

DATASET PER LA PREVENZIONE DEGLI INCENDI BOSCHIVI CON DATI STORICI DELL'ECOSISTEMA CARSICO

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-D212
Titolo del documento / Naslov dokumenta:	DATASET PER LA PREVENZIONE DEGLI INCENDI BOSCHIVI CON DATI STORICI DELL'ECOSISTEMA CARSICO
Work Package:	2
Attività / Aktivnost:	1.2
Partner responsabili (autori) / Odgovorni partnerji (avtorji):	Infodata Sistemi (Petelin, Marko; Zidaric, Samuel; Zuccato, Nicola) ZRC SAZU (Čonč, Špela; Breg Valjavec, Mateja; Ciglič, Rok)
Luogo e data di pubblicazione / Kraj in datum objave:	Trieste, 25/03/2026

INDICE

1 ABSTRACT.....	7
2 OBIETTIVI E SCOPO.....	8
2.1 OBIETTIVI PRINCIPALI.....	8
2.3 PERIODO TEMPORALE	9
3 LA SFIDA DELL'INTEGRAZIONE TRANSFRONTALIERA.....	9
3.1 UN MOSAICO DI DATI DA RICOMPORRE.....	9
3.2 IL PROCESSO DI ARMONIZZAZIONE	10
3.5 NUMERI CHE RACCONTANO UNA STORIA.....	12
4 DATI GEOSPAZIALI STORICI.....	13
4.1 USO DEL SUOLO E COPERTURA TERRITORIALE.....	13
4.2 MODELLI DIGITALI DEL TERRENO (DTM).....	13
4.3 RETE VIARIA E INFRASTRUTTURE DI ACCESSO.....	14
4.4 VEGETAZIONE ED ECOSISTEMI FORESTALI	14
4.5 GRIGLIA DI LAVORO E RISOLUZIONE.....	14

5 DATI METEOROLOGICI E CLIMATICI	15
5.1 RETE DI STAZIONI METEOROLOGICHE	15
5.2 PARAMETRI METEOROLOGICI MISURATI	16
5.3 COPERTURA TEMPORALE E PARAMETRI PER STAZIONE	17
5.4 INDICI METEOROLOGICI DERIVATI.....	21
5.5 DATI CLIMATICI STORICI	22
5.6 PROIEZIONI CLIMATICHE	22
6 LA MEMORIA STORICA DEGLI INCENDI: 30 ANNI DI EVENTI DOCUMENTATI.....	23
6.1 DUE SISTEMI, UNA STRATEGIA	23
6.2 UN DATABASE CHE RACCONTA 3,958 STORIE	23
6.3 PATTERN CHE EMERGONO DAI DATI.....	25
6.4 LA VALIDAZIONE EUROPEA: OLTRE I CONFINI REGIONALI	26
6.5 CARATTERISTICHE QUANTITATIVE	28
7 DATI PREDITTIVI GENERATI DALL'IA.....	28
7.1 MODELLI DI MACHINE LEARNING IMPLEMENTATI.....	28
7.2 FINESTRA TEMPORALE OTTIMALE.....	29
7.3 IMPORTANZA DELLE CARATTERISTICHE	29

7.4 OUTPUT PREDITTIVI GENERATI	30
7.5 VALIDAZIONE E PERFORMANCE	30
8 STRUTTURA TECNICA E ORGANIZZAZIONE	31
8.1 ORGANIZZAZIONE DELLE DIRECTORY	31
8.2 FORMATI DI DATI SUPPORTATI.....	32
8.3 SISTEMI DI COORDINATE	33
8.4 CONVENZIONI PER LA NOMENCLATURA.....	33
8.5 AGGIORNAMENTI.....	34
9 STANDARD E METADATI	34
9.1 CONFORMITÀ AGLI STANDARD EUROPEI	34
9.2 STRUTTURA DEI METADATI	36
9.3 CATOLOGO DEI METADATI.....	37
9.4 DOCUMENTAZIONE SULLA QUALITÀ	37
10 CONTROLLI DI QUALITÀ E VALIDAZIONE	38
10.1 METODOLOGIE DI CONTROLLO QUALITÀ	38
10.2 RISULTATI DEI CONTROLLI QUALITÀ.....	38
10.3 PROCEDURE DI VALIDAZIONE	43

11.4 LIMITAZIONI E INCERTEZZE.....	44
11 CONCLUSIONI	45
11.1 SINTESI RISULTATI	45
11.2 INNOVAZIONI SIGNIFICATIVE	46
11.3 IMPATTI ATTESI	46
11.4 SVILUPPI FUTURI.....	47

1 ABSTRACT

Quando un incendio attraversa il confine tra Italia e Slovenia nella regione carsica, non riconosce le barriere amministrative. Per decenni, i dati meteorologici, le registrazioni degli incendi e le informazioni territoriali sono rimasti frammentati su entrambi i lati del confine, limitando la capacità di comprendere e prevedere questi eventi distruttivi che minacciano un ecosistema unico e vulnerabile.

Il deliverable D.2.1.2 racconta la storia di come il progetto Karst Firewall 5.0 ha trasformato questa frammentazione in una risorsa integrata di valore europeo. Attraverso una collaborazione tra istituti italiani e sloveni, siamo riusciti a creare il primo dataset transfrontaliero completo per la prevenzione degli incendi boschivi nell'ecosistema carsico, integrando oltre 5.229.216 record meteorologici storici, 3.958 segnalazioni di incendi boschivi e 50+ layer geospaziali ad alta risoluzione che coprono il periodo dal 1991 al 2024.

Questo non è semplicemente un archivio di dati storici, ma un sistema vivo e operativo. Con campionamento misto 30-60 minuti, 22 stazioni meteorologiche distribuite strategicamente nell'area carsica alimentano algoritmi di intelligenza artificiale che raggiungono il 97% di accuratezza nella previsione del rischio incendi. Le registrazioni dettagliate fornite dal Corpo Forestale di Duino-Aurisina e dallo Zavod za gozdove Slovenije (ZGS) sono state armonizzate in un database relazionale che traccia ogni aspetto degli interventi antincendio, dalla prima segnalazione ai costi finali di ripristino.

Il viaggio verso questa integrazione non è stato semplice. Armonizzare dati provenienti da sistemi diversi - con coordinate Slovenia D96/TM da un lato e UTM 33N dall'altro, registrazioni incendi con metodologie nazionali differenti, serie temporali meteorologiche con gaps e discontinuità. Ogni dataset è stato validato, georeferenziato e standardizzato secondo le direttive europee INSPIRE, creando per la prima volta una base dati veramente transfrontaliera.

L'aspetto più innovativo è l'integrazione operativa con gli algoritmi di intelligenza artificiale sviluppati nel deliverable D.1.2.1. I modelli XGBoost e Random Forest, addestrati su questa ricchezza di dati storici, non solo predicono il rischio incendi con precisione del 97%, ma si

alimentano continuamente dai flussi real-time della rete meteorologica, rendendo il sistema una risorsa viva per la gestione delle emergenze.

Oggi, attraverso la piattaforma digitale Karst Firewall 5.0, questo dataset supporta ricerca scientifica, pianificazione territoriale e sistemi di allerta precoce, rappresentando un modello replicabile per altre regioni transfrontaliere europee. La struttura del dataset è progettata per fornire una base dati affidabile per strategie di adattamento ai cambiamenti climatici e mitigazione del rischio incendi, con impatti che si estendono ben oltre i confini regionali del progetto.

2 OBIETTIVI E SCOPO

2.1 OBIETTIVI PRINCIPALI

Il dataset per la prevenzione degli incendi boschivi con dati storici dell'ecosistema carsico è stato sviluppato per raggiungere i seguenti obiettivi strategici:

Supporto alla ricerca scientifica: Fornire una base dati completa e standardizzata per studi sui pattern storici degli incendi, analisi climatiche e ricerca sui cambiamenti ambientali dell'ecosistema carsico.

Pianificazione territoriale e gestione del rischio: Abilitare autorità locali e regionali nell'identificazione di aree ad alto rischio, pianificazione di interventi preventivi e sviluppo di strategie di adattamento ai cambiamenti climatici.

Sistemi operativi di allerta precoce: Fornire i dati di base per l'alimentazione di algoritmi predittivi e sistemi automatizzati di rilevamento e notifica del rischio incendi.

Cooperazione transfrontaliera: Facilitare la condivisione di informazioni e il coordinamento delle attività di prevenzione e risposta tra Italia e Slovenia nella regione carsica.

2.2 AREA DI STUDIO

Il dataset copre la regione carsica transfrontaliera che si estende tra:

- Lato italiano: Province di Trieste e Gorizia (Regione Friuli Venezia Giulia).
- Lato sloveno: Regioni amministrative di Goriška e Obalno-kraška.

L'area di studio è caratterizzata da un ecosistema carsico unico con formazioni rocciose calcaree, vegetazione mediterranea e continentale, e condizioni microclimatiche specifiche che influenzano significativamente il comportamento e la propagazione degli incendi boschivi.

2.3 PERIODO TEMPORALE

Il dataset integra dati storici che coprono un arco temporale di oltre 30 anni:

- Dati meteorologici: dal 1991 al 2024 (con copertura variabile per stazione).
- Registrazioni incendi: dal 1995 al 2023.
- Dati geospaziali: dataset più recenti disponibili (2020-2024).

3 LA SFIDA DELL'INTEGRAZIONE TRANSFRONTALIERA

3.1 UN MOSAICO DI DATI DA RICOMPORRE

Quando il progetto Karst Firewall 5.0 ha iniziato a raccogliere i dati esistenti nel 2024, ci siamo trovati di fronte a un paesaggio informativo frammentato che rispecchia le divisioni amministrative piuttosto che la realtà ecologica dell'ecosistema carsico.

Sul lato italiano, l'ARPA FVG aveva accumulato dati meteorologici accurati dalle sue stazioni costiere e interne, mentre il Corpo Forestale di Duino-Aurisina manteneva registrazioni

dettagliate degli interventi antincendio in formato cartaceo e database locali. Attraverso il confine, l'ARSO sloveno operava la sua rete di stazioni con standard tecnici comparabili ma sistemi di coordinate e protocolli di acquisizione diversi, mentre lo Zavod za gozdove Slovenije documenta ogni incendio forestale attraverso il suo portale online avanzato.

Il risultato era un tesoro di informazioni - oltre 5 milioni di record meteorologici distribuiti su 22 stazioni, 3.958 eventi di incendio accuratamente documentati - ma isolato in silos nazionali che impedivano una comprensione integrata dei fenomeni che non riconoscono confini.

3.2 IL PROCESSO DI ARMONIZZAZIONE

La trasformazione di questo mosaico in un dataset coerente ha richiesto un approccio metodico su più livelli. Il primo ostacolo è stato geometrico: i dati sloveni utilizzavano il sistema di coordinate Slovenia D96/TM (EPSG:3794), mentre quelli italiani erano prevalentemente in UTM 33N (EPSG:32633). Ogni singolo punto, linea e poligono ha dovuto essere proiettato nel sistema unificato WGS84 (EPSG:4326), preservando al contempo la possibilità di ritornare ai sistemi originali per garantire la tracciabilità.

Ma le sfide tecniche erano solo la superficie. Dietro ogni dataset si nascondevano differenze metodologiche più profonde: i forestali italiani classificavano gli incendi secondo criteri che enfatizzano l'aspetto operativo dell'intervento, mentre i colleghi sloveni seguivano standard europei che privilegiano l'analisi ecologica post-evento. Entrambi gli approcci avevano valore scientifico, ma dovevano essere riconciliati in una struttura comune.

Il processo di armonizzazione ha coinvolto forestali, informatici e ricercatori, lavorando in gruppi di lavoro transfrontalieri che si incontrano periodicamente per risolvere discrepanze e standardizzare terminologie. Ogni decisione metodologica è stata documentata per garantire la riproducibilità e la comprensione futura delle scelte adottate.

3.3 DALLA FRAMMENTAZIONE ALL'ECCELLENZA OPERATIVA

Il dataset risultante non è semplicemente la somma delle sue parti. L'integrazione ha creato nuove possibilità analitiche: per la prima volta è possibile tracciare come un incendio iniziato nelle colline goriziane possa essere influenzato dalle condizioni meteorologiche registrate dalle stazioni costiere di Trieste, o come i pattern di ventilazione della valle dell'Isonzo influenzino la propagazione del fuoco attraverso il confine.

Questa ricchezza di dati integrati ha reso possibile lo sviluppo degli algoritmi di intelligenza artificiale descritti nel D.1.2.1, fornendo la diversità e la completezza necessarie per addestrare modelli predittivi con elevata accuratezza. Senza questa integrazione transfrontaliera, i modelli avrebbero sofferto di bias geografici e limitazioni nella rappresentatività degli eventi estremi.

3.4 STRUTTURA DEL DATASET INTEGRATO

Il dataset finale si articola in quattro categorie principali che insieme forniscono una rappresentazione completa dell'ecosistema carsico:

1. Dati Geospaziali Storici: La geografia del rischio, dalle strade forestali alle infrastrutture critiche.
2. Dati Meteorologici e Climatici: Il motore climatico degli incendi, con 34 anni di osservazioni continue.
3. Registrazioni Incendi Boschivi: La memoria storica degli eventi, ogni incendio documentato dal 1995 al 2023.
4. Dati Predittivi IA: L'intelligenza artificiale che trasforma i dati storici in previsioni operative.

3.5 NUMERI CHE RACCONTANO UNA STORIA

I numeri dietro questo dataset raccontano la storia dell'intensità del lavoro compiuto:

- 5,229,216 record meteorologici: Ogni campionamento 30-60 minuti registrato da 22 stazioni per oltre tre decenni.
- 3,958 eventi incendi: Ogni segnalazione, intervento e danno accuratamente documentato.
- 50+ layer geospaziali: Dalla topografia ad alta risoluzione alle reti di infrastrutture critiche.
- Risoluzione fino a 3m × 3m: Dettaglio sufficiente per pianificazione operativa di campo.
- Campionamento misto 30-60 minuti: Dati meteorologici con frequenza ARSO (30') e ARPA FVG (60') che alimentano continuamente i modelli predittivi.
- Superficie totale bruciata (1995–2023): 53.074 ha.
- Distribuzione asimmetrica: gli incendi grandi (>100 ha) sono lo 0.86% del numero di eventi ma spiegano 84.34% dell'area bruciata.
- Area media per evento: 13.41 ha (mediana < 1 ha).

Questa densità di informazioni - una stazione meteorologica ogni 66 km², copertura altimetrica completa dal mare ai 420m del monte Škocjan, rappresentatività di tutti gli ecosistemi carsici - garantisce che nessun aspetto rilevante del territorio sia trascurato nell'analisi del rischio incendi.

4 DATI GEOSPAZIALI STORICI

4.1 USO DEL SUOLO E COPERTURA TERRITORIALE

Lato Sloveno:

- Dataset: Graphical Land Use Data for Slovenia (Grafični podatki RABA).
- Formato: Shapefile (.shp).
- Sistema di coordinate: Slovenia D96/TM (convertito in EPSG:4326).
- Dettaglio: Scala regionale-nazionale (non pan-europea).
- Fonte: Ministry of Agriculture, Forestry and Food.
- Aggiornamento: Periodico secondo archivi nazionali.

Lato Italiano:

- Dataset: Carta della Natura Regionale FVG.
- Formato: Shapefile (.shp).
- Sistema di coordinate: EPSG:32633 (UTM 33N).
- Dettaglio: Classificazione secondo standard CORINE Land Cover.
- Fonte: Regione Friuli Venezia Giulia.
- Aggiornamento: Quinquennale.

4.2 MODELLI DIGITALI DEL TERRENO (DTM)

Alta Risoluzione:

- Risoluzione: 1m × 1m (disponibile per aree selezionate).
- Formato: XYZ, GeoTIFF.
- Accuratezza verticale: ± 0.15m.
- Fonte: Geodetic Administration of RS, Regione FVG.

4.3 RETE VIARIA E INFRASTRUTTURE DI ACCESSO

Sentieri e Tracce:

- Tipologie: Sentieri escursionistici, tracce forestali, vie tagliafuoco.
- Scala: 1:100,000 - 1:250,000.
- Fonte: Institute for Forests of Slovenia, Regione FVG.
- Attributi: Percorribilità, manutenzione, accessibilità emergenze.

Strade Forestali e Antincendio:

- Classificazione: Strade forestali, piste tagliafuoco, vie di fuga.
- Attributi: Larghezza, portata mezzi pesanti, stato manutenzione.
- Rilevanza: Fondamentale per pianificazione interventi preventivi e operativi.

4.4 VEGETAZIONE ED ECOSISTEMI FORESTALI

Popolamenti Forestali:

- Classificazione: Specie dominanti, età, densità, altezza.
- Scala: 1:50,000.
- Attributi: Infiammabilità, biomassa, stato fitosanitario.
- Fonte: Institute for Forests of Slovenia, Regione FVG.

4.5 GRIGLIA DI LAVORO E RISOLUZIONE

Tutti i layer predittori sono stati armonizzati su una griglia di lavoro comune di 3 m × 3 m. Le variabili topografiche (pendenza, esposizione, TPI, TWI) sono state calcolate a partire dal DTM a 1 m e successivamente aggregate a 3 m. I raster climatici CHELSA, con risoluzione nativa 1 km × 1 km, sono stati ricampionati a 3 m esclusivamente per

l'allineamento spaziale; la loro risoluzione effettiva resta ~1 km. I layer antropici e di uso/copertura del suolo disponibili in formato vettoriale sono stati rasterizzati a 3 m. Salvo diversa indicazione, tutte le analisi spaziali sono state condotte su tale griglia.

5 DATI METEOROLOGICI E CLIMATICI

5.1 RETE DI STAZIONI METEOROLOGICHE

Il dataset meteorologico si basa su una rete di 22 stazioni meteorologiche strategicamente distribuite nell'area carsica transfrontaliera:

Distribuzione Geografica:

- Slovenia: 12 stazioni (ARSO - Agencija RS za Okolje).
- Italia: 10 stazioni (ARPA FVG - Agenzia Regionale Protezione Ambiente).

Caratteristiche Altimetriche:

- Quota minima: 0 m s.l.m. (stazioni costiere).
- Quota massima: 420 m s.l.m. (Škocjan).
- Distribuzione: Rappresentativa di tutti i piani altimetrici carsici.

Note Tecniche: I timestamp sono registrati in local time; nella piattaforma e API i dati sono serviti in UTC (con offset automatico).

5.2 PARAMETRI METEOROLOGICI MISURATI

Ogni stazione acquisisce un subset dei seguenti parametri con campionamento misto 30-60 minuti (ARSO spesso a 30', ARPA FVG spesso a 60'):

Temperatura:

- Parametro: Temperatura dell'aria a 2m.
- Unità: °C.
- Accuratezza: $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.
- Copertura: 17/22 stazioni.

Umidità Relativa:

- Parametro: Umidità relativa dell'aria.
- Unità: %.
- Accuratezza: $\pm 2\%$.
- Copertura: 17/22 stazioni.

Precipitazioni:

- Parametro: Precipitazioni cumulate orarie.
- Unità: mm.
- Accuratezza: $\pm 0.1 \text{ mm}$ ($< 10\text{mm}$), $\pm 1\%$ ($> 10\text{mm}$).
- Copertura: 15/22 stazioni.

Vento:

- Parametri: Velocità media, raffica massima, direzione.
- Unità: m/s, gradi.
- Accuratezza: $\pm 0.1 \text{ m/s}$, $\pm 5^{\circ}$.
- Copertura: 17/22 stazioni per velocità media, 19/22 per raffica massima, 18/22 .per direzione

Radiazione Solare:

- Parametro: Radiazione solare globale.
- Unità: W/m².
- Accuratezza: ± 5%.
- Copertura: 11/22 stazioni.

Pressione Atmosferica:

- Parametro: Pressione al livello del mare.
- Unità: hPa.
- Accuratezza: ± 0.1 hPa.
- Copertura: 6/22 stazioni.

5.3 COPERTURA TEMPORALE E PARAMETRI PER STAZIONE

Tabella 1 - Stazioni meteorologiche della rete transfrontaliera Karst Firewall 5.0

Nome Stazione	Paese	N° Record	Primo Record	Ultimo Record	Anni	Parametri Disponibili
Ajdovščina Dolenje	SLO	559,824	1993-01-01	2024-12-31	32	T, H, P, WS, WD, WG
Bilje	SLO	572,880	1992-01-01	2024-12-31	33	T, H, P, WS, WD, WG, R, BP

Boja Zarja Tržaški zaliv	SLO	51,984	2022-01-01	2024-12-31	3	WG, WD
Boja Zora Debeli rtič	SLO	52,416	2022-01-01	2024-12-31	3	WG, WD
Godnje	SLO	155,712	2016-01-01	2024-12-31	9	T, H, P, WS, WD, WG, R
Koper Kapitanija	SLO	329,424	2006-01-01	2024-12-31	19	T, H, WS, WD, WG, R, BP
Koper Luka	SLO	561,792	1991-05-01	2024-12-31	33	T, H, P, WS, WD, WG
Nova Gorica	SLO	413,328	2001-01-08	2024-12-31	24	T, H, P, WS, WD, WG
Piran Boja	SLO	420,768	2001-01-01	2024-12-31	24	T, H, WS, WD, WG
Podnanos	SLO	157,824	2016-01-01	2024-12-31	9	T, H, P, WS, WD, WG

Škocjan Divača	SLO	350,640	2005-01-01	2024-12-31	20	T, H, P, WS, WD, WG, R, BP
Vedrijan	SLO	156,144	2016-01-01	2024-12-31	9	T, H, P, R
Gorizia Aeroporto	ITA	26,304	2022-01-01	2024-12-31	3	T, H, P, WS, WD, WG, R
Monfalcone Pluvio	ITA	78,912	2016-01-01	2024-12-31	9	T, H, P
Monfalcone New	ITA	78,888	2016-01-01	2024-12-31	9	T, H, WS, WD, WG, R
Monfalcone Old	ITA	140,256	2006-01-01	2021-12-31	16	T, H, P, WS, WD, WG, R, BP
Sgonico- Zgonik	ITA	289,296	1992-01-01	2024-12-31	33	T, H, P, WS, WD, WG, R, BP

Trieste Istituto Nautico	ITA	157,800	2007-01-01	2024-12-31	18	WS, WD, WG
Trieste molo Fratelli Bandiera	ITA	271,752	1994-01-01	2024-12-31	31	T, H, P, WS, WD, WG, R, BP
Muggia	ITA	166,560	2006-01-01	2024-12-31	19	WS, WD, WG
Muggia Pluvio	ITA	78,912	2016-01-01	2024-12-31	9	P
Trieste Cattinara	ITA	157,800	2007-01-01	2024-12-31	18	T, H, P, WS, WD, R

Legenda Parametri:

- T: Temperatura - H: Umidità - P: Precipitazioni.
- WS: Velocità vento - WD: Direzione vento - WG: Raffica massima.
- R: Radiazione solare - BP: Pressione atmosferica.

Tipologie di Stazioni:

- Boe marine: Boja Zarja e Boja Zora (solo vento, dal 2022); Piran Boja (T, H, WS, WD, WG; dal 2001).
- Pluvio-only (ID 21): solo precipitazioni.
- Aeroportuale (ID 13): campionamento orario dal 2022.
- Monfalcone Old/New (IDs 15-16): periodi sovrapposti, gruppo logico di stazione.

Statistiche Rete:

- Periodo complessivo: 1991-2024 (34 anni).
- Record totali: 5,229,216 misurazioni 30-60 minuti.
- Stazioni con 20+ anni dati: 8 stazioni.
- Campionamento: Misto 30' (ARSO) e 60' (ARPA FVG).

5.4 INDICI METEOROLOGICI DERIVATI

Fire Weather Index (FWI):

- Componenti: FFMC, DMC, DC, ISI, BUI.
- Frequenza: Giornaliera.
- Periodo: 1992-2024.
- Calcolo: Solo dove le variabili richieste sono disponibili; nessun riempimento con rianalisi in questa release.
- Utilizzo: Input principale per modelli predittivi IA.

Indici di Siccità:

- Palmer Drought Severity Index (PDSI): Mensile, calcolato per stazioni con T e P.
- Standardized Precipitation Index (SPI): 1, 3, 6, 12 mesi per stazioni pluviometriche.
- Consecutive Dry Days: Numero giorni consecutivi senza pioggia (soglia 0.1mm).

5.5 DATI CLIMATICI STORICI

Temperatura (1981-2010):

- Parametro: Temperatura media annua.
- Formato: Raster 1km × 1km.
- Fonte: ARSO Environmental Atlas.
- Trend: Aumento medio 0.57°C per decennio (1993-2023)*.

*Nota metodologica: trend calcolato da serie di stazione; i raster 1981-2010 sono solo di riferimento climatologico.

Precipitazioni (1981-2010):

- Parametro: Precipitazioni medie annuali corrette.
- Formato: Raster 1km × 1km (ai fini dell'integrazione con gli altri predittori, i raster CHELSA sono stati ricampionati sulla griglia di lavoro a 3 m (vedi §4.7), senza introdurre nuovo dettaglio spaziale).
- Fonte: ARSO Environmental Atlas.
- Range: 800-3000 mm/anno nell'area di studio.

5.6 PROIEZIONI CLIMATICHE

Scenari RCP (CMIP5):

- Periodi: 2040-2070, 2070-2100.
- Parametri: Temperatura, precipitazioni.
- Risoluzione: Stagionale.
- Modelli: Ensemble di modelli climatici regionali CMIP5.
- Utilizzo: Valutazioni rischio futuro, pianificazione adattamento.

Nota tecnica: Proiezioni RCP (CMIP5); migrazione a SSP/CMIP6 pianificata nel 2025 secondo gli standard correnti IPCC AR6.

6 LA MEMORIA STORICA DEGLI INCENDI: 30 ANNI DI EVENTI DOCUMENTATI

6.1 DUE SISTEMI, UNA STRATEGIA

La documentazione degli incendi boschivi nella regione carsica riflette due approcci nazionali che si sono evoluti indipendentemente per decenni. Sul lato italiano, il Corpo Forestale della Regione Friuli Venezia Giulia, con base operativa a Duino-Aurisina, ha sviluppato un sistema centrato sulla gestione operativa degli interventi, documentando meticolosamente ogni fase dalla prima segnalazione alla bonifica finale. La loro esperienza diretta del territorio - dalle pinete costiere alle lande carsiche dell'interno - si traduce in registrazioni ricche di dettagli operativi: tipo di mezzi utilizzati, ore di intervento, strategie di soppressione, costi sostenuti.

Dall'altro lato del confine, lo Zavod za gozdove Slovenije (ZGS) ha implementato un approccio più sistematizzato attraverso il portale online <https://prostor.zgs.gov.si/pregledovalnik/>, seguendo standard europei che enfatizzano l'analisi ecologica e la classificazione scientifica degli eventi. I forestali sloveni documentano con precisione le caratteristiche del combustibile, l'evoluzione del comportamento del fuoco e l'impatto ambientale a lungo termine.

Entrambi gli approcci catturano aspetti essenziali della realtà degli incendi, ma la loro integrazione ha richiesto la costruzione di un framework comune capace di preservare la ricchezza informativa di entrambe le tradizioni.

6.2 UN DATABASE CHE RACCONTA 3,958 STORIE

Il database integrato degli incendi boschivi rappresenta la memoria più completa mai assemblata per l'ecosistema carsico transfrontaliero. Ogni record delle 3,958 segnalazioni

dal 1995 al 2023 è costruito attorno a una struttura relazionale di 7 tabelle interconnesse che documentano:

Location (Localizzazione) - Il dove di ogni incendio: Non solo coordinate geografiche, ma il contesto territoriale completo. Ogni evento è georeferenziato con precisione variabile da ± 10 a ± 100 metri secondo la fonte, poi contestualizzato attraverso divisioni amministrative (paese, regione, provincia, comune), gestione forestale (area e unità competenti), caratteristiche fisiche del sito (pendenze, orientamento, altitudine, morfologia) e storia del territorio (zone precedentemente percorse da incendi).

Incident (Evento Incendio) - La cronologia e natura di ogni evento: Ogni incendio ha una sua identità unica attraverso codici nazionali e transfrontalieri. La documentazione temporale va oltre la semplice data di inizio/fine, includendo la durata totale, il giorno della settimana (per analisi di pattern antropici), la classificazione per tipo e intensità. La causalità viene investigata sistematicamente: naturale (principalmente fulmini), antropica (distinta in volontaria, involontaria, indeterminata), con dettagli sulla fonte di ignizione quando determinabile.

Intervention (Intervento) - La risposta operativa: Ogni minuto conta nella lotta agli incendi. Il database traccia i tempi di readiness (quanto tempo per attivare le squadre), l'inizio dell'intervento attivo, l'inizio delle operazioni di spegnimento e la fine completa delle operazioni inclusa la bonifica. Le tecniche utilizzate sono documentate dall'approccio iniziale alle strategie finali, includendo l'uso del controfuoco e l'efficacia percentuale della soppressione da parte dei servizi forestali.

Equipment (Attrezzature e Mezzi) - Le risorse mobilitate: Un inventario completo che va dalle autopompe tipo A e B ai droni per ricognizione. Il database distingue mezzi terrestri (fuoristrada, rimorchi, moduli antincendio), infrastrutture mobili (vasche portatili, mezzi movimento terra), risorse aeree (aeromobili ed elicotteri per estinzione, ricognizione, trasporto), tecnologie avanzate (droni sempre più utilizzati) e prodotti chimici specializzati (bagnanti, addensanti, schiume, ritardanti). Per ogni intervento è registrato il picco di utilizzo contemporaneo e le date di massimo impiego.

PersonnelInvolved (Personale Coinvolto) - Le persone dietro l'intervento: Dietro ogni operazione c'è una rete umana complessa. Il database documenta chi coordina (ente o persona responsabile), quanti operatori sono coinvolti per categoria (personale forestale, vigili del fuoco volontari e professionali, forze dell'ordine, forze armate, civili), le ore complessive di lavoro, i picchi di impiego. Questi dati rivelano l'intensità dello sforzo collettivo: in alcuni casi centinaia di persone mobilitate per giorni, migliaia di ore lavoro per eventi significativi.

Damage (Danni e Impatti) - Il costo degli incendi: La valutazione del danno va oltre la superficie bruciata. Il database quantifica i costi economici diretti (stima danni in euro, costi giornalieri di gestione emergenza), distingue le tipologie di combustione (percentuali di fuoco sotterraneo, radente, di chioma), dettaglia le superfici per tipologia forestale (conifere, latifoglie, miste, cedui, arbusteti), calcola la massa legnosa distrutta in metri cubi, distingue tra terre pubbliche e private, documenta l'impatto su aree protette e quantifica gli impatti sociali (persone evacuate, feriti, vittime, fonti idriche compromesse).

IncidentCharacteristics (Caratteristiche Evento) - L'analisi scientifica: Ogni incendio è anche un caso studio. Il database registra i dettagli tecnico-scientifici: l'ora della prima segnalazione, il giorno dell'anno della scoperta (per analisi stagionali), la fase di sviluppo al momento dell'intervento, la composizione forestale dettagliata, le specie dominanti (nome scientifico e locale), il comportamento del fuoco (velocità massima di propagazione, modello di combustibile), l'orientamento del punto di innesco rispetto ai versanti e le date di massima espansione.

6.3 PATTERN CHE EMERGONO DAI DATI

Quando si analizzano 3,958 eventi distribuiti su 30 anni, emergono pattern che rivelano tanto sulle dinamiche naturali quanto sui comportamenti umani. I numeri mostrano una realtà più complessa delle percezioni comuni:

La Geografia del Fuoco: Il 70% degli incendi si concentra sotto i 200m di altitudine, nelle zone di interfaccia urbano-rurale dove l'espansione dell'edificato incontra la vegetazione

naturale. Non è casualità: queste aree combinano maggior presenza umana (potenziali fonti di ignizione) con vegetazione spesso più secca e frammentata (propagazione facilitata). Le zone più colpite seguono infatti la geografia dell'insediamento: il Carso goriziano e triestino, dove decenni di espansione residenziale hanno creato una rete complessa di contatti tra costruito e naturale.

Il Calendario degli Incendi: Luglio e agosto concentrano il 45% degli eventi annuali, ma la stagione attiva si estende da maggio a settembre catturando l'85% del totale. L'inverno non è esente - meno del 5% degli eventi, ma prevalentemente di origine antropica, rivelando come l'elemento umano possa scavalcare i vincoli stagionali naturali. Il giorno della settimana negli incendi antropici mostra picchi nei weekend, quando maggiore è la pressione ricreativa sul territorio.

La Matematica del Danno: L'analisi di 3.958 eventi (1995–2023) conferma una distribuzione fortemente asimmetrica. L'area media per incendio è 13.41 ha (mediana < 1 ha). Gli incendi grandi (>100 ha) rappresentano solo 0.86% degli eventi, ma generano 84.34% della superficie totale bruciata, pari a 53,074 ha nel periodo considerato, con un singolo evento eccezionali che ha bruciato per 7 giorni consecutivi (168 ore registrate nel 2022).

Tempi di Risposta e Efficacia: Gli eventi piccoli (sotto 1 ettaro) vengono controllati mediamente in 2-4 ore, quelli medi (1-10 ettari) richiedono 6-12 ore, mentre i grandi incendi possono estendersi su 24-72 ore. Questi tempi riflettono non solo l'intensità del fenomeno, ma l'efficacia del sistema di risposta che si è evoluto negli anni attraverso l'esperienza accumulata.

6.4 LA VALIDAZIONE EUROPEA: OLTRE I CONFINI REGIONALI

Il dataset non opera in isolamento, ma si integra attivamente con i principali sistemi informativi europei sugli incendi boschivi. Questa integrazione serve sia per la validazione incrociata dei dati locali, sia per contribuire alla conoscenza a scala continentale.

EFFIS (European Forest Fire Information System) fornisce il benchmark europeo:

- I perimetri degli incendi maggiori vengono confrontati automaticamente con i dati EFFIS Burnt Areas aggiornati quasi-giornalmente.
- Le serie storiche locali contribuiscono alle statistiche nazionali accessibili tramite il catalogo data.europa.eu.
- Le mappe stagionali di area bruciata (Damage Assessment) forniscono il contesto più ampio per interpretare i trend locali.

Copernicus Services offrono validazione satellitare:

- Il Global Land Service con i suoi dati Burnt Area a 300m di risoluzione fornisce una verifica indipendente delle superfici calcolate localmente.
- Il CAMS GFAS (Global Fire Assimilation System) permette di confrontare le emissioni da biomass burning calcolate dai dati locali con le stime globali.
- Il Fire Weather Index basato su ERA5 fornisce un controllo meteorologico indipendente per validare le condizioni registrate dalle stazioni locali.

GWIS (Global Wildfire Information System) del JRC rappresenta l'hub scientifico:

- Le reanalisi del Fire Weather Index storico permettono di validare i calcoli locali su serie temporali estese.
- Le statistiche nazionali ufficiali forniscono il contesto per confronti e benchmarking.
- Il Current Situation Viewer offre un contesto real-time per la comprensione delle condizioni correnti.

Questa integrazione non è solo accademica. Il dataset locale implementa routine automatiche che confrontano geometrie, verificano coerenze temporali, validano dati meteorologici e applicano flag di qualità quando le discrepanze superano soglie predefinite. Il risultato è un dataset che mantiene la ricchezza del dettaglio locale mentre garantisce la coerenza con gli standard europei.

6.5 CARATTERISTICHE QUANTITATIVE

Dimensioni degli Incendi:

- Media superficie: 13.41 ha per evento.
- Mediana: < 1 ha (distribuzione fortemente asimmetrica).
- Incendi grandi (> 100 ha): 0.86% del totale, 84.34% dell'area totale.
- Superficie totale bruciata: 53,074 ha (1995–2023).

Durata Media:

- Eventi piccoli (< 1 ha): 2-4 ore.
- Eventi medi (1-10 ha): 6-12 ore.
- Eventi grandi (> 100 ha): 24-72 ore.
- Record: 168 ore (7 giorni) per incendio eccezionale 2022.

7 DATI PREDITTIVI GENERATI DALL'IA

7.1 MODELLI DI MACHINE LEARNING IMPLEMENTATI

Come descritto dettagliatamente nel deliverable D.1.2.1, sono stati sviluppati e validati diversi algoritmi di intelligenza artificiale per la previsione del rischio incendi boschivi:

XGBoost (Modello Principale):

- Accuratezza: 97%.
- Recall: 83%.
- Precisione: 81%.
- F1-score: 82%.
- Caratteristiche: Gestione ottimale dataset sbilanciati, interpretabilità.

Random Forest (Modello di Confronto):

- Performance: Metrics comparabili ma inferiori a XGBoost.
- Caratteristiche: Robustezza, minor overfitting.

Decision Tree (Baseline):

- Performance: Performance base per confronti.
- Caratteristiche: Massima interpretabilità, velocità.

7.2 FINESTRA TEMPORALE OTTIMALE

L'analisi ha identificato che le migliori prestazioni predittive si ottengono utilizzando:

- Periodo di osservazione: 3 settimane precedenti l'evento.
- Risoluzione temporale: Dati orari aggregati su base giornaliera.
- Variabili input: Tutti i parametri meteorologici disponibili.

7.3 IMPORTANZA DELLE CARATTERISTICHE

L'analisi di feature importance del modello XGBoost ha identificato i seguenti fattori come più influenti:

- Temperatura: Peso relativo massimo.
- Umidità relativa: Correlazione negativa con rischio.
- Radiazione solare: Indicatore condizioni di secchezza.
- Giorni senza pioggia: Durata periodo secco.

7.4 OUTPUT PREDITTIVI GENERATI

Mappe di Rischio Giornaliere:

- Risoluzione spaziale: 100m × 100m (gli output a 100 m sono ottenuti per aggregazione (upscaling) dalla griglia di lavoro a 3 m (vedi §4.7); per variabili continue si utilizza la media, per categoriali la maggioranza).
- Copertura: Intera area di studio.
- Classi di rischio: Molto basso, Basso, Medio, Alto, Molto alto.
- Formato: GeoTIFF, WMS/WMTS/WCS services.

Serie Temporalì Predittive:

- Orizzonte previsionale: 7 giorni.
- Aggiornamento: Quotidiano.
- Parametri: Probabilità incendio per cella/area.
- Accuratezza decrescente: Massima a 24h, utilizzabile fino a 7 giorni con degradazione progressiva.

Mappe di Vulnerabilità:

- Base: Analisi MaxEnt e MCDA/AHP da D.1.1.2.
- Enhancement: Integrazione predizioni real-time.
- Fattori: Combustibile, topografia, meteo, accessibilità.

7.5 VALIDAZIONE E PERFORMANCE

Dataset di Training:

- Periodo: 1995-2020.
- Eventi: 3,166 incendi georeferenziati (80% del totale).
- Utilizzo: Training e ottimizzazione iperparametri.

Dataset di Validazione:

- Periodo: 2021-2023.
- Eventi: 792 incendi per validazione indipendente (20% del totale).
- Metriche: Conferma performance su dati non visti dal modello.

Cross-Validation:

- Metodo: K-fold stratificato (k=5).
- Risultati: Stabilità modello confermata con metriche consistenti.
- Overfitting: Controlli specifici per dataset temporali.

8 STRUTTURA TECNICA E ORGANIZZAZIONE

8.1 ORGANIZZAZIONE DELLE DIRECTORY

Il dataset è organizzato in una struttura gerarchica che garantisce tracciabilità e facilita l'accesso ai dati:

`KarstFirewall_Dataset_v6.0/`

<code> — GeoData_final/</code>	<code># Dataset finale standardizzato</code>
<code> — GeoData_ITA/</code>	<code># Dati originali Italia</code>
<code> — GeoData_SL0/</code>	<code># Dati originali Slovenia</code>
<code> — GeoData_merged/</code>	<code># Dati armonizzati transfrontalieri</code>
<code> — Weather_Data/</code>	<code># Serie temporali meteorologiche</code>
<code> — Fire_Records/</code>	<code># Database incendi boschivi</code>
<code> — AI_Predictions/</code>	<code># Output modelli predittivi</code>

└─ Metadata/

Documentazione e metadati

└─ Documentation/

Guide utente e specifiche tecniche

GeoData_final/: Contiene tutti i layer geospaziali nella loro versione finale, standardizzata e pronta per l'uso operativo:

- Sistema di coordinate unificato (EPSG:4326).
- Convenzioni di nomenclatura standard.
- Controlli qualità completati.
- Formati multipli (shapefile, geopackage, geotiff).

Dati per Paese: Mantiene versioni originali per garantire tracciabilità e permettere analisi specifiche per nazione.

Dati Merged: Layer transfrontalieri armonizzati per analisi integrate Italia-Slovenia.

8.2 FORMATI DI DATI SUPPORTATI

Dati Vettoriali:

- Shapefile (.shp): Formato standard per compatibilità legacy.
- GeoPackage (.gpkg): Standard OGC per performance e funzionalità avanzate.
- GeoJSON: Per applicazioni web e API REST.
- KML/KMZ: Per visualizzazione in Google Earth.

Dati Raster:

- GeoTIFF: Formato principale per DTM, mappe di rischio, derivati.
- NetCDF: Per serie temporali climatiche e meteorologiche.
- PNG/JPEG: Per visualizzazione web e thumbnail.

Database:

- MySQL: Registrazioni incendi e metadati.
- InfluxDB: Serie temporali meteorologiche ad alta frequenza.
- PostGIS: Dati geospaziali per applicazioni enterprise.

8.3 SISTEMI DI COORDINATE

Sistema Principale:

- EPSG:4326: WGS84 Geographic (lat/lon decimali).
- Utilizzo: Standard per tutti i dataset finali, API, web services.

Sistemi Originali Preservati:

- EPSG:32633: UTM Zone 33N per dati italiani.
- EPSG:3794: Slovenia D96/TM per dati sloveni.
- Trasformazioni: Parametri di conversione documentati.

8.4 CONVENZIONI PER LA NOMENCLATURA

File Naming:

- `[CATEGORY]_[SUBCATEGORY]_[COUNTRY]_[DATE]_[VERSION].[ext]`

• Esempi:

- `LANDUSE_CORINE_ITA_2021_v1.shp`
- `WEATHER_TEMPERATURE_SLO_19812010_v2.tif`

`FIRES_RECORDS_MERGED_19952023_v6.gpkg`

Layer Naming GIS:

- `kf50_[tipo]_[dettaglio]_[area]`
- Esempi:
- `kf50_roads_highway_karst`
- `kf50_fire_risk_daily`

`kf50_weather_stations`

8.5 AGGIORNAMENTI

Aggiornamento Dati:

- Real-time: Dati meteorologici (campionamento misto 30-60 minuti).
- Giornaliero: Predizioni AI, fire weather index.
- Mensile: Consolidamento registrazioni incendi.
- Annuale: Aggiornamento layer geospaziali.

9 STANDARD E METADATI

9.1 CONFORMITÀ AGLI STANDARD EUROPEI

Il dataset è sviluppato in piena conformità con le direttive e gli standard europei per garantire massima interoperabilità nell'ecosistema dei dati europei:

Direttiva INSPIRE:

- Annex I: Sistemi di coordinate, unità amministrative, idrografia.
- Annex II: Uso del suolo, elevazioni.
- Annex III: Zona a rischio naturale, condizioni atmosferiche.

- Servizi: View (WMS), Download (WFS), Discovery (CSW).
- Metadati: ISO 19139 XML secondo INSPIRE Metadata Implementing Rules.

DCAT-AP v3.0 e GeoDCAT-AP:

- DCAT-AP: Application Profile per cataloghi open data europei.
- GeoDCAT-AP: Mapping specifico per dati geospaziali verso RDF.
- Interoperable Europe Portal: Conformità ai requisiti portale europeo.
- Semantic interoperability: Vocabolari controllati standardizzati.

Standard ISO/TC 211:

- ISO 19115-1:2014: Core metadata per informazioni geografiche.
- ISO 19139-1:2019: XML Schema implementation per metadati.
- ISO 19119:2016: Servizi di informazione geografica.
- ISO 19110:2016: Catalogo delle feature types.

Vocabolari Controllati Europei:

- GEMET: General Multilingual Environmental Thesaurus (EEA).
- INSPIRE Registry: Vocabolari di riferimento INSPIRE.
- EU Vocabularies: Thesauri ufficiali UE (Publications Office).

Sistemi di Riferimento Spaziale:

- EPSG:4326: WGS84 per compatibilità globale e web services.
- EPSG:3035: ETRS89-extended / LAEA Europe per analisi pan-europee.
- EPSG:32633: UTM 33N per dati ad alta precisione area locale.
- Transformations: Parametri certificati secondo EUREF guidelines.

9.2 STRUTTURA DEI METADATI

Ogni dataset è accompagnato da metadati completi strutturati secondo ISO 19115:

Identificazione:

- Titolo, abstract, parole chiave.
- Identificatori unici persistenti.
- Categoria tematica ISO.
- Estensione geografica e temporale.

Qualità Dati:

- Completezza, accuratezza geometrica e tematica.
- Consistenza logica e topologica.
- Lineage (provenienza e storia processi).
- Risultati controlli qualità.

Distribuzione:

- Formati disponibili.
- Modalità di accesso e restrizioni.
- Contatti responsabili.
- Licenze d'uso.

Sistema di Riferimento:

- Sistema di coordinate utilizzato.
- Datum e proiezione.
- Parametri trasformazione.

9.3 CATOLOGO DEI METADATI

Implementazione CSW:

- Software: GeoNetwork open source.
- Standard: OGC CSW 2.0.2, INSPIRE CSW.
- Accesso: Web interface e API programmatica.
- Harvesting: Compatibile con geoportali nazionali ed europei.

Profile INSPIRE:

- Metadati secondo Technical Guidelines v2.0.
- Validazione automatica conformità.
- Multilingue (italiano, sloveno, inglese).
- Collegamenti a servizi geografici.

9.4 DOCUMENTAZIONE SULLA QUALITÀ

Rapporti di Qualità: Per ogni dataset principale è disponibile un rapporto dettagliato contenente:

- Metodologie di acquisizione e processamento dati.
- Controlli qualità eseguiti e risultati.
- Limitazioni conosciute e suggerimenti d'uso.
- Incertezze e accuratezze stimate.

Lineage Completo:

- Fonti originali e loro caratteristiche.
- Processi di trasformazione applicati.
- Software utilizzato e versioni.
- Date di processamento e responsabili.

10 CONTROLLI DI QUALITÀ E VALIDAZIONE

10.1 METODOLOGIE DI CONTROLLO QUALITÀ

Controlli Geometrici:

- Validità topologica: Verifica poligoni chiusi, assenza self-intersection.
- Accuratezza posizionale: Confronto con reference datasets (GPS, ortofoto).
- Completezza geografica: Verifica copertura completa area di studio.
- Consistenza scala: Controllo appropriatezza dettaglio per scala utilizzo.

Controlli Attributi:

- Completezza: Verifica presenza valori obbligatori.
- Consistenza: Controllo coerenza tra attributi correlati.
- Validità domini: Verifica conformità a liste valori predefinite.
- Accuratezza tematica: Validazione tramite photointerpretation e verifiche campo.

Controlli Temporal:

- Completezza serie: Identificazione gaps nelle serie temporali.
- Plausibilità valori: Range checks e outlier detection.
- Consistenza temporale: Controllo continuità e coerenza trends.
- Sincronizzazione: Verifica allineamento temporale tra dataset.

10.2 RISULTATI DEI CONTROLLI QUALITÀ

Dati Geospaziali:

- Accuratezza posizionale: Validata secondo standard progetto.
- Completezza tematica: >98% attributi obbligatori presenti.
- Validità topologica: Controlli sistematici completati.

- Consistenza: Conforme a regole business definite.

Serie Temporalì Meteorologiche:

- Completeness: 94.2% dati disponibili (considerando manutenzioni programmate).
- Plausibilità: 99.1% valori entro range fisicamente realistici.
- Quality flags: Classificazione automatica affidabilità misurazioni.
- Gap analysis: Documentazione e strategie colmamento lacune

Database Incendi - Analisi Qualità Dettagliata:

Tabella 2 - Completezza Dati per Tabella Principale

Tabella	Records Totali	Completezza Campi Chiave	Percentuali Completezza
Incident Data	3,958	fire_start: 100%, area: 100%, location: 100%, cause: 100%	Tutti campi critici completi
Location Data	3,958	coordinates: 100%, country: 100%, altitude: 100%	Georeferenziazione completa
Damage Data	3,958	burned_area: 100%, damage_cost: 47.2%	Area sempre presente, costi parziali
Intervention Data	3,958	start: 99.6%, end: 99.4%	Tempistiche quasi complete

Tabella 3 - Distribuzione Tempi di Risposta

Categoria Tempo Risposta	Numero Eventi	Percentuale
0 ore (Immediato)	2,492	63.18%
1-2 ore	783	19.85%
3-6 ore	355	9.00%
7-24 ore	221	5.60%
>24 ore	93	2.36%

Tabella 4 - Distribuzione Dimensionale Incendi

Categoria Dimensione	Numero Eventi	Area Media (ha)	Percentuale
≤1 ettaro (Piccolissimi)	2,972	0.24	75.09%
1.1-10 ettari (Piccoli)	791	3.15	19.98%
10.1-100 ettari (Medi)	161	31.73	4.07%
100.1-1,000 ettari (Grandi)	27	240.45	0.68%
1.000-10.000 ettari (Molto Grandi)	6	3.464.80	0.15%
>10.000 ettari (Estremi)	1	17.482.00	0.03%

Tabella 5 - Pattern Stagionali

Stagione	Numero Eventi	Area Media (ha)	Percentuale
Primavera (Mar-Mag)	1.616	8.55	40.83%
Estate (Giu-Ago)	1.388	26.74	35.07%
Inverno (Dic-Feb)	695	2.25	17.56%
Autunno (Set-Nov)	259	2.19	6.54%

Tabella 6 - Distribuzione Geografica

Paese	Numero Eventi	Area Media (ha)	Percentuale
Slovenia	2.751	15.87	69.50%
Italia	1.207	7.79	30.50%

Indicatori di Qualità Generale:

- **Eccellente ($\geq 80\%$):** 3.943 eventi (99.62%).
- Buona (60-79%): 14 eventi (0.35%).
- Discreta (40-59%): 1 evento (0.03%).
- Score medio qualità: 86.6/100.

Validazioni Timeline:

- Date fine incendi invalide: 0 eventi.
- Tempi di risposta negativi: 0 eventi.
- Ordinamento temporale errato: 0 eventi.
- Record orfani: 0 eventi.

Priorità Dati Mancanti:

- Costo danni: 52.8% mancante (priorità alta).
- Ora fine incendio: 0.2% mancante (priorità alta).
- Cause incendio: 0.0% mancante.
- Coordinate: 0.0% mancante.

10.3 PROCEDURE DI VALIDAZIONE

Validazione incrociata:

- Overlay analysis: Confronto automatico tra dataset sovrapposti.
- Statistical correlation: Analisi correlazioni attese tra variabili.
- Expert review: Validazione manuale da esperti dominio.
- Field verification: Controlli campionari sul terreno.

Validation Dataset:

- Reference data: 2.500 punti di controllo georeferenziati con GPS.
- Ground truth: Database verificato incendi 2020-2024.

- Independent sources: Confronto con dataset esterni (Copernicus, ESA).

Continuous Monitoring:

- Real-time checks: Validazione automatica nuovi dati in ingresso.
- Monthly reports: Rapporti qualità mensili automatizzati.
- Annual assessment: Valutazione completa qualità dataset.
- Feedback integration: Miglioramento continuo basato su utilizzo.

10.4 LIMITAZIONI E INCERTEZZE

Limitazioni Identificate:

Dati Meteorologici:

- Rappresentatività spaziale limitata in aree remote.
- Possibili bias altimetrici (sottorappresentazione quote elevate).
- Periodi missing durante manutenzioni straordinarie.

Registrazioni Incendi:

- Possibile underreporting incendi piccoli ($<100\text{m}^2$).
- Variabilità accuratezza georeferenziazione ($\pm 10\text{-}100\text{m}$).
- Differenze metodologiche tra Italia e Slovenia.

Dati Geospaziali:

- Date acquisizione non uniformi tra layer.
- Risoluzione spaziale variabile (1m-1km).
- Possibili errori classificazione uso suolo automatica.

Stima Incertezze:

- Posizionale: $\pm 5-15\text{m}$ per feature lineari, $\pm 25\text{m}$ per poligonali.
- Temporale: ± 15 minuti per eventi meteorologici, ± 2 ore incendi.
- Tematica: Accuratezza 85-95% secondo categoria dato.

11 CONCLUSIONI

11.1 SINTESI RISULTATI

Il deliverable D.2.1.2 ha portato alla creazione di un dataset completo e scientificamente robusto per la prevenzione degli incendi boschivi nell'ecosistema carsico transfrontaliero. Il dataset rappresenta un patrimonio informativo di eccezionale valore, integrando:

- 5.229.216 di record meteorologici da 22 stazioni con copertura temporale fino a 34 anni.
- 3.958 registrazioni di incendi boschivi georeferenziati con attributi dettagliati.
- 50+ layer geospaziali ad alta risoluzione che coprono tutti gli aspetti territoriali rilevanti.
- Modelli predittivi AI con accuratezza 97% e capacità operativa real-time.

La qualità e completezza del dataset sono state validate attraverso controlli sistematici che hanno confermato standard elevati di accuratezza geometrica, completezza tematica e consistenza temporale. L'integrazione con la piattaforma digitale Karst Firewall 5.0 garantisce accessibilità operativa e utilizzo in tempo reale per la gestione del rischio incendi.

11.2 INNOVAZIONI SIGNIFICATIVE

Integrazione Transfrontaliera: Il dataset rappresenta il primo esempio di integrazione completa di dati meteorologici, territoriali e storici degli incendi per la regione carsica Italia-Slovenia, superando le tradizionali barriere nazionali nella gestione del rischio.

Approccio Multi-Scale:

La combinazione di dati ad altissima risoluzione (1m DTM) con serie storiche trentennali permette analisi che spaziano dalla pianificazione strategica alla gestione operativa immediata.

AI Integration: L'integrazione nativa dei modelli predittivi AI nel dataset permette la generazione automatica di scenari di rischio e la loro validazione continua con i dati storici.

Real-time Capability: Il collegamento diretto con le stazioni meteorologiche attive garantisce aggiornamento continuo e utilizzo operativo immediato per sistemi di allerta.

11.3 IMPATTI ATTESI

Impatto Scientifico: Il dataset fornisce una base solida per ricerca avanzata su:

- Pattern di cambiamento climatico nella regione carsica.
- Evoluzione del regime di incendi boschivi.
- Validazione approcci innovative di gestione territorio.

Impatto Operativo:

- Miglioramento significativo capacità previsionale rischio incendi.
- Ottimizzazione strategie prevenzione e risposta emergenze.
- Riduzione tempi intervento attraverso allerta precoce.
- Coordinamento più efficace delle risorse transfrontaliere.

Impatto Sociale:

- Maggiore sicurezza per cittadini in aree a rischio.
- Riduzione danni economici e ambientali da incendi.
- Miglioramento comunicazione rischio al pubblico.
- Rafforzamento cooperazione internazionale.

11.4 SVILUPPI FUTURI

Espansione Dataset:

- Integrazione dati da sensori IoT "che annusano" (Dryad Network).
- Aggiunta layer biodiversità e servizi ecosistemici.

Sostenibilità:

- Definizione modello sostenibilità economica post-progetto.
- Trasferimento know-how ad enti locali.
- Standardizzazione approccio per replicabilità.

Il dataset rappresenta quindi non solo il completamento di un obiettivo progettuale, ma la base per una nuova generazione di strumenti digitali per la gestione sostenibile e scientificamente fondata del rischio incendi boschivi nella regione europea.

PODATKOVNI NIZ ZA PREPREČEVANJE GOZDNIH POŽAROV Z ZGODOVINSKIMI PODATKI O KRAŠKEM EKOSISTEMU

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, nizkoogljična 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-D212
Titolo del documento / Naslov dokumenta:	PODATKOVNI NIZ ZA PREPREČEVANJE GOZDNIH POŽAROV Z ZGODOVINSKIMI PODATKI O KRAŠKEM EKOSISTEMU
Work Package:	2
Attività / Aktivnost:	1.2
Partner responsabili (autori) / Odgovorni partnerji (avtorji):	Infodata Sistemi (Petelin, Marko; Zidaric, Samuel; Zuccato, Nicola) ZRC SAZU (Čonč, Špela; Breg Valjavec, Mateja; Ciglič, Rok)
Luogo e data di pubblicazione / Kraj in datum objave:	Trst, 25/03/2026

KAZALO

1 POVZETEK.....	7
2 CILJI IN NAMEN.....	8
2.1 GLAVNI CILJI.....	8
2.2 ŠTUDIJSKO OBMOČJE	9
2.3 ČASOVNO OBDOBJE.....	9
3 IZZIV ČEZMEJNE INTEGRACIJE	9
3.1 MOZAIK PODATKOV ZA REKONSTRUKCIJO.....	9
3.2 PROCES HARMONIZACIJE	10
3.3 OD RAZDROBLJENOSTI DO OPERATIVNE ODLIČNOSTI	11
3.4 STRUKTURA INTEGRIRANEGA NABORA PODATKOV	11
3.5 ŠTEVILKE, KI PRIPOVEDUJEJO ZGODBO STEVILKE.....	12
4 ZGODOVINSKI GEOPROSTORSKI PODATKI.....	12
4.1 RABA TAL IN POKROVNOST	12

4.2 DIGITALNI MODELI TERENA (DMT).....	13
4.3 CESTNO OMREŽJE IN DOSTOPNA INFRASTRUKTURA	13
4.4 VEGETACIJA IN GOZDNI EKOSISTEMI.....	14
4.5 DELOVNA MREŽA IN LOČLJIVOST	14
5 METEOROLOŠKI IN PODNEBNI PODATKI.....	15
5.1 MREŽA METEOROLOŠKIH POSTAJ.....	15
5.2 MERJENI METEOROLOŠKI PARAMETRI	15
5.3 ČASOVNA POKRITOST IN PARAMETRI PO POSTAJAH.....	17
5.4 IZVEDENI METEOROLOŠKI INDEKSI	20
5.5 ZGODOVINSKI PODNEBNI PODATKI.....	21
5.6 PODNEBNE PROJEKCIJE	22
6 ZGODOVINSKI SPOMIN POŽAROV: 30 LET DOKUMENTIRANIH DOGODKOV	22
6.1 DVA SISTEMA, ENA STRATEGIJA.....	22
6.2 PODATKOVNA BAZA, KI PRIPOVEDUJE 3958 ZGODB	23
6.3 VZORCI, KI IZHAJAJO IZ PODATKOV.....	25
6.4 EVROPSKA VALIDACIJA: ONKRAJ REGIONALNIH MEJA	26
6.5 KVANTITATIVNE ZNAČILNOSTI.....	27

7 NAPOVEDNI PODATKI, GENERIRANI Z UI	27
7.1 IMPLEMENTIRANI MODELI STROJNEGA UČENJA	27
7.2 OPTIMALNO ČASOVNO OKNO	28
7.3 POMEMBOST ZNAČILNOSTI	28
7.4 GENERIRANI NAPOVEDNI REZULTATI	29
7.5 VALIDACIJA IN UČINKOVITOST	29
8 TEHNIČNA STRUKTURA IN ORGANIZACIJA	30
8.1 ORGANIZACIJA DIREKTORIJEV	30
8.2 PODPRTI FORMATI PODATKOV	31
8.3 KOORDINATNI SISTEMI	32
8.4 KONVENCIJE POIMENOVANJA	32
kf50_weather_stations	33
8.5 POSODOBITVE	33
9 STANDARDI IN METAPODATKI	33
9.1 SKLADNOST Z EVROPSKIMI STANDARDI	33
9.2 STRUKTURA METAPODATKOV	35
9.3 KATALOG METAPODATKOV	35

9.4 DOKUMENTACIJA KAKOVOSTI	36
10 KONTROLE KAKOVOSTI IN VALIDACIJA	37
10.1 METODOLOGIJE KONTROLE KAKOVOSTI.....	37
10.2 REZULTATI KONTROL KAKOVOSTI	37
10.3 POSTOPKI VALIDACIJE.....	42
10.4 OMEJITVE IN NEGOTOVOSTI	43
11 ZAKLJUČKI	44
11.1 POVZETEK REZULTATOV.....	44
11.2 POMEMBNE INOVACIJE.....	44
11.3 PRIČAKOVANI VPLIVI	45
11.4 PRIHODNJI RAZVOJ	45

1 POVZETEK

Ko požar prečka mejo med Italijo in Slovenijo na kraškem območju, ne prepozna administrativnih ovir. Desetletja so meteorološki podatki, evidence požarov in teritorialne informacije ostajali razdrobljeni na obeh straneh meje, kar je omejevalo zmožnost razumevanja in napovedovanja teh uničujočih dogodkov, ki ogrožajo edinstven in ranljiv ekosistem.

Deliverable D.2.1.2 pripoveduje zgodbo o tem, kako je projekt Karst Firewall 5.0 to razdrobljenost spremenil v integrirano sredstvo evropskega pomena. S sodelovanjem med italijanskimi in slovenskimi inštituti smo uspeli ustvariti prvi celovit čezmejni niz podatkov za preprečevanje gozdnih požarov v kraškem ekosistemu, v katerega smo vključili več kot 5.229.216 zgodovinskih meteoroloških zapisov, 3.958 poročil o gozdnih požarih in več kot 50 visokoločljivih geoprostranskih plasti, ki pokrivajo obdobje od leta 1991 do 2024.

To ni zgolj arhiv zgodovinskih podatkov, temveč živ in operativen sistem. Podatki z 22 strateško razporejenih meteoroloških postaj na Krasu, ki se beležijo na 30-60 minut, napajajo algoritme umetne inteligence, ki dosegajo 97 % natančnost pri napovedovanju požarne ogroženosti. Podrobne evidence, ki jih zagotavljata Gozdna služba Devin-Nabrežina in Zavod za gozdove Slovenije (ZGS), so bile usklajene v relacijsko bazo podatkov, ki sledi vsakemu vidiku protipožarnih intervencij, od prve prijave do končnih stroškov obnove.

Pot do te integracije ni bila preprosta predvsem zaradi usklajevanja podatkov iz različnih sistemov kot so na primer: koordinate v Sloveniji v projekciji D96/TM in UTM 33N v Italiji, evidence požarov z različnimi nacionalnimi metodologijami, meteorološke časovne vrste z vrzelmi in diskontinuitetami. Vsak nabor podatkov je bil validiran, georeferenciran in standardiziran v skladu z evropskimi direktivami INSPIRE, kar prvič ustvarja čezmejno podatkovno bazo.

Najbolj inovativen vidik je operativna integracija z algoritmi umetne inteligence, razvitimi v rezultatu D.1.2.1. Modeli XGBoost in Random Forest, ki temeljijo na bogatih zgodovinskih podatkih. Te podatki ne služijo le za napovedovanje požarne ogroženosti z natančnostjo 97

%, temveč se nenehno napajajo iz realnih tokov meteorološke mreže, kar sistem spreminja v živ vir za upravljanje izrednih razmer.

Danes prek digitalne platforme Karst Firewall 5.0 ta nabor podatkov podpira znanstvene raziskave, prostorsko načrtovanje in sisteme zgodnjega opozarjanja, kar predstavlja ponovljiv model za druge čezmejne evropske regije. Struktura nabora podatkov je zasnovana za zagotavljanje zanesljive podatkovne osnove za strategije prilagajanja podnebnim spremembam in blažitev požarne ogroženosti, z vplivi, ki segajo precej onkraj regionalnih meja projekta.

2 CILJI IN NAMEN

2.1 GLAVNI CILJI

Nabor podatkov za preprečevanje gozdnih požarov z zgodovinskimi podatki kraškega ekosistema je bil razvit za doseganje naslednjih strateških ciljev:

Podpora znanstvenim raziskavam: Zagotoviti celovito in standardizirano podatkovno bazo za raziskave zgodovinskih vzorcev požarov, podnebne analize in okoljskih sprememb kraškega ekosistema.

Prostorsko načrtovanje in upravljanje ogroženosti: Omogočiti lokalnim in regionalnim oblastem identifikacijo območij z visoko ogroženostjo, načrtovanje preventivnih ukrepov in razvoj strategij prilagajanja podnebnim spremembam.

Operativni sistemi zgodnjega opozarjanja: Zagotoviti osnovne podatke za napajanje napovednih algoritmov in avtomatiziranih sistemov za odkrivanje in obveščanje o požarni ogroženosti.

Čezmejno sodelovanje: Olajšati izmenjavo informacij in koordinacijo preventivnih dejavnosti ter odziva med Italijo in Slovenijo na Krasu.

2.2 ŠTUDIJSKO OBMOČJE

Nabor podatkov pokriva čezmejno kraško regijo, ki se razteza med:

- Italijanska stran: Pokrajini Trst in Gorica (Dežela Furlanija Julijska krajina).
- Slovenska stran: Goriška in Obalno-kraška regija.

Študijsko območje zaznamuje edinstven kraški ekosistem z apnenčastimi kamninskimi formacijami, mediteransko in celinsko vegetacijo ter specifičnimi mikropodnebnimi razmerami, ki pomembno vplivajo na obnašanje in širjenje gozdnih požarov.

2.3 ČASOVNO OBDOBJE

Nabor podatkov integrira zgodovinske podatke, ki pokrivajo več kot 30 let:

- Meteorološki podatki: od 1991 do 2024 (s spremenljivo pokritostjo po postajah).
- Evidence požarov: od 1995 do 2023.
- Geoprostorski podatki: najnovejši razpoložljivi nabori podatkov (2020-2024).

3 IZZIV ČEZMEJNE INTEGRACIJE

3.1 MOZAIK PODATKOV ZA REKONSTRUKCIJO

Ko je projekt Karst Firewall 5.0 začel zbirati obstoječe podatke leta 2024, smo se soočili z razdrobljeno informacijsko pokrajino, ki odraža administrativne delitve namesto ekološke realnosti kraškega ekosistema.

Na italijanski strani je ARPA FVG zbrala natančne meteorološke podatke iz svojih obalnih in celinskih postaj, medtem ko je Gozdna služba Devin-Nabrežina vzdrževala podrobne evidence protipožarnih intervencij v papirni obliki in lokalnih bazah podatkov. Čez mejo je slovenski ARSO upravljal svojo mrežo postaj s primerljivimi tehničnimi standardi, vendar

različnimi koordinatnimi sistemi in protokoli pridobivanja, medtem ko Zavod za gozdove Slovenije dokumentira vsak gozdni požar prek svojega naprednega spletnega portala.

Rezultat je bil zaklad informacij - več kot 5 milijonov meteoroloških zapisov z 22 postaj, 3958 natančno dokumentiranih požarnih dogodkov - vendar izoliranih v nacionalnih silosih, ki so preprečevali integrirano razumevanje pojavov, ki ne priznavajo meja.

3.2 PROCES HARMONIZACIJE

Preobrazba tega mozaika v koherenten nabor podatkov je zahtevala metodičen pristop na več ravneh. Prva ovira je bila geometrijska: slovenski podatki so uporabljali koordinatni sistem Slovenija D96/TM (EPSG:3794), medtem ko so bili italijanski pretežno v UTM 33N (EPSG:32633). Vsae posamezne točke, linije in poligoni so morali biti projicirani v enoten sistem WGS84 (EPSG:4326), ob hkratnem ohranjanju možnosti vrnitve na originalne koordinatne sisteme za zagotavljanje sledljivosti.

Vendar so bili tehnični izzivi le površinski. Za vsakim naborom podatkov so se skrivale globlje metodološke razlike: italijanski gozdarji so klasificirali požare po kriterijih, ki poudarjajo operativni vidik intervencije, medtem ko so slovenski kolegi sledili evropskim standardom, ki dajejo prednost ekološki analizi po dogodku. Oba pristopa sta imela znanstveno vrednost, vendar ju je bilo treba uskladiti v skupno strukturo.

Proces harmonizacije je vključeval gozdarje, informatike in raziskovalce, ki so delali v čezmejnih delovnih skupinah, ki se periodično srečujejo za reševanje neskladnosti in standardizacijo terminologije. Vsaka metodološka odločitev je bila dokumentirana za zagotavljanje ponovljivosti in prihodnjega razumevanja sprejetih izbir.

3.3 OD RAZDROBLJENOSTI DO OPERATIVNE ODLIČNOSTI

Nastali nabor podatkov ni preprosto vsota svojih delov. Integracija je ustvarila nove analitične možnosti: prvič je mogoče slediti, kako lahko požar, ki se začne v goriških hribih, vpliva na meteorološke razmere, zabeležene na obalnih postajah v Trstu, ali kako ventilacijski vzorci doline Soče vplivajo na širjenje ognja čez mejo.

To bogastvo integriranih podatkov je omogočilo razvoj algoritmov umetne inteligence, opisanih v D.1.2.1, saj je zagotovilo raznolikost in celovitost, potrebno za učenje napovednih modelov z visoko natančnostjo. Brez te čezmejne integracije bi modeli trpeli zaradi geografskih pristranskosti in omejitev v reprezentativnosti ekstremnih dogodkov.

3.4 STRUKTURA INTEGRIRANEGA NABORA PODATKOV

Končni nabor podatkov se deli na štiri glavne kategorije, ki skupaj zagotavljajo celovito predstavitev kraškega ekosistema:

- Zgodovinski geoprostorski podatki: Geografija tveganja, od gozdnih cest do kritične infrastrukture.
- Meteorološki in podnebni podatki: Podnebni motor požarov, s 34 leti neprekinjenega opazovanja.
- Evidence gozdnih požarov: Zgodovinski spomin dogodkov, vsak požar dokumentiran od 1995 do 2023.
- Napovedni podatki UI: Umetna inteligenca, ki pretvarja zgodovinske podatke v operativne napovedi.

3.5 ŠTEVILKE, KI PRIPOVEDUJEJO ZGODBO STEVILKE

Številke za tem naborom podatkov pripovedujejo zgodbo o intenzivnosti opravljenega dela:

- 5.229.216 meteoroloških zapisov: Vzorčenje na vsakih 30-60 minut na 22 postajah več kot tri desetletja.
- 3958 požarnih dogodkov: Natančno dokumentirana vsaka prijava, intervencija in škoda.
- 50+ geoprostorskih slojev: Od topografije visoke ločljivosti do mrež kritične infrastrukture.
- Ločljivost do 3m × 3m: Natančnost, zadostna za operativno načrtovanje na terenu.
- Mešano vzorčenje 30-60 minut: Meteorološki podatki z visoko časovno frekvenco ARSO (30min) in ARPA FVG (60min), ki nenehno napajajo napovedne modele.
- Skupna pogorela površina (1995-2023): 53.074 ha.
- Asimetrična porazdelitev: veliki požari (>100 ha) so 0,86 % števila dogodkov, vendar pojasnijo 84,34 % pogorele površine.
- Povprečna površina na dogodek: 13,41 ha (mediana < 1 ha).

Ta gostota informacij - ena meteorološka postaja na vsakih 66 km², popolna višinska pokritost od morja do 420m visokega Škocjana, reprezentativnost vseh kraških ekosistemov - zagotavlja, da noben pomemben vidik ozemlja ni zanemarjen pri analizi požarnega tveganja.

4 ZGODOVINSKI GEOPROSTORSKI PODATKI

4.1 RABA TAL IN POKROVNOST

Slovenska stran:

- Nabor podatkov: Grafični podatki o rabi tal za Slovenijo (Grafični podatki RABA).
- Format: Shapefile (.shp).
- Koordinatni sistem: Slovenija D96/TM (pretvorjen v EPSG:4326).
- Podrobnost: Regionalno-nacionalna raven (ne panevropska).

- Vir: Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano.
- Posodobitev: Periodična glede na nacionalne arhive.

Italijanska stran:

- Nabor podatkov: Carta della Natura Regionale FVG.
- Format: Shapefile (.shp).
- Koordinatni sistem: EPSG:32633 (UTM 33N).
- Podrobnost: Klasifikacija po standardu CORINE Land Cover.
- Vir: Dežela Furlanija Julijska krajina.
- Posodobitev: Petletna.

4.2 DIGITALNI MODELI TERENA (DMT)

Visoka ločljivost:

- Ločljivost: 1m × 1m (razpoložljivo za izbrana območja).
- Format: XYZ, GeoTIFF.
- Višinska natančnost: ± 0,15m.
- Vir: Geodetska uprava RS, Dežela FJK.

4.3 CESTNO OMREŽJE IN DOSTOPNA INFRASTRUKTURA

Steze in poti:

- Tipologije: Pohodniške poti, gozdne poti, protipožarne preseke.
- Merilo: 1:100.000 - 1:250.000.
- Vir: Zavod za gozdove Slovenije, Dežela FJK.
- Atributi: Prehodnost, vzdrževanje, dostopnost v nujnih primerih.

Gozdne in protipožarne ceste:

- Klasifikacija: Gozdne ceste, protipožarne preseke, evakuacijske poti.
- Atributi: Širina, nosilnost težkih vozil, stanje vzdrževanja.
- Pomembnost: Ključno za načrtovanje preventivnih in operativnih ukrepov.

4.4 VEGETACIJA IN GOZDNI EKOSISTEMI

Gozdni sestoji:

- Klasifikacija: Prevladujoče vrste, starost, gostota, višina.
- Merilo: 1:50.000.
- Atributi: Vnetljivost, biomasa, fitosanitarno stanje.
- Vir: Zavod za gozdove Slovenije, Dežela FJK.

4.5 DELOVNA MREŽA IN LOČLJIVOST

Vsi sloji napovedovalcev so bili harmonizirani na skupno delovno mrežo 3 m × 3 m. Topografske spremenljivke (naklon, ekspozicija, TPI, TWI) so bile izračunane iz DMT z metrsko ločljivostjo in nato pretvorjene na ločljivost 3 m × 3 m. Podnebni rastrski podatki CHELSA z ločljivostjo 1 km × 1 km so bili pretvorjeni na 3 m z namenom prostorske sporavnave; njihova dejanska ločljivost ostaja ~1 km. Antropogeni sloji in sloji rabe/pokrovnosti tal, razpoložljivi v vektorskem formatu, so bili rasterizirani na 3 m. Razen če ni drugače navedeno, so bile vse prostorske analize izvedene na tej mreži.

5 METEOROLOŠKI IN PODNEBNI PODATKI

5.1 MREŽA METEOROLOŠKIH POSTAJ

Meteorološki nabor podatkov temelji na mreži 22 meteoroloških postaj, strateško razporejenih po čezmejnem kraškem območju:

Geografska porazdelitev:

- Slovenija: 12 postaj (ARSO - Agencija RS za okolje).
- Italija: 10 postaj (ARPA FVG - Agenzia Regionale Protezione Ambiente).

Višinske značilnosti:

- Najnižja kota: 0 m n.m. (obalne postaje).
- Najvišja kota: 420 m n.m. (Škocjan).
- Porazdelitev: Reprezentativna za vse višinske pasove Krasa.

Tehnične opombe: Časovni žigi so zabeleženi v lokalnem času; na platformi in v API-ju so podatki servirani v UTC (z avtomatskim odmikom).

5.2 MERJENI METEOROLOŠKI PARAMETRI

Vsaka postaja pridobiva podmnožico naslednjih parametrov z mešanim vzorčenjem 30-60 minut (ARSO pogosto na 30', ARPA FVG pogosto na 60'):

Temperatura:

- Parameter: Temperatura zraka na 2m.
- Enota: °C.
- Natančnost: $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.
- Pokritost: 17/22 postaj.

Relativna vlažnost:

- Parameter: Relativna vlažnost zraka.
- Enota: %.
- Natančnost: ± 2 %.
- Pokritost: 17/22 postaj.

Padavine:

- Parameter: Kumulativne urne padavine.
- Enota: mm.
- Natančnost: $\pm 0,1$ mm (< 10 mm), ± 1 % (> 10 mm).
- Pokritost: 15/22 postaj.

Veter:

- Parametri: Povprečna hitrost, maksimalni sunek, smer.
- Enote: m/s, stopinje.
- Natančnost: $\pm 0,1$ m/s, $\pm 5^\circ$.
- Pokritost: 17/22 postaj za povprečno hitrost, 19/22 za maksimalni sunek, 18/22 za smer.

Sončno sevanje:

- Parameter: Globalno sončno sevanje.
- Enota: W/m².
- Natančnost: ± 5 %.
- Pokritost: 11/22 postaj.

Atmosferski tlak:

- Parameter: Tlak na morski gladini.
- Enota: hPa.
- Natančnost: $\pm 0,1$ hPa.
- Pokritost: 6/22 postaj.

5.3 ČASOVNA POKRITOST IN PARAMETRI PO POSTAJAH

Tabela 1 - Meteorološke postaje čezmejne mreže Karst Firewall 5.0

Ime postaje	Država	Št. zapisov	Prvi zapis	Zadnji zapis	Leta	Razpoložljivi parametri
Ajdovščina Dolenje	SLO	559.824	1993-01-01	2024-12-31	32	T, H, P, WS, WD, WG
Bilje	SLO	572.880	1992-01-01	2024-12-31	33	T, H, P, WS, WD, WG, R, BP
Boja Zarja Tržaški zaliv	SLO	51.984	2022-01-01	2024-12-31	3	WG, WD
Boja Zora Debeli rtič	SLO	52.416	2022-01-01	2024-12-31	3	WG, WD
Godnje	SLO	155.712	2016-01-01	2024-12-31	9	T, H, P, WS, WD, WG, R
Koper Kapitanija	SLO	329.424	2006-01-01	2024-12-31	19	T, H, WS, WD, WG, R, BP

Koper Luka	SLO	561.792	1991-05-01	2024-12-31	33	T, H, P, WS, WD, WG
Nova Gorica	SLO	413.328	2001-01-08	2024-12-31	24	T, H, P, WS, WD, WG
Piran Boja	SLO	420.768	2001-01-01	2024-12-31	24	T, H, WS, WD, WG
Podnanos	SLO	157.824	2016-01-01	2024-12-31	9	T, H, P, WS, WD, WG
Škocjan Divača	SLO	350.640	2005-01-01	2024-12-31	20	T, H, P, WS, WD, WG, R, BP
Vedrijan	SLO	156.144	2016-01-01	2024-12-31	9	T, H, P, R
Gorizia Aeroporto	ITA	26.304	2022-01-01	2024-12-31	3	T, H, P, WS, WD, WG, R
Monfalcone Pluvio	ITA	78.912	2016-01-01	2024-12-31	9	T, H, P
Monfalcone New	ITA	78.888	2016-01-01	2024-12-31	9	T, H, WS, WD, WG, R

Monfalcone Old	ITA	140.256	2006-01-01	2021-12-31	16	T, H, P, WS, WD, WG, R, BP
Sgonico- Zgonik	ITA	289.296	1992-01-01	2024-12-31	33	T, H, P, WS, WD, WG, R, BP
Trieste Istituto Nautico	ITA	157.800	2007-01-01	2024-12-31	18	WS, WD, WG
Trieste molo Fratelli Bandiera	ITA	271.752	1994-01-01	2024-12-31	31	T, H, P, WS, WD, WG, R, BP
Muggia	ITA	166.560	2006-01-01	2024-12-31	19	WS, WD, WG
Muggia Pluvio	ITA	78.912	2016-01-01	2024-12-31	9	P
Trieste Cattinara	ITA	157.800	2007-01-01	2024-12-31	18	T, H, P, WS, WD, R

Legenda parametrov:

- T: Temperatura - H: Vlažnost - P: Padavine.
- WS: Hitrost vetra - WD: Smer vetra - WG: Maksimalni sunek.
- R: Sončno sevanje - BP: Atmosferski tlak.

Tipologije postaj:

- Morske boje: Boja Zarja in Boja Zora (samo veter, od 2022); Piran Boja (T, H, WS, WD, WG; od 2001).
- Samo padavine (ID 21): samo padavinske meritve.
- Letališka (ID 13): urno vzorčenje od 2022.
- Monfalcone Old/New (ID 15-16): prekrivajoča se obdobja, logična skupina postaje.

Statistika mreže:

- Skupno obdobje: 1991-2024 (34 let).
- Skupno zapisov: 5.229.216 meritev na 30-60 minut.
- Postaje z 20+ leti podatkov: 8 postaj.
- Vzorčenje: Mešano 30' (ARSO) in 60' (ARPA FVG).

5.4 IZVEDENI METEOROLOŠKI INDEKSI

Kanadski indeks požarne ogroženosti (FWI):

- Komponente: FPMC, DMC, DC, ISI, BUI.
- Frekvenca: Dnevna.
- Obdobje: 1992-2024.
- Izračun: Samo kjer so razpoložljive zahtevane spremenljivke; brez polnjenja z reanalizo v tej izdaji.
- Uporaba: Glavni vhod za napovedne modele UI.

Indeksi suše:

- Palmer Drought Severity Index (PDSI): Mesečni, izračunan za postaje s T in P.
- Standardizirani padavinski indeks (SPI): 1, 3, 6, 12 mesecev za padavinske postaje.
- Zaporedni suhi dnevi: Število zaporednih dni brez dežja (prag 0,1mm).

5.5 ZGODOVINSKI PODNEBNI PODATKI

Temperatura (1981-2010):

- Parameter: Povprečna letna temperatura.
- Format: Raster 1 km × 1 km.
- Vir: ARSO Atlas okolja.
- Trend: Povprečno povečanje 0,57°C na desetletje (1993-2023)*.

*Metodološka opomba: trend izračunan iz serij postaj; rastri 1981-2010 so samo za podnebno referenco.

Padavine (1981-2010):

- Parameter: Popravljen povprečne letne padavine.
- Format: Raster 1km × 1km (za namene integracije z drugimi napovedovalci so rastri CHELSA prevzorčeni na delovno mrežo 3 m (glej poglavje 4.7), brez vnašanja novih prostorskih podrobnosti).
- Vir: ARSO Atlas okolja.
- Razpon: 800-3000 mm/leto na študijskem območju.

5.6 PODNEBNE PROJEKCIJE

Scenariji RCP (CMIP5):

- Obdobja: 2040-2070, 2070-2100.
- Parametri: Temperatura, padavine.
- Ločljivost: Sezonska.
- Modeli: Ansambel regionalnih podnebnih modelov CMIP5.
- Uporaba: Ocene prihodnjega tveganja, načrtovanje prilagajanja.

Tehnična opomba: Projekcije RCP (CMIP5); migracija na SSP/CMIP6 načrtovana leta 2025 v skladu s trenutnimi standardi IPCC AR6.

6 ZGODOVINSKI SPOMIN POŽAROV: 30 LET DOKUMENTIRANIH DOGODKOV

6.1 DVA SISTEMA, ENA STRATEGIJA

Dokumentiranje gozdnih požarov na Krasu odraža dva nacionalna pristopa, ki sta se desetletja razvijala neodvisno. Na italijanski strani je Gozdna služba Dežele Furlanije Julijske krajine z operativno bazo v Devinu-Nabrežini razvila sistem, osredotočen na operativno upravljanje intervencij, ki skrbno dokumentira vsako fazo od prve prijave do končne sanacije. Njihova neposredna izkušnja na terenu - od obalnih borovcev do kraških gmajn v notranjosti - se kaže v zapisih, bogatih z operativnimi podrobnostmi: tip uporabljenih vozil, ure intervencije, strategije gašenja, nastali stroški.

Na drugi strani meje je Zavod za gozdove Slovenije (ZGS) implementiral bolj sistematizirani pristop prek spletnega portala <https://prostor.zgs.gov.si/pregledovalnik/>, ki sledi evropskim standardom, ki poudarjajo ekološko analizo in znanstveno klasifikacijo dogodkov. Slovenski

gozdarji natančno dokumentirajo značilnosti goriva, razvoj vedenja ognja in dolgoročni okoljski vpliv.

Oba pristopa zajemata bistvene vidike realnosti požarov, vendar je njuna integracija zahtevala izgradnjo skupnega ogrodja, sposobnega ohraniti informacijsko bogastvo obeh tradicij.

6.2 PODATKOVNA BAZA, KI PRIPOVEDUJE 3958 ZGODB

Integrirana baza podatkov o gozdnih požarih predstavlja najbolj popoln spomin, kdajkoli sestavljen za čezmejni kraški ekosistem. Vsak zapis od 3958 dogodkov od 1995 do 2023 je zgrajen okoli relacijske strukture sedmih medsebojno povezanih tabel, ki dokumentirajo:

Location (Lokacija) - Kje je nastal vsak požar: Ne samo geografske koordinate, ampak celoten teritorialni kontekst. Vsak dogodek je georeferenciran z natančnostjo od ± 10 do ± 100 metrov glede na vir, nato kontekstualiziran prek administrativnih delitev (država, regija, pokrajina, občina), upravljanja gozdov (pristojno območje in enota), fizičnih značilnosti lokacije (nakloni, orientacija, nadmorska višina, morfologija) in zgodovine ozemlja (območja, ki so jih prej prizadeli požari).

Incident (Dogodek požara) - Kronologija in narava vsakega dogodka: Vsak požar ima svojo edinstveno identiteto prek nacionalnih in čezmejnih kod. Časovna dokumentacija presega preprost datum začetka/konca, vključuje skupno trajanje, dan v tednu (za analize antropogenih vzorcev), klasifikacijo po tipu in intenzivnosti. Vzročnost se sistematično raziskuje: naravna (predvsem strela), antropogena (razločena na namerno, nenamerno, nedoločeno), s podrobnostmi o viru vžiga, ko je določljiv.

Intervention (Intervencija) - Operativni odziv: Vsaka minuta šteje v boju proti požarom. Baza podatkov sledi časom pripravljenosti (koliko časa je potrebno za aktivacijo ekip), začetku aktivne intervencije, začetku operacij gašenja in popolnemu koncu operacij vključno s sanacijo. Uporabljene tehnike so dokumentirane od začetnega pristopa do končnih strategij, vključno z uporabo protigognja in odstotno učinkovitostjo zatiranja s strani gozdnih služb.

Equipment (Oprema in sredstva) - Mobilizirani viri: Popoln inventar od gasilskih vozil tipa A in B do dronov za prepoznavanje. Baza podatkov razlikuje med kopenskimi vozili (terenska vozila, prikolice, protipožarni moduli), mobilno infrastrukturo (prenosne cisterne, gradbena mehanizacija), zračnimi viri (letala in helikopterji za gašenje, rekognosciranje, transport), naprednimi tehnologijami (droni, ki se vse bolj uporabljajo) in specializirane kemične izdelke (močila, zgoščevala, pene, zaviralci). Za vsako intervencijo je zabeležen vrh sočasne uporabe in datumi največje uporabe.

Personnel Involved (Vključeno osebje) - Ljudje vključeni v intervenciji: Za vsako operacijo stoji kompleksna človeška mreža. Baza podatkov dokumentira, kdo koordinira (pristojni organ ali oseba), koliko operaterjev je vključenih po kategoriji (gozdno osebje, prostovoljni in poklicni gasilci, organi pregona, oborožene sile, civilisti), skupne delovne ure, vrhunec zaposlitve. Ti podatki razkrivajo intenzivnost kolektivnega napora: v nekaterih primerih so mobilizirane stotine ljudi za več dni, tisoče delovnih ur za pomembne dogodke.

Damage (Škoda in vplivi) - Cena požarov: Ocena škode presega pogorelo površino. Baza podatkov kvantificira neposredne ekonomske stroške (ocena škode v evrih, dnevne stroške upravljanja izrednih razmer), razlikuje tipologije gorenja (odstotki podzemnega, talnega, krošnjaškega ognja), podrobno navaja površine po tipologiji gozda (iglavci, listavci, mešani, panjeveci, grmišča), izračunava uničeno lesno maso v kubičnih metrih, razlikuje med javnimi in zasebnimi zemljišči, dokumentira vpliv na zavarovana območja in kvantificira družbene vplive (evakuirane osebe, ranjeni, žrtve, ogroženi vodni viri).

Incident Characteristics (Značilnosti dogodka) - Znanstvena analiza: Vsak požar je tudi študijski primer. Baza podatkov beleži tehnično-znanstvene podrobnosti: uro prve prijave, dan v letu odkritja (za sezonske analize), fazo razvoja ob intervenciji, podrobno gozdno sestavo, prevladujoče vrste (znanstveno in lokalno ime), vedenje ognja (maksimalna hitrost širjenja, model gorenja), orientacijo točke vžiga glede na pobočja in datume največje razširitve.

6.3 VZORCI, KI IZHAJAJO IZ PODATKOV

Ko analiziramo 3958 dogodkov, razporejenih čez 30 let, se pojavijo vzorci, ki razkrivajo tako naravno dinamiko kot človeško vedenje. Številke kažejo realnost, ki je bolj kompleksna od običajnih zaznav:

Geografija ognja: 70 % požarov je bilo zabeleženih pod 200 m nadmorske višine, na območjih stika urbanih in ruralnih površin, kjer širitev pozidave sreča naravno vegetacijo. To ni naključje: ta območja združujejo večjo človeško prisotnost (potencialni viri vžiga) z vegetacijo, ki je pogosto bolj suha in fragmentirana (lažje širjenje). Najbolj prizadeta območja dejansko sledijo geografiji naselij: goriški in tržaški Kras, kjer je desetletja širitve stanovanjskih območij ustvarilo kompleksno mrežo stikov med pozidanim in naravnim.

Koledar požarov: V juliju in avgustu je zabeleženih 45 % letnih dogodkov, vendar se aktivna sezona razširi od maja do septembra in zajame 85 % skupnega števila. Zima ni izvzeta - manj kot 5 % dogodkov, vendar pretežno antropogenega izvora, kar razkriva, kako lahko človeški element preskoči naravne sezonske omejitve. Dan v tednu pri antropogenih požarih kaže vrhunce ob koncih tedna, ko je rekreacijski pritisk na ozemlje največji.

Matematika škode: Analiza 3958 dogodkov (1995-2023) potrjuje močno asimetrično porazdelitev. Povprečna površina na požar je 13,41 ha (mediana < 1 ha). Veliki požari (>100 ha) predstavljajo le 0,86 % dogodkov, vendar ustvarijo 84,34 % skupne pogorele površine, kar je enako 53.074 ha v obravnavanem obdobju, z enim izjemnim dogodkom, ki je gorel 7 zaporednih dni (168 ur zabeleženih leta 2022).

Odzivni časi in učinkovitost: Majhni dogodki (<1 ha) se v povprečju nadzorujejo v 2-4 urah, srednji (1-10 ha) zahtevajo 6-12 ur, medtem ko se veliki požari lahko razširijo na 24-72 ur. Ti časi odražajo ne samo intenzivnost pojava, ampak učinkovitost sistema odzivanja, ki se je razvil skozi leta prek zbrane izkušnje.

6.4 EVROPSKA VALIDACIJA: ONKRAJ REGIONALNIH MEJA

Nabor podatkov ne deluje v izolaciji, ampak se aktivno integrira z glavnimi evropskimi informacijskimi sistemi za gozdne požare. Ta integracija služi tako za navzkrižno validacijo lokalnih podatkov kot za prispevek k znanju na celinski ravni.

EFFIS (Evropski informacijski sistem za gozdne požare) zagotavlja evropsko primerjalno osnovo:

- Obodi večjih požarov se samodejno primerjajo s podatki EFFIS Burnt Areas, ki se posodablja skoraj dnevno.
- Lokalne zgodovinske serije prispevajo k nacionalnim statistikam, dostopnim prek kataloga data.europa.eu.
- Sezonske karte pogorele površine (Ocena škode) zagotavljajo širši kontekst za interpretacijo lokalnih trendov.

Storitve Copernicus nudijo satelitsko validacijo:

- Global Land Service s svojimi podatki Burnt Area pri 300 m ločljivosti zagotavlja neodvisno preverjanje lokalno izračunanih površin.
- CAMS GFAS (Global Fire Assimilation System) omogoča primerjavo emisij iz gorenja biomase, izračunanih iz lokalnih podatkov, z globalnimi ocenami.
- Fire Weather Index na osnovi ERA5 zagotavlja neodvisen meteorološki nadzor za validacijo razmer, zabeleženih na lokalnih postajah.

GWIS (Globalni informacijski sistem za divje požare) JRC predstavlja znanstveno središče:

- Reanalize zgodovinskega Fire Weather Indexa omogočajo validacijo lokalnih izračunov na razširjenih časovnih serijah.
- Uradne nacionalne statistike zagotavljajo kontekst za primerjave in primerjalno analizo.
- Current Situation Viewer nudi kontekst v realnem času za razumevanje trenutnih razmer.

Ta integracija ni le akademska. Lokalni nabor podatkov implementira avtomatske rutine, ki primerjajo geometrije, preverjajo časovno skladnost, validirajo meteorološke podatke in uporabljajo oznake kakovosti, ko neskladja presegajo vnaprej določene pragove. Rezultat je

nabor podatkov, ki ohranja bogastvo lokalnih podrobnosti, hkrati pa zagotavlja skladnost z evropskimi standardi.

6.5 KVANTITATIVNE ZNAČILNOSTI

Velikosti požarov:

- Povprečna površina: 13,41 ha na dogodek.
- Mediana: < 1 ha (močno asimetrična porazdelitev).
- Veliki požari (> 100 ha): 0,86 % skupnega števila, 84,34 % skupne površine.
- Skupna pogorela površina: 53.074 ha (1995-2023)

Povprečno trajanje:

- Majhni dogodki (< 1 ha): 2-4 ure.
- Srednji dogodki (1-10 ha): 6-12 ur.
- Veliki dogodki (> 100 ha): 24-72 ur.
- Rekord: 168 ur (7 dni) za izjemen požar 2022.

7 NAPOVEDNI PODATKI, GENERIRANI Z UI

7.1 IMPLEMENTIRANI MODELI STROJNEGA UČENJA

Kot je podrobno opisano v poročilu D.1.2.1, je bilo razvitih in validiranih več algoritmov umetne inteligence za napovedovanje tveganja gozdnih požarov:

XGBoost (glavni model):

- Natančnost: 97 %.
- Priklic: 83 %.
- Preciznost: 81 %.
- F1-rezultat: 82 %.

- Značilnosti: Optimalno upravljanje neuravnoteženih naborov podatkov, interoperabilnost.

Random Forest (primerjalni model):

- Učinkovitost: Primerljive, vendar nižje metrike od XGBoost.
- Značilnosti: Robustnost, manjše prekomerno prileganje.

Decision Tree (osnovna linija):

- Učinkovitost: Osnovna učinkovitost za primerjave.
- Značilnosti: Maksimalna interoperabilnost, hitrost.

7.2 OPTIMALNO ČASOVNO OKNO

Analiza je identificirala, da se najboljša napovedna učinkovitost doseže z uporabo:

- Obdobje opazovanja: 3 tedne pred dogodkom.
- Časovna ločljivost: Urni podatki, agregirani na dnevni osnovi.
- Vhodne spremenljivke: Vsi razpoložljivi meteorološki parametri.

7.3 POMEMBOST ZNAČILNOSTI

Analiza pomembnosti značilnosti modela XGBoost je identificirala naslednje dejavnike kot najbolj vplivne:

- Temperatura: Maksimalna relativna teža.
- Relativna vlažnost: Negativna korelacija s tveganjem.
- Sončno sevanje: Indikator suhih razmer.
- Dnevi brez dežja: Trajanje suhega obdobja.

7.4 GENERIRANI NAPOVEDNI REZULTATI

Dnevne karte ogroženosti:

- Prostorska ločljivost: 100 m × 100 m (rezultati pri 100 m so pridobljeni z agregacijo (upscaling) iz delovne mreže 3 m (glej poglavje 4.7); za zvezne spremenljivke se uporablja povprečje, za kategorične večina).
- Pokritost: Celotno študijsko območje.
- Razredi ogroženosti: Zelo nizko, nizko, srednje, visoko, zelo visoko.
- Format: GeoTIFF, WMS/WMTS/WCS storitve.

Napovedne časovne serije:

- Napovedni horizont: 7 dni.
- Posodobitev: Dnevna.
- Parametri: Verjetnost požara na celici/območju.
- Padajoča natančnost: Maksimalna pri 24h, uporabna do 7 dni s progresivno degradacijo.

Karte nevarnosti in ranljivosti:

- Osnova: Analize MaxEnt in MCDA/AHP iz D.1.1.2.
- Izboljšava: Integracija napovedi v realnem času.
- Dejavniki: Gorivo, topografija, vreme, infrastruktura.

7.5 VALIDACIJA IN UČINKOVITOST

Nabor podatkov za učenje:

- Obdobje: 1995-2020.
- Dogodki: 3166 georeferenciranih požarov (80 % skupnega števila).
- Uporaba: Učenje in optimizacija hiperparametrov.

Nabor podatkov za validacijo:

- Obdobje: 2021-2023.
- Dogodki: 792 požarov za neodvisno validacijo (20 % skupnega števila).
- Metrike: Potrditev učinkovitosti na podatkih, ki jih model ni videl.

Navzkrižna validacija:

- Metoda: K-fold stratificiran (k=5).
- Rezultati: Stabilnost modela potrjena s konsistentnimi metrikami.
- Prekomerno prileganje: Specifične kontrole za časovne nabore podatkov.

8 TEHNIČNA STRUKTURA IN ORGANIZACIJA

8.1 ORGANIZACIJA DIREKTORIJEV

Nabor podatkov je organiziran v hierarhično strukturo, ki zagotavlja sledljivost in olajša dostop do podatkov:

KarstFirewall_Dataset_v6.0/

└─ GeoData_final/	# Končni standardiziran nabor podatkov
└─ GeoData_ITA/	# Izvirni podatki Italija
└─ GeoData_SLO/	# Izvirni podatki Slovenija
└─ GeoData_merged/	# Harmonizirani čezmejni podatki
└─ Weather_Data/	# Meteorološke časovne serije
└─ Fire_Records/	# Baza podatkov gozdnih požarov
└─ AI_Predictions/	# Rezultati napovednih modelov

└─ Metadata/

Dokumentacija in metapodatki

└─ Documentation/
specifikacije

Uporabniški priročniki in tehnične

GeoData_final/: Vsebuje vse geoprostorske sloje v njihovi končni, standardizirani in za operativno uporabo pripravljeni verziji:

- Enoten koordinatni sistem (EPSG:4326).
- Standardne konvencije poimenovanja.
- Dokončane kontrole kakovosti.
- Več formatov (shapefile, geopackage, geotiff).

Podatki po državah: Ohranja originalne verzije za zagotavljanje sledljivosti in omogočanje specifičnih analiz po državah.

Združeni podatki: Harmonizirani čezmejni sloji za integrirane analize Italija-Slovenija.

8.2 PODPRTI FORMATI PODATKOV

Vektorski podatki:

- Shapefile (.shp): Standardni format za združljivost s starejšimi različicami.
- GeoPackage (.gpkg): OGC standard za zmogljivost in napredne funkcionalnosti.
- GeoJSON: Za spletne aplikacije in REST API.
- KML/KMZ: Za vizualizacijo v Google Earth.

Rastrski podatki:

- GeoTIFF: Glavni format za DMT, karte ogroženosti, izvedene produkte.
- NetCDF: Za podnebne in meteorološke časovne serije.
- PNG/JPEG: Za spletno vizualizacijo in slike.

Baze podatkov:

- MySQL: Evidence požarov in metapodatki.
- InfluxDB: Visokofrekvenčne meteorološke časovne serije.
- PostGIS: Geoprostorski podatki za podjetniške aplikacije.

8.3 KOORDINATNI SISTEMI

Glavni sistem:

- EPSG:4326: WGS84 Geographic (decimalne stopinje).
- Uporaba: Standard za vse končne nabore podatkov, API, spletne storitve.

Ohranjeni izvirni sistemi:

- EPSG:32633: UTM cona 33N za italijanske podatke.
- EPSG:3794: Slovenija D96/TM za slovenske podatke.
- Transformacije: Dokumentirani parametri pretvorbe.

8.4 KONVENCIJE POIMENOVANJA

Poimenovanje datotek:

`[CATEGORY]_[SUBCATEGORY]_[COUNTRY]_[DATE]_[VERSION].[ext]`

Primeri:

`LANDUSE_CORINE_ITA_2021_v1.shp`

`WEATHER_TEMPERATURE_SLO_19812010_v2.tif`

FIRES_RECORDS_MERGED_19952023_v6.gpkg

Poimenovanje slojev GIS:

kf50_[tipo]_[dettaglio]_[area]

Primeri:

kf50_roads_highway_karst

kf50_fire_risk_daily

kf50_weather_stations

8.5 POSODOBITVE

Posodobitev podatkov:

- Realni čas: Meteorološki podatki (mešano vzorčenje 30-60 minut).
- Dnevno: Napovedi UI, indeks požarne ogroženosti.
- Mesečno: Konsolidacija evidenc požarov.
- Letno: Posodobitev geoprostorskih slojev.

9 STANDARDI IN METAPODATKI

9.1 SKLADNOST Z EVROPSKIMI STANDARDI

Nabor podatkov je razvit v popolni skladnosti z evropskimi direktivami in standardi za zagotavljanje maksimalne interoperabilnosti v ekosistemu evropskih podatkov:

Direktiva INSPIRE:

- Priloga I: Koordinatni sistemi, administrativne enote, hidrografija.
- Priloga II: Raba tal, višine.
- Priloga III: Območja naravnih tveganj, atmosferske razmere.
- Storitve: Pregledovanje (WMS), Prenos (WFS), Odkrivanje (CSW).
- Metapodatki: ISO 19139 XML v skladu z INSPIRE Metadata Implementing Rules.

DCAT-AP v3.0 in GeoDCAT-AP:

- DCAT-AP: Application Profile za evropske kataloge odprtih podatkov.
- GeoDCAT-AP: Specifično mapiranje za geoprostorske podatke v RDF.
- Interoperable Europe Portal: Skladnost z zahtevami evropskega portala.
- Semantična interoperabilnost: Standardizirani kontrolirani slovarji.

Standardi ISO/TC 211:

- ISO 19115-1:2014: Osnovni metapodatki za geografske informacije.
- ISO 19139-1:2019: XML Schema implementacija za metapodatke.
- ISO 19119:2016: Storitve geografskih informacij.
- ISO 19110:2016: Katalog tipov značilnosti.

Evropski kontrolirani slovarji:

- GEMET: General Multilingual Environmental Thesaurus (EEA).
- INSPIRE Registry: Referenčni slovarji INSPIRE.
- EU Vocabularies: Uradni tezavri EU (Urad za publikacije).

Prostorski referenčni sistemi:

- EPSG:4326: WGS84 za globalno združljivost in spletne storitve.
- EPSG:3035: ETRS89-extended / LAEA Europe za panevropske analize.
- EPSG:32633: UTM 33N za podatke visoke natančnosti lokalnega območja.
- Transformacije: Certificirani parametri v skladu s smernicami EUREF.

9.2 STRUKTURA METAPODATKOV

Vsak nabor podatkov spremljajo popolni metapodatki, strukturirani v skladu z ISO 19115:

Identifikacija:

- Naslov, povzetek, ključne besede.
- Edinstveni trajni identifikatorji.
- Tematska kategorija ISO.
- Geografska in časovna razširjenost.

Kakovost podatkov:

- Popolnost, geometrijska in tematska natančnost.
- Logična in topološka konsistentnost.
- Linija izvora (izvor in zgodovina procesov).
- Rezultati kontrol kakovosti.

Distribucija:

- Razpoložljivi formati.
- Načini dostopa in omejitve.
- Odgovorni kontakti.
- Licence uporabe.

Referenčni sistem:

- Uporabljen koordinatni sistem.
- Datum in projekcija.
- Parametri transformacije.

9.3 KATALOG METAPODATKOV

Implementacija CSW:

- Programska oprema: GeoNetwork opensource.
- Standard: OGC CSW 2.0.2, INSPIRE CSW.
- Dostop: Spletni vmesnik in programski API.
- Pobiranje: Združljivo z nacionalnimi in evropskimi geoportali.

Profil INSPIRE:

- Metapodatki v skladu s Technical Guidelines v2.0.
- Avtomatska validacija skladnosti.
- Večjezičnost (italijanščina, slovenščina, angleščina).
- Povezave do geografskih storitev.

9.4 DOKUMENTACIJA KAKOVOSTI

Poročila o kakovosti: Za vsak glavni nabor podatkov je na voljo podrobno poročilo, ki vsebuje:

- Metodologije pridobivanja in procesiranja podatkov.
- Izvedene kontrole kakovosti in rezultati.
- Znane omejitve in predlogi uporabe.
- Ocenjene negotovosti in natančnosti

Popolna linija izvora:

- Izvirni viri in njihove značilnosti.
- Uporabljeni procesi transformacije.
- Uporabljena programska oprema in verzije.
- Datumi procesiranja in odgovorni.

10 KONTROLE KAKOVOSTI IN VALIDACIJA

10.1 METODOLOGIJE KONTROLE KAKOVOSTI

Geometrijske kontrole:

- Topološka veljavnost: Preverjanje zaprtih poligonov, odsotnost samopresekanja.
- Pozicijska natančnost: Primerjava z referenčnimi nabori podatkov (GPS, ortofoto).
- Geografska popolnost: Preverjanje popolne pokritosti študijskega območja.
- Konsistentnost merila: Kontrola primernosti podrobnosti za merilo uporabe.

Kontrole atributov:

- Popolnost: Preverjanje prisotnosti obveznih vrednosti.
- Konsistentnost: Kontrola skladnosti med povezanimi atributi.
- Veljavnost domen: Preverjanje skladnosti s predefiniranimi sezname vrednosti.
- Tematska natančnost: Validacija prek fotointerpretacije in terenskih preverjanj.

Časovne kontrole:

- Popolnost serij: Identifikacija vrzeli v časovnih serijah.
- Verjetnost vrednosti: Preverjanja razponov in odkrivanje osamelcev.
- Časovna konsistentnost: Kontrola kontinuitete in skladnosti trendov.
- Sinhronizacija: Preverjanje časovne poravnave med nabori podatkov.

10.2 REZULTATI KONTROL KAKOVOSTI

Geoprostorski podatki:

- Pozicijska natančnost: Validirana v skladu s projektnimi standardi.
- Tematska popolnost: >98 % obveznih atributov prisotnih.
- Topološka veljavnost: Sistematske kontrole dokončane.

- Konsistentnost: Skladna s poslovnimi pravili.

Meteorološke časovne serije:

- Popolnost: 94,2 % razpoložljivih podatkov (ob upoštevanju načrtovanega vzdrževanja).
- Verjetnost: 99,1 % vrednosti znotraj fizično realističnih razponov.
- Oznake kakovosti: Avtomatska klasifikacija zanesljivosti meritev.
- Analiza vrzeli: Dokumentacija in strategije zapolnjevanja vrzeli.

Baza podatkov požarov - Podrobna analiza kakovosti:

Tabela 2 - Popolnost podatkov po glavnih tabelah

Tabela	Število zapisov	Popolnost ključnih polj	Odstotki popolnosti
Incident Data	3958	fire_start: 100 %, area: 100 %, location: 100 %, cause: 100 %	Vsa kritična polja so popolna
Location Data	3958	coordinates: 100 %, country: 100 %, altitude: 100 %	Popolna georeferencija
Damage Data	3958	burned_area: 100 %, damage_cost: 47.2 %	Območje vedno prisotno, delni stroški
Intervention Data	3958	start: 99.6 %, end: 99.4 %	Časovnica skoraj popolna

Tabela 3 - Porazdelitev odzivnih časov

Kategorija časa odziva	Število dogodkov	Odstotek
0 ur (Takojšnji)	2,492	63,18 %
1-2 ur	783	19,85 %
3-6 ur	355	9,00 %
7-24 ur	221	5,60 %
>24 ur	93	2,36 %

Tabela 4 - Porazdelitev velikosti požarov

Kategorija velikosti	Število dogodkov	Povprečna površina (ha)	Odstotek

≤1 ha (Zelo majhni)	2972	0,24	75,09 %
1,1-10 ha (Majhni)	791	3,15	19,98 %
10,1-100 ha (Srednji)	161	31,73	4,07 %
100,1-1000 ha (Veliki)	27	240,45	0,68 %
1000-10.000 ha (Zelo veliki)	6	3464,80	0,15 %
10.000 ha (Ekstremni)	1	17.482,00	0,03 %

Tabela 5 - Sezonski vzorci

Letni čas	Število dogodkov	Povprečna površina (ha)	Odstotek
Pomlad (Mar-maj)	1616	8,55	40,83 %
Poletje (Jun-avg)	1.388	26,74	35,07 %

Zima (Dec-feb)	695	2,25	17,56 %
Jesen (Sep-nov)	259	2,19	6,54 %

Tabela 6 - Geografska porazdelitev

Država	Število dogodkov	Povprečna površina (ha)	Odstotek
Slovenija	2751	15,87	69,50 %
Italija	1207	7,79	30,50 %

Indikatorji splošne kakovosti:

- Odlična (≥ 80 %): 3943 dogodkov (99,62 %).
- Dobra (60-79 %): 14 dogodkov (0,35 %).
- Zadovoljiva (40-59 %): 1 dogodek (0,03 %).
- Povprečna ocena kakovosti: 86,6/100.

Validacije časovnice:

- Neveljavni datumi konca požarov: 0 dogodkov.
- Negativni odzivni časi: 0 dogodkov.
- Napačno časovno razvrščanje: 0 dogodkov.

- Osiretel zapisi: 0 dogodkov.

Prioritete manjkajočih podatkov:

- Stroški škode: 52,8 % manjka (visoka prioriteta).
- Ura konca požara: 0,2 % manjka (visoka prioriteta).
- Vzroki požara: 0,0 % manjka.
- Koordinate: 0,0 % manjka.

10.3 POSTOPKI VALIDACIJE

Navzkrižna validacija:

- Analiza prekrivanja: Avtomatska primerjava med prekrivajočimi se nabori podatkov.
- Statistična korelacija: Analiza pričakovanih korelacij med spremenljivkami.
- Strokovna revizija: Ročna validacija s strani domenskih strokovnjakov.
- Terenska verifikacija: Vzorčne kontrole na terenu.

Validacijski nabor podatkov:

- Referenčni podatki: 2500 kontrolnih točk, georeferenciranih z GPS.
- Terenska resnica: Verificirana baza podatkov požarov 2020-2024.
- Neodvisni viri: Primerjava z zunanjimi nabori podatkov (Copernicus, ESA).

Stalno spremljanje:

- Kontrole v realnem času: Avtomatska validacija novih vhodnih podatkov.
- Mesečna poročila: Avtomatizirana mesečna poročila o kakovosti.

- Letna ocena: Popolna letna ocena kakovosti nabora podatkov.
- Integracija povratnih informacij: Nenehno izboljševanje na osnovi uporabe.

10.4 OMEJITVE IN NEGOTOVOSTI

Identificirane omejitve:

Meteorološki podatki:

- Omejena prostorska reprezentativnost v oddaljenih območjih.
- Možne višinske pristranskosti (premajhna zastopanost visokih nadmorskih višin).
- Manjkajoča obdobja med izrednim vzdrževanjem.

Evidence požarov:

- Možno premajhno poročanje o majhnih požarih ($<100 \text{ m}^2$).
- Spremenljivost natančnosti georeferenciranja ($\pm 10\text{-}100 \text{ m}$).
- Metodološke razlike med Italijo in Slovenijo.

Geoprostorski podatki:

- Neenaki datumi pridobivanja med sloji.
- Spremenljiva prostorska ločljivost (1 m-1 km).
- Možne napake avtomatske klasifikacije rabe tal.

Ocena negotovosti:

- Pozicijska: $\pm 5\text{-}15 \text{ m}$ za linearne značilnosti, $\pm 25 \text{ m}$ za poligonske.
- Časovna: $\pm 15 \text{ min}$ za meteorološke dogodke, $\pm 2 \text{ ur}$ za požare.
- Tematska: Natančnost 85-95 % glede na kategorijo podatkov.

11 ZAKLJUČKI

11.1 POVZETEK REZULTATOV

Rezultat D.2.1.2 je privedel do ustvarjanja celovitega in znanstveno robustnega nabora podatkov za preprečevanje gozdnih požarov v čezmejnem kraškem ekosistemu. Nabor podatkov predstavlja informacijsko bogastvo izjemne vrednosti, ki integrira:

- 5.229.216 meteoroloških zapisov iz 22 postaj s časovno pokritostjo do 34 let.
- 3958 georeferenciranih evidenc gozdnih požarov s podrobnimi atributi.
- 50+ visokoločljivostnih geoprostorskih slojev, ki pokrivajo vse pomembne teritorialne vidike.
- Napovedne modele UI s 97 % natančnostjo in operativnimi zmogljivostmi v realnem času.

Kakovost in popolnost nabora podatkov sta bili validirani prek sistematičnih kontrol, ki so potrdile visoke standarde geometrijske natančnosti, tematske popolnosti in časovne konsistentnosti. Integracija z digitalno platformo Karst Firewall 5.0 zagotavlja operativno dostopnost in uporabo v realnem času za upravljanje požarnega tveganja.

11.2 POMEMBNE INOVACIJE

Čezmejna integracija: Nabor podatkov predstavlja prvi primer popolne integracije meteoroloških, teritorialnih in zgodovinskih podatkov o požarih za kraško regijo Italija-Slovenija, ki presega tradicionalne nacionalne ovire pri upravljanju tveganj.

Večnivojski pristop: Kombinacija podatkov zelo visoke ločljivosti (1 m DMT) s tridesetletnimi zgodovinskimi serijami omogoča analize, ki segajo od strateškega načrtovanja do takojšnjega operativnega upravljanja.

Integracija UI: Naravna integracija napovednih modelov UI v nabor podatkov omogoča avtomatsko generiranje scenarijev ogroženosti in njihovo nenehno validacijo z zgodovinskimi podatki.

Zmogljivost v realnem času: Neposredna povezava z aktivnimi meteorološkimi postajami zagotavlja nenehno posodobitev in takojšnjo operativno uporabo za sisteme opozarjanja.

11.3 PRIČAKOVANI VPLIVI

Znanstveni vpliv: Nabor podatkov zagotavlja trdno osnovo za napredne raziskave o:

- Vzorci podnebnih sprememb na kraškem območju.
- Razvoju režima gozdnih požarov.
- Validaciji inovativnih pristopov upravljanja ozemlja.

Operativni vpliv:

- Pomembno izboljšanje napovednih zmogljivosti požarne ogroženosti.
- Optimizacija strategij preprečevanja in odzivanja na izredne razmere.
- Skrajšanje odzivnih časov prek zgodnjega opozarjanja.
- Učinkovitejša koordinacija čezmejnih virov.

Družbeni vpliv:

- Večja varnost prebivalcev na ogroženih območjih.
- Zmanjšanje ekonomske in okoljske škode zaradi požarov.
- Izboljšanje komuniciranja tveganja javnosti.
- Krepitev mednarodnega sodelovanja.

11.4 PRIHODNJI RAZVOJ

Širitev nabora podatkov:

- Integracija podatkov iz IoT senzorjev, "ki vohajo" (mreža Dryad).
- Dodajanje slojev biotske raznovrstnosti in ekosistemskih storitev.

Trajnost:

- Opredelitev modela ekonomske trajnosti po projektu.
- Prenos znanja lokalnim organom.
- Standardizacija pristopa za ponovljivost.

Nabor podatkov torej predstavlja ne le dokončanje projektnega cilja, ampak osnovo za novo generacijo digitalnih orodij za trajnostno in znanstveno utemeljeno upravljanje tveganja gozdnih požarov v evropski regiji.