih informacij. Za vremenske postaje to vključuje najnovejše razpoložljive vremenske parametre (temperatura, vlažnost, hitrost vetra, padavine). Za požare vključuje lokacijske koordinate, datume začetka in konca ter ocenjeno pogorelo površino.



Slika 12 – Napovedna raven meteorološkega indeksa požarne nevarnosti (FWI), prikazana na platformi Karst Firewall, ki prikazuje prostorsko porazdelitev požarne nevarnosti v Evropi in sredozemski regiji. Legenda v spodnjem levem kotu prikazuje šest razredov nevarnosti od nizke (< 11,2) do zelo ekstremne (> 70,0).

4.4 RAVEN NAPOVEDI NEVARNOSTI POŽARA

Raven napovedi nevarnosti požara zagotavlja prostorsko predstavitev meteorološkega indeksa požara (FWI) na območju študije. FWI se izračuna dnevno z uporabo meteoroloških podatkov, zbranih iz mreže meteoroloških postaj, integriranih v platformo (glej D.2.1.1, oddelek 4.3). Izračun sledi metodologiji kanadskega meteorološkega indeksa požarne nevarnosti, ki združuje temperaturo, relativno vlažnost, hitrost vetra in padavine v enoten

številčni indeks, ki predstavlja meteorološko nevarnost požara. Vrednosti FWI so razvrščene v šest stopenj nevarnosti, od katerih je vsaka na zemljevidu označena z določeno barvo.

Tabela 3 – Razredi nevarnosti v primerjavi z ustreznimi razponi FWI

Razred nevarnosti	Razpon FWI	Barva na zemljevidu
Nizka	< 11,2	Svetlo zelena
Zmerno	11,2 – 21,3	Rumena
Visoko	21,3 – 38,0	Oranžna
Zelo visoko	38,0 – 50,0	Rdeča
Ekstremno	50,0 – 70,0	Temno rdeča
Zelo ekstremno	> 70,0	Temno rjava/rdečkasto rjava

Ta razvrstitev omogoča operativnim uporabnikom, da hitro ocenijo trenutno nevarnost požara v celotni regiji Krasa. Stopnja FWI se posodablja dnevno in jo je mogoče prikazati za kateri koli pretekli datum prek izbirnika datumov. V kombinaciji s stopnjo požarne nevarnosti na Krasu in stopnjo pogorelih površin zagotavlja celovito sliko tako trenutnih vremenskih razmer, ki spodbujajo požare, kot tudi

zgodovinski modeli požarov. Podatki daljinskega zaznavanja, vgrajeni v platformo, neposredno podpirajo skupne čezmejne sisteme zgodnjega odkrivanja in obvladovanja eskalacije, predvidene v projektu. Območja, na katerih so v preteklosti izbruhnili požari, služijo kot podatki za usposabljanje modela za strojno učenje. Ko so presežene mejne vrednosti nevarnosti požara, sistem za sprožanje obvestil platforme (podrobno opisan v D.2.1.1) samodejno generira alarme, ki se posredujejo zainteresiranim stranem – vključno z

vladnimi agencijami in ekipami za hitro posredovanje tako na italijanski kot na slovenski strani – prek konfigurativnih komunikacijskih kanalov (e-pošta, SMS, WhatsApp). Ta integracija podatkov daljinskega zaznavanja, prediktivnega modeliranja in avtomatiziranega opozarjanja zagotavlja neprekinjeno verigo od spremljanja okolja do operativnega odziva v celotni čezmejni kraški regiji.

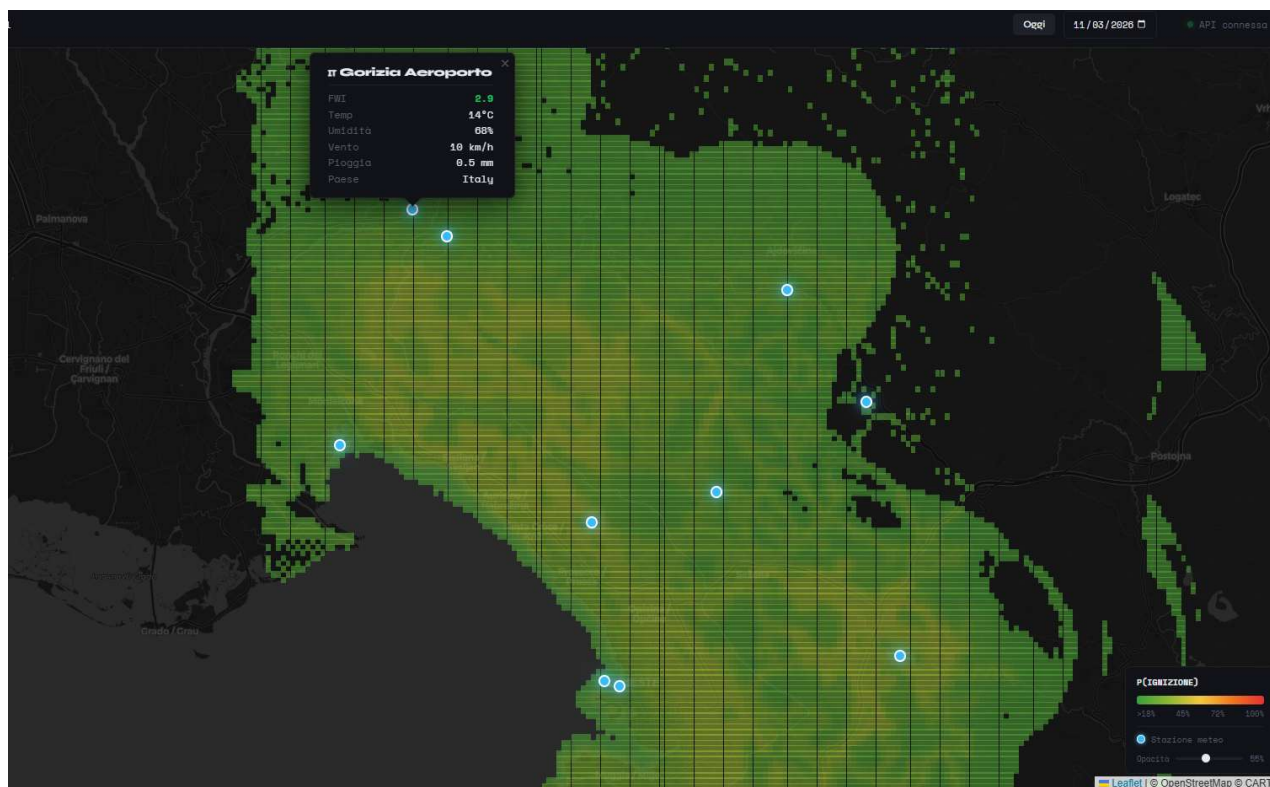
4.5 INTEGRACIJA Z MODELOM NAPOVEDI TVEGANJA POŽARA

Poleg napovedi nevarnosti požara, ki temeljijo na indeksu FWI, platforma vključuje **model napovedovanja tveganja požara, ki temelji na avtomatskem učenju** in je bil razvit v okviru projekta Karst Firewall 5.0. Ta model, dostopen prek plasti **Karst Fire Risk** na 2D zemljevidu, zagotavlja dopolnilno in podrobnejšo oceno verjetnosti izbruha gozdnih požarov na območju študije.

4.5.1 PREGLED MODELA

Sistem napovedovanja uporablja dvofazni pristop. Prva faza uporablja klasifikator Random Forest, usposobljen na podlagi zgodovinskih podatkov o požarih od leta 1995 do 2024 (dogodki tako na italijanski kot na slovenski strani Krasa). Za vsako točko mreže s približno 40.000 točkami, ki pokriva območje študije, model napoveduje verjetnost nastanka požara na podlagi prostorskih značilnosti (bližina cest, železnic, električnih vodov in zgodovinskih žarišč požarov) ter časovnih značilnosti (mesec, dan v tednu, letni čas). Model doseže površino pod krivuljo ROC (AUC) 0,854 na testnih podatkih, ki so bili izključeni, kar kaže na močno razlikovalno zmogljivost.

V drugi fazi se uporabi **popravek resnosti** na podlagi meteorološkega indeksa požara (FWI). Dnevna vrednost FWI, izračunana na podlagi dejanskih meteoroloških podatkov iz mreže meteoroloških postaj, modulira osnovno verjetnost vžiga, da se ustvari končna sestavljena ocena tveganja za vsako točko mreže. Ta ocena se nato razvrsti v stopnje opozoril (RDEČA – visoka prioriteta, RUMENA – zmerno tveganje, ki zahteva spremljanje, ZELENA – nizko tveganje).



Slika 13 – Raven »Karst Fire Risk« na platformi, ki prikazuje dnevni zemljevid verjetnosti izbruha gozdnih požarov, ki ga je ustvaril model strojnega učenja na mreži s približno 40.000 točkami. Kazalniki meteoroloških postaj (modre točke) prikazujejo meteorološke podatke v realnem času v pojavnih oknih, vključno z FWI, temperaturo, vlažnostjo, hitrostjo vetra in padavinami.

4.5.2 POSTOPEK

Postopek za napovedovanje tveganja požara se izvaja samodejno vsak dan. Sistem pridobi najnovejša meteorološka opazovanja iz API-ja Open-Meteo za vse meteorološke postaje v omrežju, izračuna komponente FWI, izvede model Random Forest na celotni mreži 40.000 točk in ustvari dve izhodni datoteki: kratek povzetek v formatu JSON, ki vsebuje regionalno stopnjo opozorila, vrednosti FWI in število območij, ter popolno datoteko GeoJSON, ki vsebuje oceno tveganja za vsako točko mreže.

Postopek uporablja Docker in je voden prek Docker Compose, kar zagotavlja ponovljivo in dosledno izvajanje v vseh okoljih. Sistem je razporejen na namenskem strežniku z mehanizmom proti mirovanju, da se zagotovi neprekinjeno vsakodnevno delovanje.

4.6 DOSTOPNOST IN INTEROPERABILNOST PODATKOV

Vsi podatki daljinskega zaznavanja in rezultati v zvezi s tveganjem požara, integrirani v platformo Karst Firewall, so zasnovani za interoperabilnost z zunanjimi sistemi. Platforma sledi standardnim HTTP-konvencijam in vrača podatke v široko podprtih formatih (JSON, GeoJSON), kar omogoča integracijo s GIS-orodji tretjih oseb, sistemi zgodnjega opozarjanja in platformami za podporo odločanju, ki jih uporabljajo agencije za civilno zaščito na obeh straneh meje.

Proizvodi daljinskega zaznavanja, pridobljeni z droni (multispektralne ortofotografije, ravni NDVI, oblaki točk), ki jih proizvaja ZRC-SAZU, so shranjeni v oblačnem repozitoriju ZRC-SAZU (<https://oblak.zrc-sazu.si/index.php/s/Wx8LWpTEam8ZHt>) v standardnih geoprostorskih formatih (GeoTIFF za rastrske sloje, LAS za oblake točk). Nekateri izbrani izdelki so objavljeni tudi na spletni platformi Karst Firewall za neposredno vizualizacijo, kar zagotavlja podporo tako za podrobno analizo (prek prenosa) kot za operativni pregled (prek spletnega portala).

Poligoni pogorelih območij, pridobljeni iz satelitskih podatkov (PRILOGA2.zip, glej poglavje 2.3), so na voljo kot shapefile in se na kartografskem vmesniku platforme prikazujejo kot vektorske prekrivne plasti. Zbirka podatkov satelitskih posnetkov (PRILOGA1.xls, glej poglavje 2.1) vsebuje popoln seznam vseh posnetkov Sentinel-2 in Landsat, uporabljenih v analizi, s neposrednimi sklici na arhiv Google Earth Engine za popoln dostop do posnetkov

5 VIRI IN LITERATURA

Chuvieco, E., Martín, M. P., & Palacios, A. (2002). Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23), 5103–5110. <https://doi.org/10.1080/01431160210153129>

Filipponi, F. (2018, March 18). BAIS2: Burned Area Index for Sentinel-2 †. 2nd International Electronic Conference on Remote Sensing. <https://doi.org/10.3390/ecrs-2-05177>

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)