

# MODELLI DI ALGORITMI PREDITTIVI

## 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

## DELIVERABLE INFORMAZIONI / INFORMACIJE

|                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Acronimo del progetto / Akronim projekta:                      | <b>KARST FIREWALL 5.0</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Titolo del progetto / Naslov projekta:                         | <p><b>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</b></p> <p><b>Inovativno ekosistemsko-zasnovano prilagajanje podnebnim spremembam na Krasu. Spodbujanje požarno odporne gmajne s podporo industrije 5.0</b></p> |
| Area prioritaria / Prednostno področje:                        | <p><b>Un'Europa più verde e a basse emissioni di carbonio, che si muove verso un'economia a zero emissioni di carbonio e resiliente</b></p> <p><b>Bolj zelena, nizkoogljikna Evropa, ki prehaja na gospodarstvo z ničelno stopnjo neto emisij ogljika in je odporna</b></p>                                                                                 |
| Obiettivo specifico del programma / Specifični cilj programa:  | <p><b>SO4: Promuovere l'adattamento ai cambiamenti climatici e la prevenzione del rischio di catastrofi e la resilienza, tenendo conto degli approcci ecosistemici.</b></p> <p><b>SO4: Spodbujanje prilagajanja podnebnim spremembam in preprečevanja tveganja nesreč ter odpornosti ob upoštevanju ekosistemskih pristopov</b></p>                         |
| URL del sito web del progetto / URL spletne strani projekta:   | <a href="http://www.ita-slo.eu/karst-firewall-50">www.ita-slo.eu/karst-firewall-50</a>                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Numero del documento / Številka dokumenta:                     | <b>KFW50-D121</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Titolo del documento / Naslov dokumenta:                       | <b>MODELLI DI ALGORITMI PREDITTIVI</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Work Package:                                                  | <b>1</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Attività / Aktivnost:                                          | <b>2.1</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Partner responsabili (autori) / Odgovorni partnerji (avtorji): | <b>Infodata Sistemi (Elazem, Abdelhamid; Petelin, Marko; Zidaric, Samuel; Zuccato, Nicola)</b>                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Partner coinvolti / Sodelujoči partnerji:                      | <b>ZRC-SAZU (Čonč, Špela; Breg Valjavec, Mateja; Ciglič, Rok)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Luogo e data di pubblicazione / Kraj in datum objave:          | <b>Trieste, 15/10/2025</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| <b>1 ABSTRACT</b>                                         | 4  |
| <b>2 OBIETTIVI E BACKGROUND</b>                           | 5  |
| 2.1 Letteratura e modelli disponibili                     | 5  |
| 2.2 Indice meteorologico degli incendi                    | 5  |
| 2.3 Modelli di apprendimento automatico per la previsione | 6  |
| 2.3.1 Modelli basati su nodi ML                           | 6  |
| 2.3.2 Modello di crescita del fuoco di Prometheus         | 8  |
| 2.4 Connessione con D1.1.2                                | 9  |
| <b>3 ANALISI, PROGETTAZIONE E SVILUPPO</b>                | 11 |
| 3.1 Contesto dell'analisi                                 | 11 |
| 3.2 Risultati sperimentali                                | 13 |
| 3.2.1 Importanza delle caratteristiche                    | 15 |
| 3.2.2. Discussione e lavoro futuro                        | 15 |
| <b>4 RISULTATI DI ANALISI AGGIUNTIVE DA DATI STORICI</b>  | 17 |
| <b>5 INTEGRAZIONE NEL PORTALE WEB KARST FIREWALL 5.0</b>  | 22 |
| 5.1 Set di dati meteorologici sul portale firewall Karst  | 22 |
| 5.2 Parametri raccolti                                    | 24 |
| 5.3 Sistema di attivazione delle notifiche                | 26 |
| <b>6 RIFERIMENTI</b>                                      | 32 |
| <b>7 APPENDICE A</b>                                      | 33 |

| ABBREVIAZIONI              |                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ARPA</b>                | Agenzia regionale per la protezione dell'ambiente, Italy                                                                                                                                    |
| <b>ARSO</b>                | Agencija RS za Okolje, Slovenia                                                                                                                                                             |
| <b>Corpo Forestale</b>     | Corpo Forestale Regione Friuli Venezia Giulia, Italy                                                                                                                                        |
| <b>EU AI Act</b>           | L'EU AI Act è un quadro che stabilisce norme armonizzate per lo sviluppo, l'immissione sul mercato e l'uso di sistemi di intelligenza artificiale (IA) all'interno dell'Unione europea (UE) |
| <b>FWI</b>                 | Indice meteorologico antincendio - utilizzato per calcolare l'indice di rischio di incendio                                                                                                 |
| <b>XGBoost Model</b>       | eXtreme Gradient Boosting è una libreria di apprendimento automatico distribuita e open source che utilizza alberi decisionali con gradient boosting                                        |
| <b>K-Nearest Neighbors</b> | algoritmo di apprendimento automatico utilizzato sia per la classificazione che per l'attività di regressione                                                                               |
| <b>IUAV</b>                | Università IUAV di Venezia, Italia                                                                                                                                                          |
| <b>INFOR</b>               | Infordata Sistemi Srl, Italy                                                                                                                                                                |
| <b>ML</b>                  | Machine Learning                                                                                                                                                                            |
| <b>Random Forest</b>       | Le foreste casuali sono un metodo di apprendimento automatico per la classificazione, la regressione e altre attività                                                                       |
| <b>ZGS</b>                 | Zavod za gozdove Slovenije, Slovenia                                                                                                                                                        |
| <b>ZRC SAZU</b>            | Znanstveno Raziskovalni center<br>Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Slovenia                                                                                                       |

# 1 ABSTRACT

Nell'ambito dell'iniziativa Karst Firewall 5.0 — un progetto transfrontaliero focalizzato sulla gestione forestale resiliente al clima nella regione carsica — il Deliverable D1.2.1 presenta lo sviluppo, il collaudo e la validazione di modelli predittivi per la valutazione del rischio incendi boschivi. Gli incendi rappresentano uno dei disastri naturali più distruttivi a livello globale, alimentati da complesse interazioni tra combustibili, topografia e condizioni meteorologiche, come temperatura, umidità, velocità e direzione del vento, nonché le precipitazioni registrate nel periodo considerato.

La ricerca e l'analisi condotte per lo sviluppo di nuovi algoritmi hanno rivelato una chiara correlazione tra le condizioni climatiche e la diffusione degli incendi boschivi. Inoltre, hanno evidenziato altri dati degni di nota, come un aumento di 1,4 °C della temperatura media nella regione carsica transfrontaliera tra il 1993 e il 2023.

Questo documento descriverà l'approccio, la metodologia e i risultati ottenuti dagli algoritmi di intelligenza artificiale predittiva per il rischio di incendi boschivi. Sebbene i risultati attuali dimostrino una promettente accuratezza, molte variabili complesse devono ancora essere integrate per migliorarne ulteriormente le prestazioni. Le attività di implementazione e ottimizzazione di questi algoritmi proseguiranno fino alla fine del progetto, guidate dai nuovi input e dalle informazioni acquisite lungo il percorso. Man mano che nuovi dati saranno disponibili e verranno introdotte tecniche analitiche più avanzate, i modelli di apprendimento automatico saranno costantemente aggiornati e migliorati, garantendo che il sistema rimanga adattabile, accurato e reattivo nel tempo. Sono state testate diverse classi di algoritmi, tra cui modelli lineari, modelli probabilistici, modelli K-Nearest Neighbors e modelli ad albero. Tra questi, i metodi basati su alberi decisionali, in particolare Random Forest e XGBoost, si sono rivelati i più efficaci. Questi modelli hanno dimostrato ottime prestazioni nel catturare le complesse interazioni non lineari tra variabili ambientali e antropiche che influenzano il verificarsi di incendi boschivi.

I modelli sono stati addestrati utilizzando dati provenienti dai servizi meteorologici ARPA FVG e ARSO, insieme ai dati sugli incendi forniti dalla stazione del Corpo Forestale di Duino-Aurisina e dallo Zavod za gozdove Slovenije (ZGS). L'accuratezza predittiva è migliorata significativamente quando i dati di input coprivano una finestra temporale di tre settimane precedente gli eventi di incendio. XGBoost, in particolare, ha mostrato un'elevata resilienza allo squilibrio di classe e ha fornito informazioni sull'importanza relativa delle caratteristiche.

È importante sottolineare che l'applicazione dell'Intelligenza Artificiale in questo contesto aderisce rigorosamente agli standard etici e si allinea ai principi della legge UE sull'IA, tra cui trasparenza, supervisione umana e responsabilità. Sebbene i risultati del modello offrano previsioni accurate, non intendono sostituire l'esperienza umana. Piuttosto, le previsioni fungono da strumenti di supporto decisionale che devono essere interpretati e convalidati da professionisti qualificati come forestali, agenti della protezione civile e autorità locali.

Questo lavoro supporta gli obiettivi più ampi del progetto Karst Firewall 5.0: migliorare la preparazione agli incendi boschivi attraverso l'innovazione tecnologica, la cooperazione transfrontaliera e strategie di adattamento basate sugli ecosistemi. I modelli predittivi sviluppati nel presente documento sono destinati a essere integrati in un sistema di allerta precoce nell'ambito della piattaforma digitale transfrontaliera attualmente in fase di sviluppo nell'ambito del Work Package 2.

## 2 OBIETTIVI E BACKGROUND

L'obiettivo del Deliverable 1.2.1 "Wildfire Risk Prediction" nell'ambito del progetto Karst Firewall è sviluppare uno strumento più preciso e affidabile per la previsione del rischio di incendi boschivi, sfruttando i recenti progressi dell'intelligenza artificiale e nell'apprendimento automatico. Combinando l'Indice Meteorologico del Fuoco (FWI), i dati storici sugli incendi boschivi degli ultimi 20 anni nel Carso italiano e sloveno e le registrazioni meteorologiche a lungo termine delle stazioni meteorologiche sparse per l'area carsica transfrontaliera, il progetto mira ad addestrare un nuovo algoritmo di intelligenza artificiale in grado di identificare aree e condizioni ad alto rischio con maggiore accuratezza. I risultati saranno condivisi con le autorità pubbliche e la comunità scientifica a supporto dei sistemi di allerta precoce e delle strategie di mitigazione del rischio, mentre l'algoritmo stesso sarà integrato nel portale web di Karst Firewall 5.0 per garantire un'ampia accessibilità e un utilizzo operativo.

### 2.1 LETTERATURA E MODELLI DISPONIBILI

Per lo sviluppo di algoritmi predittivi per il rischio di incendi boschivi, abbiamo esaminato diverse pubblicazioni, metodologie e algoritmi esistenti che hanno già affrontato questo problema. Il nostro approccio, tuttavia, si è concentrato specificamente sulla modellazione matematica, strettamente allineata alle competenze principali della nostra azienda. Nell'ambito dell'analisi contestuale, sono state prese in considerazione diverse pubblicazioni chiave, tra cui [1] Development and Structure of Prometheus: the Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model, un eccellente strumento per simulare la diffusione degli incendi boschivi, [3] Mapping Variable Wildfire Source Areas Through Inverse Modeling, uno studio che applica un approccio di modellazione inversa per tracciare le sorgenti di incendio seguendo a ritroso l'andamento del vento, e [6] Machine Learning based Wildfire Area Estimation Leveraging Weather Forecast Data, che ha particolarmente ispirato il nostro lavoro. Ulteriori riferimenti rilevanti sono disponibili nel Capitolo 8: Riferimenti. Il Deliverable D1.1.1, insieme ai contributi dei nostri partner tecnici IUAV e ZRC, è stato fondamentale per orientare le nostre attività. I dati utilizzati per questa analisi provengono dal Corpo Forestale di Duino (dati sugli incendi boschivi nella regione FVG) e dal Corpo Forestale Sloveno (ZGS) (<https://prostor.zgs.gov.si/pregledovalnik/>). I dati meteorologici sono stati ottenuti dagli archivi storici di ARPA FVG (<https://www.osmer.fvg.it/archivio.php?ln=&p=dati>) e ARSO (<https://meteo.arso.gov.si/met/sl/app/webmet>); parallelamente, è stato sviluppato anche un middleware software per il recupero in tempo reale dei dati dalle stazioni meteorologiche sparse sul territorio carsico italiano e sloveno.

### 2.2 INDICE METEOROLOGICO DEGLI INCENDI

Il Fire Weather Index (FWI) è un sistema di valutazione numerica che stima l'intensità potenziale degli incendi boschivi in base alle condizioni meteorologiche prevalenti. Originariamente sviluppato dal Servizio Forestale Canadese, il FWI è diventato uno strumento standard per la valutazione del rischio di incendio, utilizzato dalle agenzie meteorologiche nazionali e regionali di tutto il mondo, inclusa l'Europa. Il sistema FWI integra diverse variabili meteorologiche per modellare il contenuto

di umidità dei combustibili forestali e l'effetto del vento sul comportamento degli incendi. Nello specifico, utilizza quattro parametri meteorologici giornalieri chiave:

1. Temperatura.
2. Umidità relativa.
3. Velocità e direzione del vento.
4. Precipitazioni nelle 24 ore.

Questi input vengono elaborati attraverso una serie di sottoindici che catturano diverse componenti della secchezza del combustibile e del potenziale di incendio, come il Fine Fuel Moisture Code (FFMC) e il Duff Moisture Code (DMC). Il risultato finale, il valore FWI stesso, combina queste componenti per fornire un unico valore che rappresenta il pericolo di incendio. Valori FWI più elevati corrispondono a un maggiore rischio di incendio e a una maggiore intensità di incendio.

## 2.3 MODELLI DI APPRENDIMENTO AUTOMATICO PER LA PREVISIONE

Nell'ambito dell'analisi dei requisiti, abbiamo identificato una serie di modelli di apprendimento automatico da considerare per l'analisi predittiva, tra cui:

- Modelli lineari: efficaci quando una combinazione lineare di caratteristiche può separare le classi, ma meno adatti a fenomeni complessi e non lineari come gli incendi boschivi.
- K-Nearest Neighbors (KNN): si basa sulla prossimità nel dataset. Funziona bene con dataset piccoli e ben distribuiti, ma diventa lento con dataset di grandi dimensioni e manca di una chiara interpretabilità.
- Modelli probabilistici: presuppongono l'indipendenza tra le caratteristiche, un presupposto raramente valido per i dati meteorologici, dove le variabili sono altamente correlate.
- Modelli ad albero: utilizzano alberi decisionali per suddividere ricorsivamente il dataset in sottoinsiemi progressivamente più piccoli, ideali per catturare relazioni non lineari e interazioni complesse tra le variabili.

Tra questi, i modelli basati su alberi sono emersi come i più adatti ai nostri obiettivi. I seguenti modelli sono stati selezionati per un'analisi approfondita:

- Alberi decisionali: facili da interpretare, ma soggetti a overfitting.
- Random Forest: combina più alberi decisionali per migliorare la robustezza, ridurre l'overfitting e migliorare la generalizzazione.
- XGBoost: un modello di boosting ad alte prestazioni che corregge iterativamente gli errori precedenti e gestisce in modo efficiente i set di dati sbilanciati e i dati mancanti.

### 2.3.1 MODELLI BASATI SU NODI ML

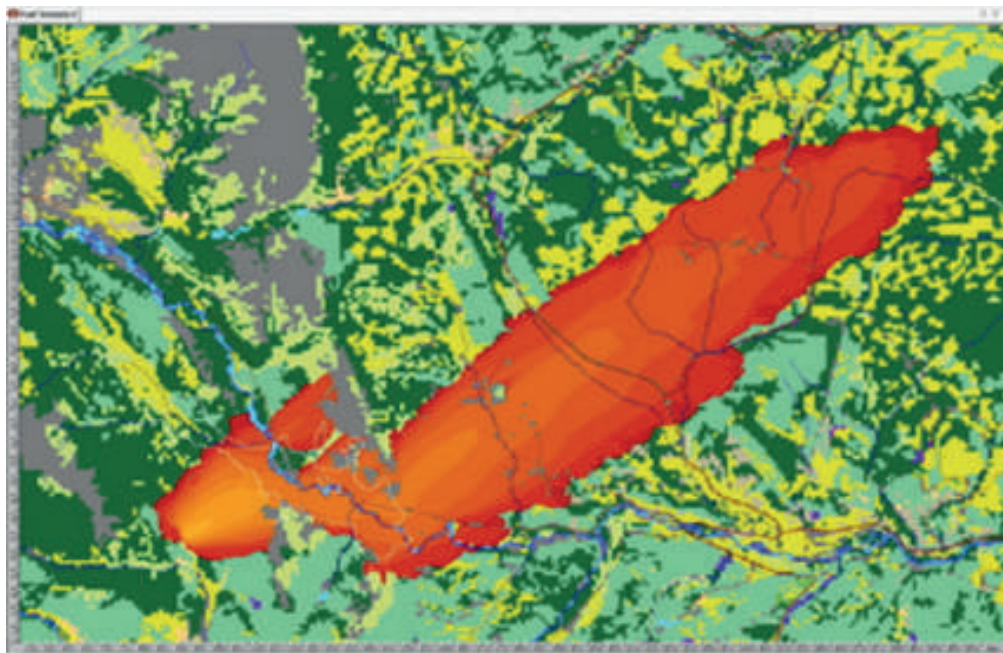
I modelli basati su alberi come Decision Trees, Random Forest e XGBoost sono particolarmente

adatti ai nostri obiettivi di previsione degli incendi boschivi, offrendo una serie di vantaggi:

- Gestione di dati tabulari e non lineari: le dinamiche degli incendi boschivi sono complesse e influenzate da molteplici variabili. I modelli basati su alberi sono in grado di catturare naturalmente le interazioni non lineari senza richiedere trasformazioni esplicite delle caratteristiche, a differenza dei modelli lineari.
- Robustezza e interpretabilità: gli alberi decisionali offrono processi decisionali trasparenti, ma possono presentare un sovradattamento, in particolare con dati rumorosi. Random Forest mitiga questo problema aggregando le decisioni provenienti da più alberi, ottenendo una migliore generalizzazione. XGBoost migliora questo aspetto costruendo alberi in sequenza, correggendo gli errori delle iterazioni precedenti, offrendo elevata accuratezza, gestione integrata dei valori mancanti e bassa sensibilità al rumore.
- Selezione delle caratteristiche e gestione della complessità: grazie a un dataset ricco di variabili meteorologiche e storiche, Random Forest e XGBoost possono identificare automaticamente le caratteristiche più importanti, migliorando le prestazioni di previsione senza la necessità di un'estesa messa a punto manuale.
- Gestione di dataset sbilanciati: gli incendi boschivi sono rari rispetto ai giorni in cui non si verificano. XGBoost eccelle nell'identificazione di eventi rari grazie a funzioni di perdita personalizzate e tecniche di bilanciamento delle classi, aumentando la capacità di richiamo senza sacrificare la precisione complessiva.
- - Efficienza computazionale: XGBoost è ottimizzato per velocità ed efficienza di memoria, rendendolo ideale per dataset di grandi dimensioni. Supporta la parallelizzazione e l'accelerazione GPU, consentendo un training più rapido rispetto ai tradizionali algoritmi di boosting.

## 2.3.2 MODELLO DI CRESCITA DEL FUOCO DI PROMETHEUS

Figura 1 - Esempio di previsione della crescita degli incendi boschivi del modello Prometheus (fonte <https://firegrowthmodel.ca>).



Prometheus è un sofisticato sistema di simulazione della crescita degli incendi boschivi sviluppato in Canada, utilizzato principalmente per modellare la diffusione e il comportamento degli incendi boschivi in paesaggi naturali (Figura 1). È progettato per supportare sia il processo decisionale operativo durante gli incendi boschivi attivi, sia la pianificazione strategica per la prevenzione e la gestione degli incendi.

### Componenti chiave

Basato sul sistema canadese di previsione del comportamento degli incendi (FBP): Prometheus simula la crescita degli incendi boschivi utilizzando equazioni empiriche del sistema FBP canadese, che prevede la velocità di propagazione, l'intensità e altre caratteristiche dell'incendio in base al combustibile, alle condizioni meteorologiche e alla topografia.

Integrando il sistema Fire Weather Index (FWI): questo indice aiuta a valutare il rischio di incendio integrando i dati relativi a temperatura, umidità, vento e precipitazioni.

Prometheus Mathematical: modella la crescita del perimetro dell'incendio come ellissi, utilizzando un approccio basato sulla propagazione delle onde (principio di Huygens). Ogni punto sul bordo dell'incendio emette un nuovo fronte d'onda, contribuendo a simulare l'espansione di un incendio nel tempo in condizioni specifiche.

L'integrazione dei dati richiede input su:

- Tipi di combustibile (vegetazione).
- Topografia (pendenza, esposizione, altitudine).
- Condizioni meteorologiche (sia storiche che previste).

L'output produce output spaziali come:

- Perimetri di incendio basati sul tempo.
- Tasso e direzione di propagazione.
- Intensità della linea di fuoco.
- Mappe di probabilità di incendio.

Adattabilità: sebbene sia stato sviluppato per gli ecosistemi canadesi, Prometheus è stato adattato con successo anche in altri paesi come la Nuova Zelanda, dimostrando la sua modularità e flessibilità.

Prometheus è un'ottima scelta da utilizzare anche nella regione del Carso e, in generale, nel territorio europeo. Sebbene sviluppato in Canada, Prometheus è open source e adattabile, il che lo rende idoneo all'integrazione con sistemi GIS europei, dataset climatici (come Copernicus) e modelli locali sui combustibili. Il suo utilizzo fornirebbe proiezioni scientificamente validate, migliorerebbe la condivisione e la pianificazione dei dati transfrontalieri e supporterebbe il processo decisionale nelle fasi di crisi e prevenzione.

Il progetto Karst Firewall 5.0, che mira a sviluppare strategie transfrontaliere di prevenzione e gestione degli incendi boschivi per la regione del Carso italo-slovena, potrebbe trarre grandi benefici dall'integrazione del modello di crescita degli incendi di Prometheus. Prometheus rafforzerebbe la capacità scientifica e tecnologica del progetto consentendo la simulazione della propagazione transfrontaliera degli incendi, aiutando le autorità a prevedere come un incendio divampato in Slovenia potrebbe propagarsi in Italia e viceversa. Supporta simulazioni di scenari sia in tempo reale che previsti, ideali per sistemi di allerta precoce e per la formazione dei soccorritori. Inoltre, può integrare i modelli MaxEnt e MCDA/AHP esistenti offrendo output dinamici e specifici per il comportamento degli incendi, e consente di testare strategie di gestione del combustibile come la decespugliazione e la riforestazione. Le simulazioni di Prometheus possono anche essere sfruttate per la formazione e l'informazione pubblica, inclusi workshop ed esercitazioni antincendio. Infine, i suoi output possono essere integrati nella piattaforma digitale Karst Firewall 5.0, fornendo mappe interattive e visualizzazioni della diffusione degli incendi basate sul tempo per un processo decisionale informato e il coinvolgimento della comunità.

## 2.4 CONNESSIONE CON D1.1.2

Il Deliverable D1.1.2, intitolato "Valutazione del rischio e della vulnerabilità degli incendi boschivi in relazione ai cambiamenti climatici nella regione carsica", fornisce le basi fondamentali per lo

sviluppo degli algoritmi predittivi presentati in questo deliverable (D1.2.1); i suoi studi e obiettivi saranno utilizzati nel prossimo periodo per continuare a migliorare e ottimizzare gli algoritmi predittivi. In particolare, attraverso l'applicazione della modellazione a massima entropia (MaxEnt) e dell'analisi decisionale multicriteriale (MCDA/AHP), il D1.1.2 offre una mappatura strutturata e ad alta risoluzione della probabilità di rischio di incendi boschivi e della vulnerabilità territoriale nella regione transfrontaliera del Carso. Queste analisi confermano e ampliano direttamente la portata della modellazione predittiva sviluppata nel D1.2.1 in diversi modi chiave:

- Fornitura di dati di input e variabili: Le variabili esplicative identificate ed elaborate in D1.1.2 – che abbracciano i domini antropico, ambientale, climatico e topografico – costituiscono il set di funzionalità principale per l'addestramento dei modelli predittivi. La loro calibrazione, armonizzazione e ricampionamento ad alta risoluzione spaziale (3 m × 3 m) garantiscono la compatibilità con i requisiti di apprendimento automatico per previsioni spaziali accurate.
- Baseline per la convalida del modello: Le mappe di pericolosità degli incendi boschivi validate e la categorizzazione delle classi di vulnerabilità di D1.1.2 forniscono un benchmark rispetto al quale testare le prestazioni predittive degli algoritmi sviluppati in D1.2.1.
- Questi includono scenari climatici sia attuali che futuri, consentendo una solida valutazione della generalizzazione temporale nella modellazione predittiva.
- Miglioramento della formazione e delle prestazioni algoritmiche: I set di dati sui punti di ignizione rarefatti e di qualità controllata utilizzati in D1.1.2 consentono dati di addestramento imparziali e ben distribuiti, migliorando la qualità di apprendimento di algoritmi come MaxEnt e supportando la futura integrazione di modelli alternativi come Random Forest o classificatori di Deep Learning.
- Supporto per la progettazione di sistemi di supporto alle decisioni: Il quadro concettuale sviluppato in D1.1.2 supporta l'integrazione di algoritmi predittivi negli strumenti decisionali. La sua valutazione strutturata dei fattori tramite analisi AHP e GIS supporta la logica di ponderazione integrata nei modelli più complessi basati sull'intelligenza artificiale sviluppati qui.

In sintesi, i risultati di D1.1.2 forniscono le basi empiriche, metodologiche e spaziali che contribuiranno a rendere la modellazione algoritmica di D1.2.1 fattibile, pertinente e più robusta nel contesto della pianificazione della prevenzione e della risposta al rischio di incendi boschivi nel Carso.

## 3 ANALISI, PROGETTAZIONE E SVILUPPO

### 3.1 CONTESTO DELL'ANALISI

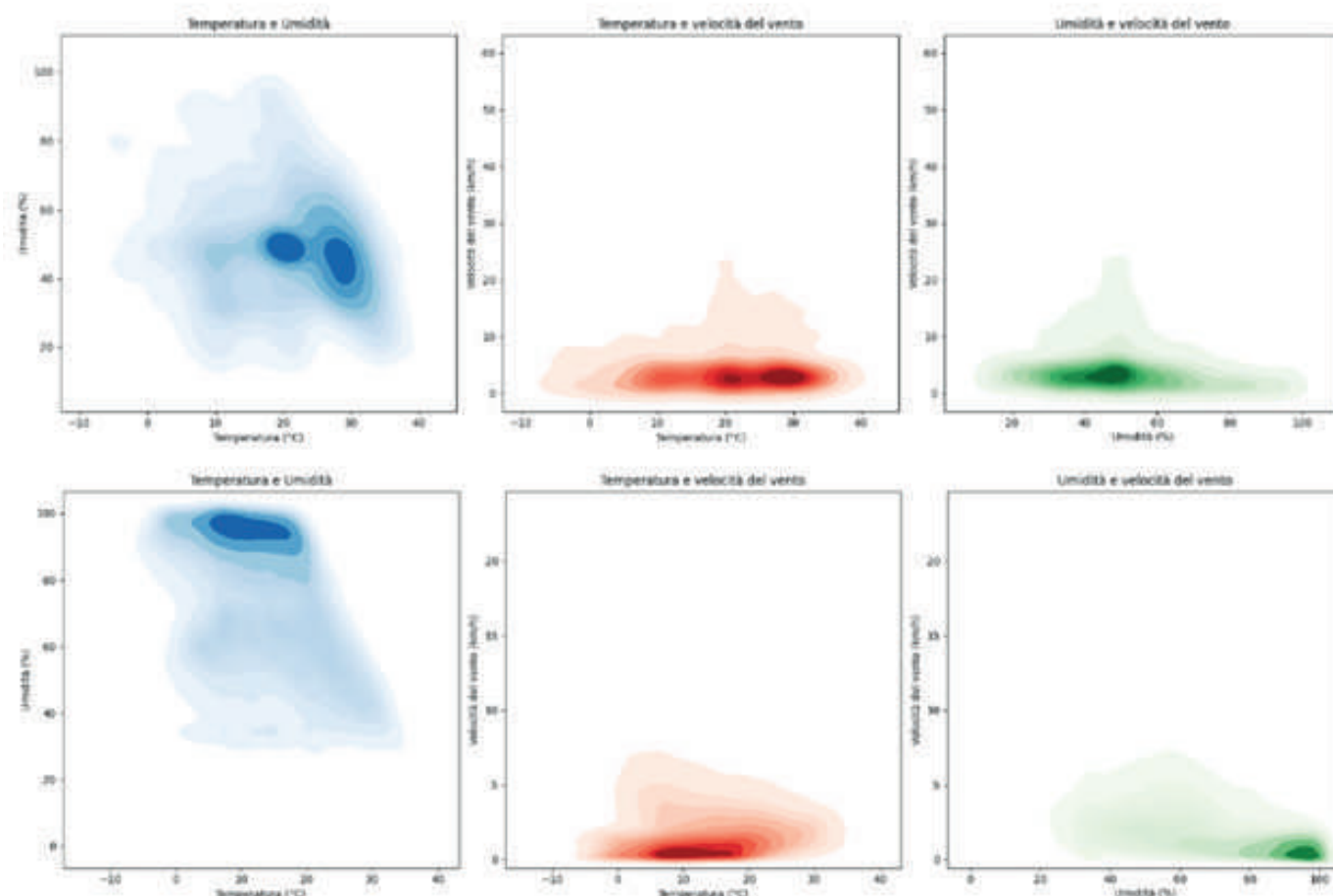
Per sviluppare un modello predittivo per gli incendi boschivi nel Carso, abbiamo esplorato diversi algoritmi di apprendimento automatico per identificare la soluzione più efficace. Il set di dati è stato costruito utilizzando dati meteorologici storici (ad esempio, temperatura, umidità, velocità del vento, precipitazioni) combinati con i dati degli incendi passati, consentendoci di strutturare una base affidabile per l'addestramento e la valutazione del modello. Dopo un'attenta fase di pre-elaborazione, abbiamo applicato tecniche di feature engineering per selezionare le variabili più rilevanti e ridurre la dimensionalità del problema. Questa fase di ottimizzazione mirava a migliorare l'accuratezza del modello riducendo al minimo i costi computazionali. Per addestrare i modelli, abbiamo utilizzato principalmente i dati meteorologici del giorno dell'incendio, tra cui temperatura, umidità, precipitazioni, vento, pressione atmosferica e radiazione solare, raccolti dalla stazione meteorologica più vicina al luogo dell'incendio.

Tabella 1 - Elenco delle stazioni meteorologiche utilizzate per l'addestramento degli algoritmi ML e il monitoraggio in tempo reale.

| ITALY - ARPA                | SLOVENIA - ARSO      |
|-----------------------------|----------------------|
| Gorizia Aeroporto           | Ajdovščina - Dolenje |
| Monfalcone Pluvio           | Bilje                |
| Trieste Ist. Nautico        | Boja Zora            |
| Sgonico-Zgonik              | Debeli rtic          |
| Trieste molo F.lli Bandiera | Godnje               |
| Borgo Grotta Gigante        | Koper Kap            |
| Gradisca                    | Koper Luka           |
|                             | Nova Gorica          |
|                             | Piran                |
|                             | Podnanos             |
|                             | Škocjan              |
|                             | Vedrijan             |

Il set di dati è stato creato importando, armonizzando ed elaborando oltre 8 milioni di dati meteorologici storici provenienti da stazioni italiane e slovene situate nell'area del Carso, oltre a 38.500 segnalazioni di incendi boschivi. Ulteriori informazioni sulle ubicazioni e le caratteristiche delle stazioni sono disponibili nell'Appendice A.

Figura 2 - Confronto di coppie di parametri. In alto: dati meteorologici fino a tre ore prima degli incendi boschivi. In basso: dati non associati agli incendi boschivi. Questi grafici evidenziano le correlazioni tra i parametri considerati.



Date le caratteristiche dei modelli precedentemente descritti, inizialmente abbiamo scelto di utilizzare un modello di apprendimento automatico basato su un albero decisionale per ottenere una prima stima dell'efficacia di questo tipo di analisi. Partendo da un database completo di dati meteorologici storici (collegati alle registrazioni degli incendi boschivi nella regione), abbiamo creato diversi set di dati con diversa copertura temporale. Questi andavano dai dati meteorologici registrati un'ora prima di un incendio boschivo a dati che risalivano fino a un mese prima dell'incendio. Questo approccio ci ha permesso di addestrare il modello ad albero decisionale a individuare modelli nel tempo che potrebbero essere rilevanti per la previsione degli incendi boschivi. Poiché l'albero decisionale è il più semplice dei modelli basati su nodi, abbiamo poi esteso la nostra valutazione ai modelli più avanzati Random Forest e XGBoost. Questi hanno fornito una maggiore accuratezza predittiva e hanno anche offerto preziose informazioni sull'importanza relativa (o "peso") di diversi parametri come umidità, temperatura, velocità del vento e altri nel contribuire alle previsioni degli incendi. I risultati preliminari hanno mostrato che questi modelli sono in grado di catturare i principali modelli ambientali che precedono gli incendi. Incoraggiati da queste scoperte, abbiamo proceduto con un

ulteriore perfezionamento del modello, esplorando ulteriori tecniche per migliorare le prestazioni predittive.

## 3.2 RISULTATI SPERIMENTALI

Abbiamo iniziato valutando le prestazioni di diversi modelli utilizzando diverse metriche. Tra queste, due sono emerse come particolarmente rilevanti per la nostra applicazione:

- **Precisione:** misura la correttezza complessiva del modello sia nelle istanze di incendio che in quelle non di incendio.
- **Richiamo (o recall):** quantifica la capacità del modello di identificare correttamente gli effettivi incendi boschivi, il che è particolarmente importante nel contesto della previsione degli incendi.

La tabella seguente riassume i punteggi di accuratezza e richiamo ottenuti testando il modello iniziale su set di dati che coprono diversi intervalli di tempo prima degli incendi.

Tabella 2 - Risultati ottenuti utilizzando tre modelli di classificazione su tre varianti del set di dati, denominati 1 GG, 1 W e 1 M, corrispondenti all'intervallo di tempo precedente l'incendio boschivo (rispettivamente: 1 giorno, 1 settimana, 1 mese).

| Modelli                   | Parametri  | 1 GG | 1 S  | 1 M  |
|---------------------------|------------|------|------|------|
| <b>Albero Decisionale</b> | Precisione | 0.68 | 0.66 | 0.65 |
|                           | Richiamo   | 0.59 | 0.52 | 0.47 |
| <b>Random forest</b>      | Precisione | 0.73 | 0.70 | 0.67 |
|                           | Richiamo   | 0.65 | 0.58 | 0.53 |
| <b>XGBoost</b>            | Precisione | 0.75 | 0.70 | 0.68 |
|                           | Richiamo   | 0.69 | 0.65 | 0.61 |

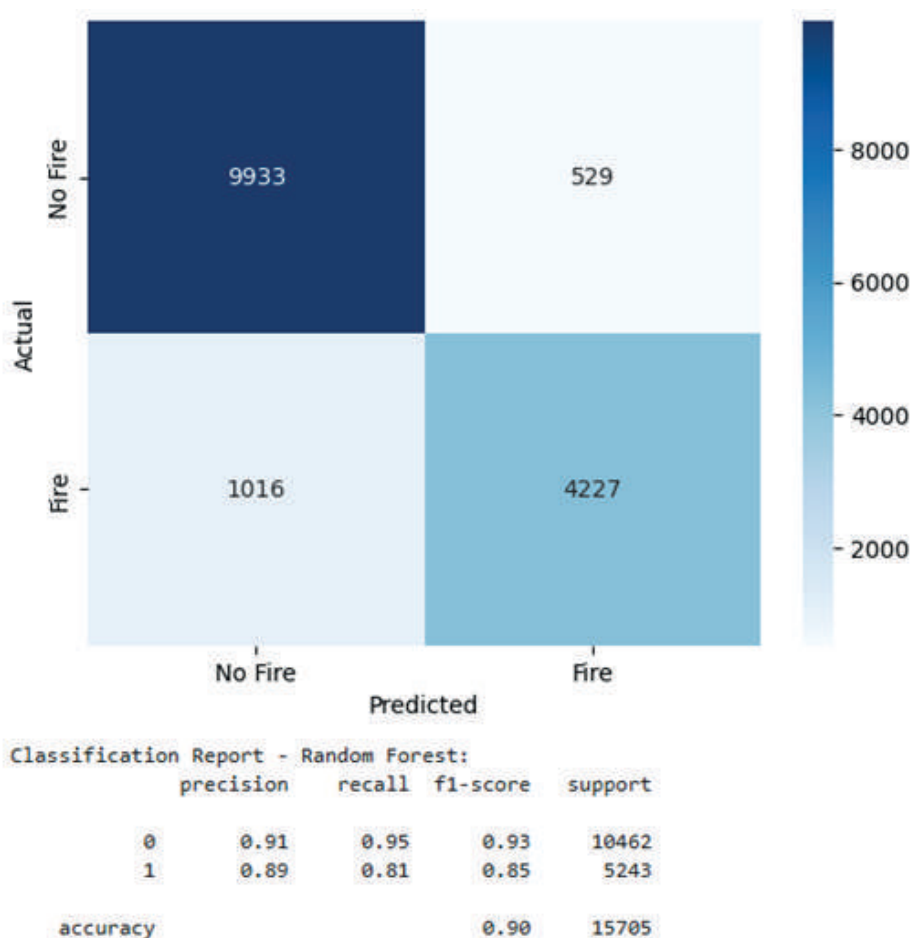
Sebbene le prestazioni complessive non siano ancora ottimali, soprattutto in termini di recall, è emersa una chiara tendenza: con l'aumentare delle dimensioni del dataset, i modelli più sofisticati, come XGBoost, superano costantemente quelli più semplici. In particolare, XGBoost mostra una solida accuratezza e una migliore recall, dimostrando una maggiore capacità di rilevare casi positivi (incendi). Questo comportamento promettente ha motivato un'ulteriore ottimizzazione e messa a punto del modello.

Attraverso l'adozione di diverse strategie di machine learning, abbiamo perfezionato la pipeline di training, migliorato la qualità del dataset e ottimizzato il modello XGBoost. Un aspetto critico che abbiamo affrontato durante lo sviluppo del modello è stato lo squilibrio nel dataset, con un numero significativamente maggiore di casi non correlati a incendi rispetto agli eventi di incendio boschivo effettivi. Questo squilibrio può fortemente influenzare il modello verso la previsione della classe di maggioranza, riducendone così la recall. Per mitigare questo problema, abbiamo applicato tecniche

di ponderazione delle classi e testato strategie di ricampionamento per garantire che il modello fosse meglio equipaggiato per rilevare casi positivi rari ma cruciali.

Le migliori prestazioni sono state ottenute utilizzando dati meteorologici che coprono una finestra temporale di tre settimane prima del verificarsi di incendi boschivi. In questa configurazione, il modello XGBoost ha raggiunto un'accuratezza del 90% e un recall dell'81%, confermando la sua robustezza nel prevedere eventi di incendio boschivo reali, riducendo al minimo i falsi negativi. Il miglioramento risultante è illustrato attraverso la matrice di confusione, che fornisce una ripartizione dettagliata delle capacità predittive del modello. La matrice presenta la distribuzione di veri positivi (TP), falsi positivi (FP), veri negativi (TN) e falsi negativi (FN), confermando che il modello XGBoost raggiunge la massima accuratezza tra i modelli testati. In particolare, il modello ha identificato con successo la maggior parte degli incendi boschivi (Classe 1), sebbene un numero non trascurabile di falsi negativi (FN) indichi ancora che alcuni incendi non sono stati rilevati. Questa analisi evidenzia sia i punti di forza che le sfide rimanenti dell'approccio attuale.

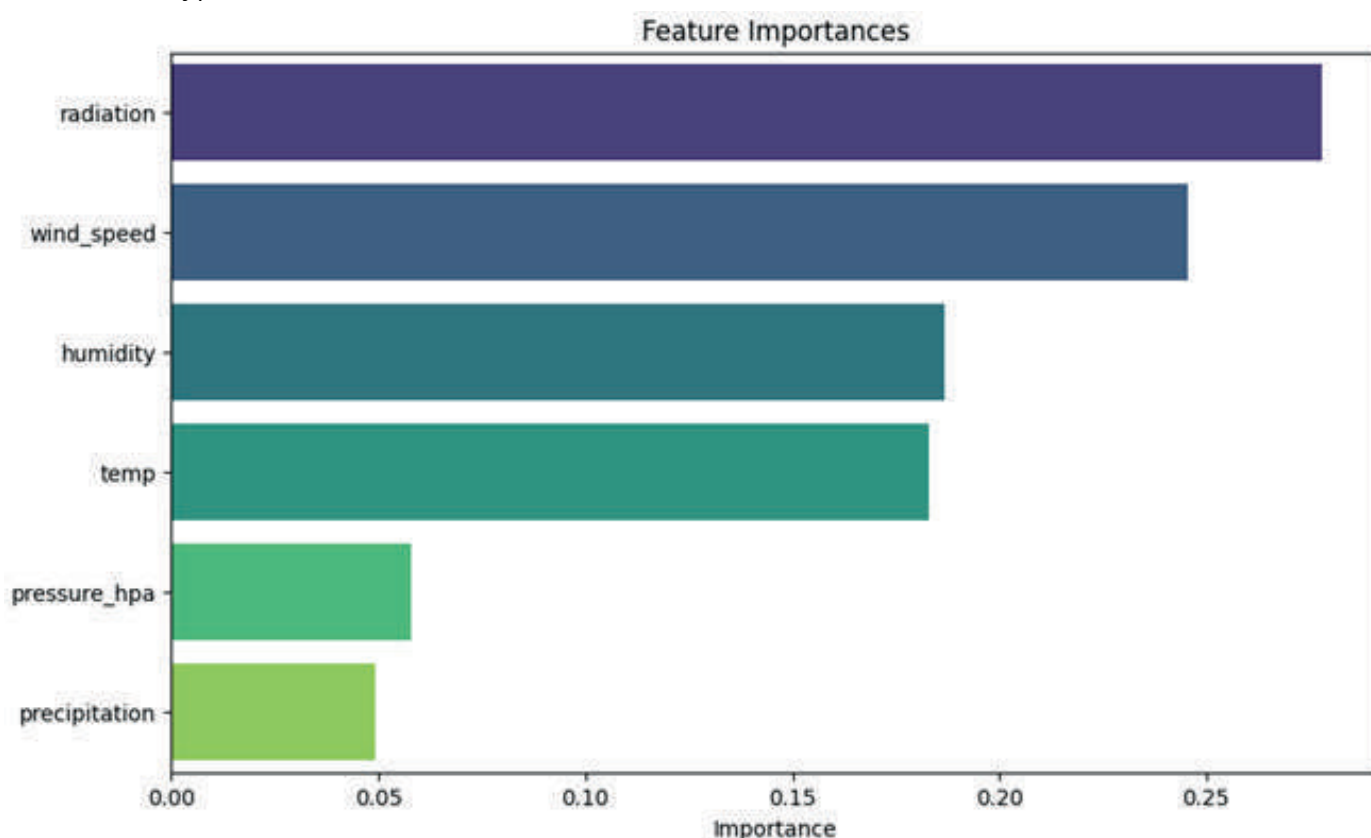
Figura 3 - Matrice di confusione che illustra il modello XGBoost più performante (fonte: progetto Python).



### 3.2.1 IMPORTANZA DELLE CARATTERISTICHE

Uno dei principali vantaggi dell'utilizzo di modelli ad albero è la possibilità di determinare l'importanza di ciascuna caratteristica. Capire quali variabili meteorologiche guidano le decisioni relative al modello è fondamentale per l'utilizzo operativo. Il grafico seguente mostra le caratteristiche più importanti secondo il modello XGBoost. Queste caratteristiche contribuiscono in modo significativo alla previsione degli incendi boschivi. Come mostrato nel grafico, le caratteristiche più influenti per la previsione degli incendi boschivi sono temperatura, velocità del vento, umidità e radiazione, che sono in linea con la comune comprensione meteorologica del comportamento degli incendi boschivi.

Figura 4 - Classificazione dell'importanza delle caratteristiche dal modello XGBoost (crediti: Infordata Media Library).



### 3.2.2. DISCUSSIONE E LAVORO FUTURO

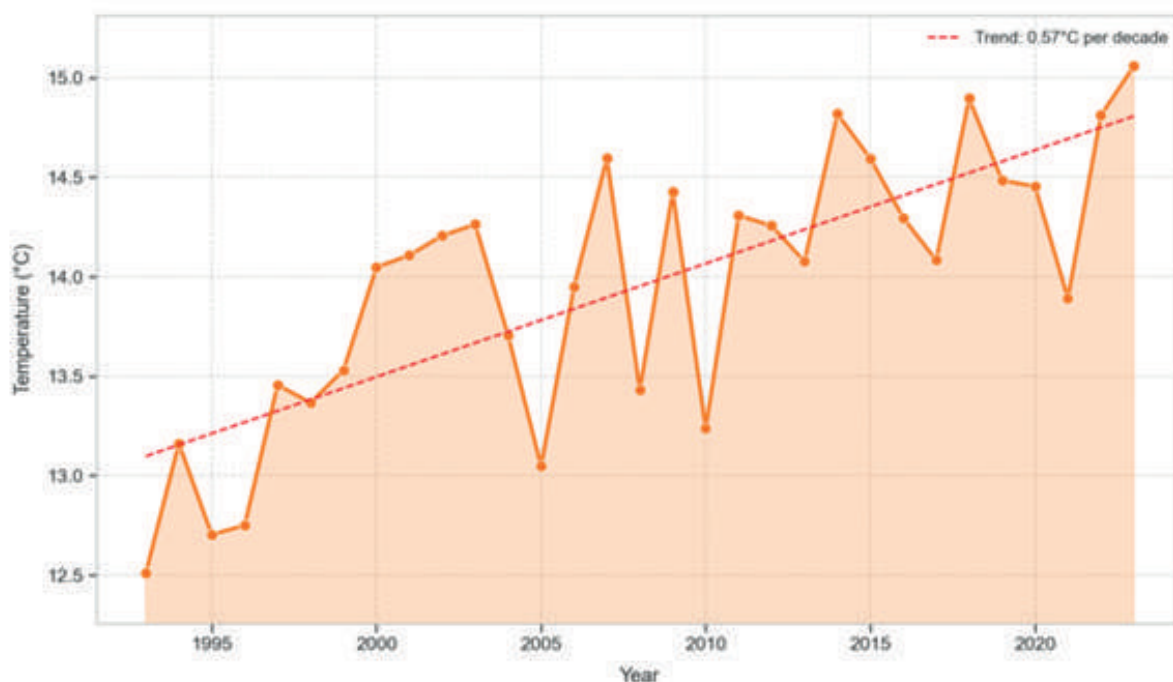
Sebbene XGBoost abbia fornito i migliori risultati in termini di prestazioni complessive, vi sono ancora margini di miglioramento. In particolare, abbiamo osservato un numero maggiore di falsi negativi nella classe degli incendi boschivi, il che suggerisce che il modello sia conservativo nella previsione degli eventi di incendio. Sebbene il modello raggiunga un solido recall dell'81%, il lavoro futuro potrebbe concentrarsi sulla gestione di questi falsi negativi, cruciali per migliorare l'affidabilità del modello in scenari di previsione di incendi reali. È importante sottolineare che i

modelli continueranno a evolversi nel tempo, beneficiando non solo di tecniche di apprendimento automatico più sofisticate, ma anche dell'inclusione di indici meteorologici derivati. Parametri come FPMC (Fine Fuel Moisture Code), DMC (Duff Moisture Code) o DC (Droughty Code) offrono ulteriori livelli di comprensione delle condizioni di rischio di incendio e saranno progressivamente integrati nel framework di previsione per perfezionare ulteriormente l'accuratezza e la reattività.

## 4 RISULTATI DI ANALISI AGGIUNTIVE DA DATI STORICI

Oltre ai risultati principali relativi alla modellazione predittiva, l'analisi dei modelli meteorologici storici e dei dati sugli incendi boschivi nella regione del Carso ha prodotto diversi importanti risultati complementari. Questi risultati indiretti, in particolare l'analisi approfondita dell'andamento della temperatura in diverse stazioni meteorologiche, forniscono un ulteriore contesto alle dinamiche del rischio di incendi e della vulnerabilità nell'area e supportano il perfezionamento degli algoritmi predittivi. L'analisi della temperatura rivela significative tendenze al riscaldamento in tutta la regione, con un aumento statisticamente significativo di  $0,57^{\circ}\text{C}$  per decennio osservato negli ultimi 30 anni (1993-2023) (figura 5).

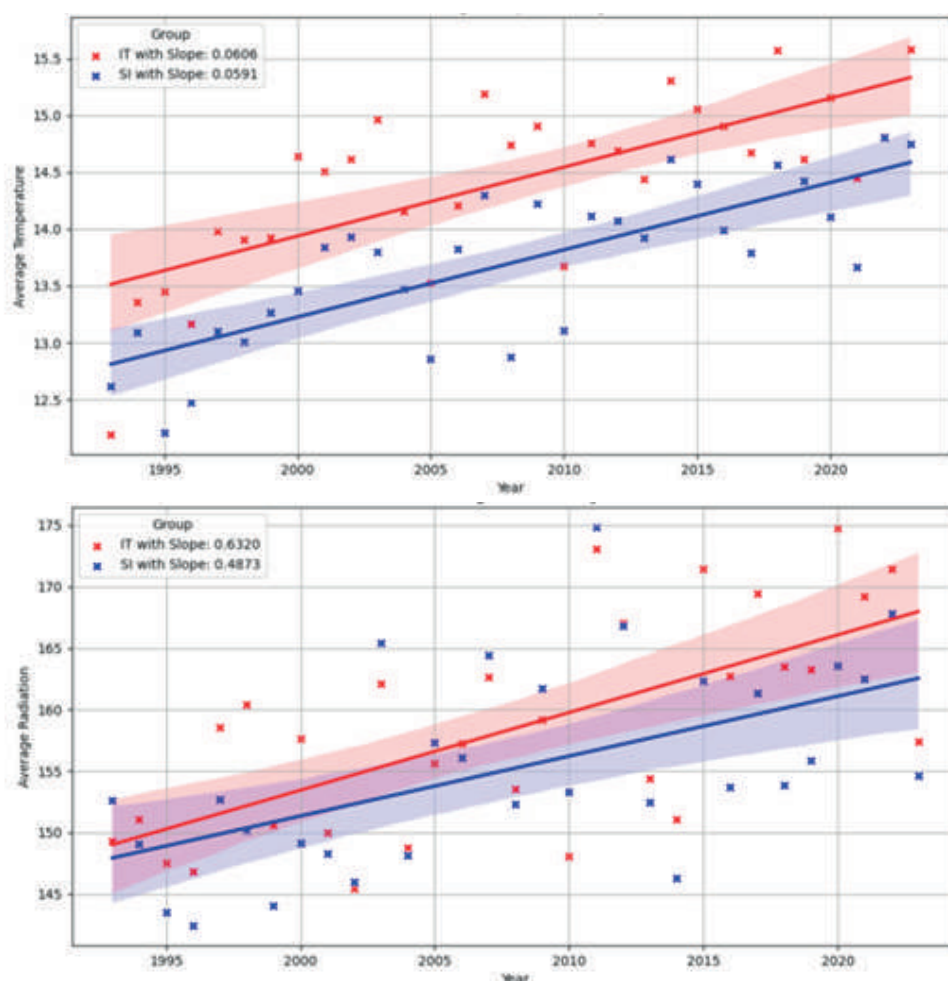
Figura 5: Andamento generale della temperatura (1993-2023). Serie temporale delle temperature medie annuali ( $^{\circ}\text{C}$ ) calcolate su tutte le stazioni meteorologiche dal 1993 al 2023. La linea arancione mostra le medie annuali con indicatori che indicano i punti dati. La linea tratteggiata rossa rappresenta l'andamento della regressione lineare. L'area ombreggiata arancione indica l'intervallo di dati. (crediti: Infodata Media Library).



Un'analisi comparativa degli indicatori climatici tra stazioni italiane e slovene rivela andamenti distinti sia per la radiazione che per la temperatura (Figura 6). Per le misurazioni della radiazione, le stazioni italiane mostrano un trend crescente più ripido (pendenza di  $0,6320 \text{ W/m}^2/\text{anno}$ ) rispetto alle stazioni slovene (pendenza di  $0,4873 \text{ W/m}^2/\text{anno}$ ), suggerendo un'intensificazione differenziale dell'esposizione solare nella regione transfrontaliera. Analogamente, i dati sulla temperatura

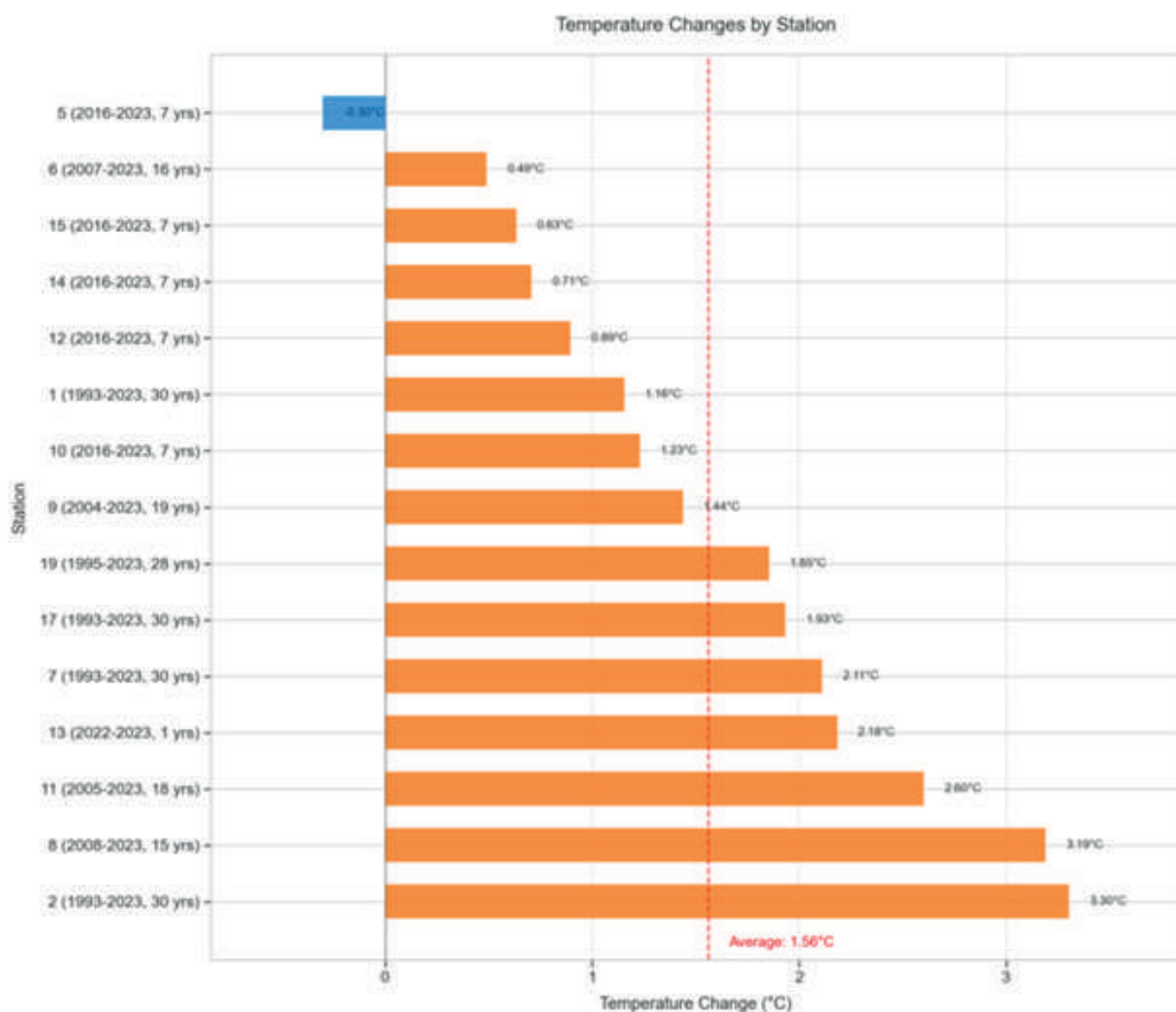
mostrano andamenti paralleli di riscaldamento, con le stazioni italiane che registrano costantemente valori più elevati (media di  $0,9^{\circ}\text{C}$  più caldi) rispetto alle loro controparti slovene durante il periodo di 30 anni. Il tasso di riscaldamento è leggermente più pronunciato nei territori italiani (pendenza di  $0,0606^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ ) rispetto alle aree slovene (pendenza di  $0,0591^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ ). Questi risultati evidenziano l'eterogeneità spaziale degli impatti dei cambiamenti climatici all'interno della regione del Carso, con potenziali implicazioni per la valutazione differenziale del rischio di incendi boschivi attraverso i confini nazionali.

Figura 6 - In alto: diagramma di dispersione che mostra i valori medi annuali di radiazione dal 1993 al 2023, con le stazioni italiane rappresentate da indicatori rossi e le stazioni slovene da indicatori blu. Per ciascun gruppo di paesi sono visualizzate linee di regressione lineare (linea rossa per le stazioni italiane, linea blu per le stazioni slovene) con i corrispondenti intervalli di confidenza al 95% rappresentati da aree ombreggiate. In basso: diagramma di dispersione che mostra le temperature medie annuali dal 1993 al 2023, con i punti dati delle stazioni italiane contrassegnati da simboli rossi e le stazioni slovene da simboli blu. A ciascun gruppo di paesi è associata una linea di regressione colorata (rossa per quella italiana, blu per quella slovena) con intervalli di confidenza al 95% rappresentati da aree ombreggiate attorno a ciascuna linea. (crediti: Infordata Media Library).



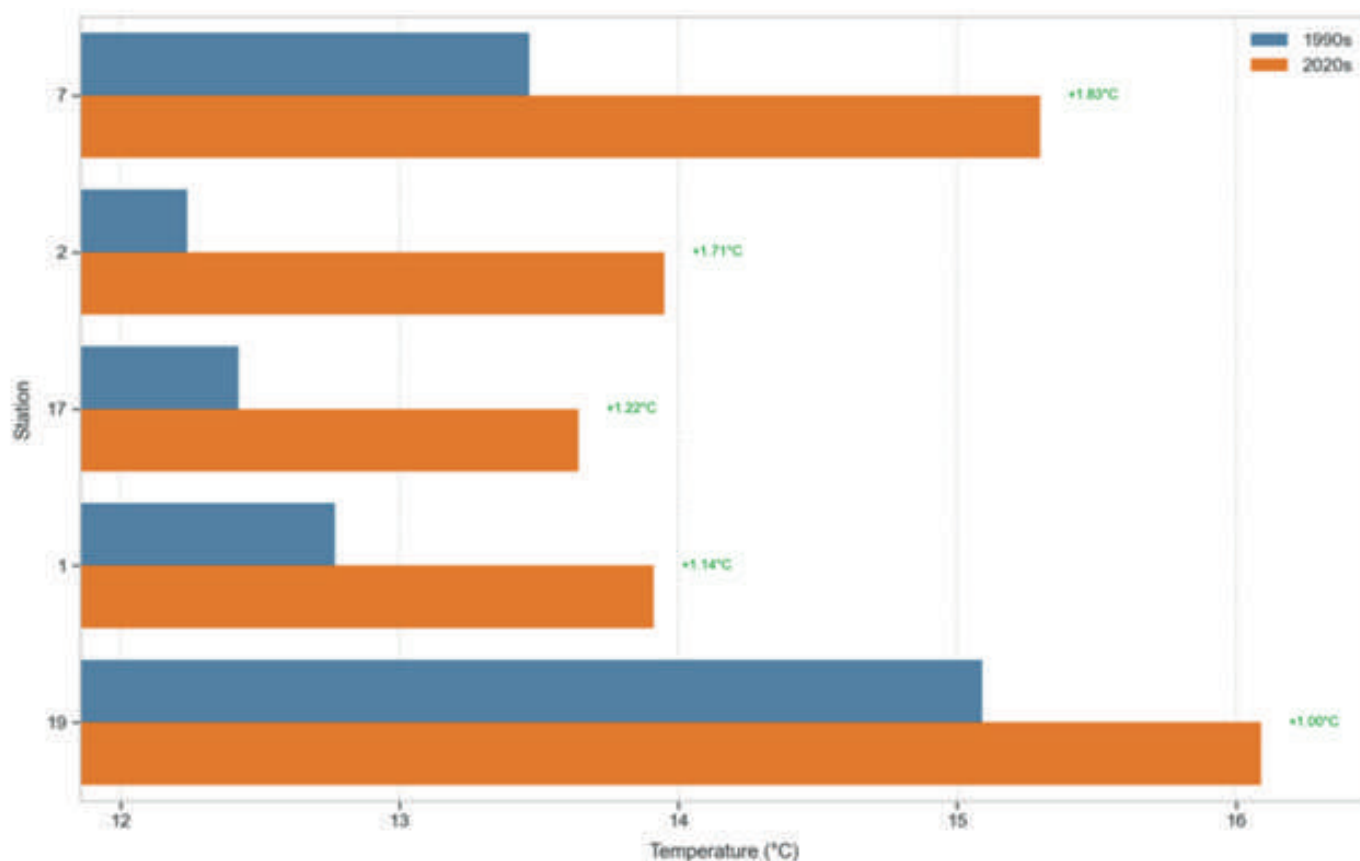
I dati specifici per stazione confermano questi risultati, con tutte le stazioni tranne una che mostrano tendenze al riscaldamento. Il riscaldamento medio in tutte le stazioni è di 1,56 °C, con alcune località che hanno registrato aumenti ancora più significativi: le stazioni 2, 8 e 11 hanno registrato aumenti di temperatura superiori a 3 °C.

Figura 7 - Variazioni di temperatura per stazione. Grafico a barre orizzontali che mostra la variazione totale della temperatura (°C) in ciascuna stazione meteorologica durante i rispettivi periodi di misurazione. Le barre sono ordinate in base all'entità della variazione, dalla maggiore (in alto) alla minore (in basso). Ogni stazione è etichettata con il relativo periodo di misurazione in anni. La linea tratteggiata rossa indica la variazione media di tutte le stazioni. (Crediti: Infodata Media Library).



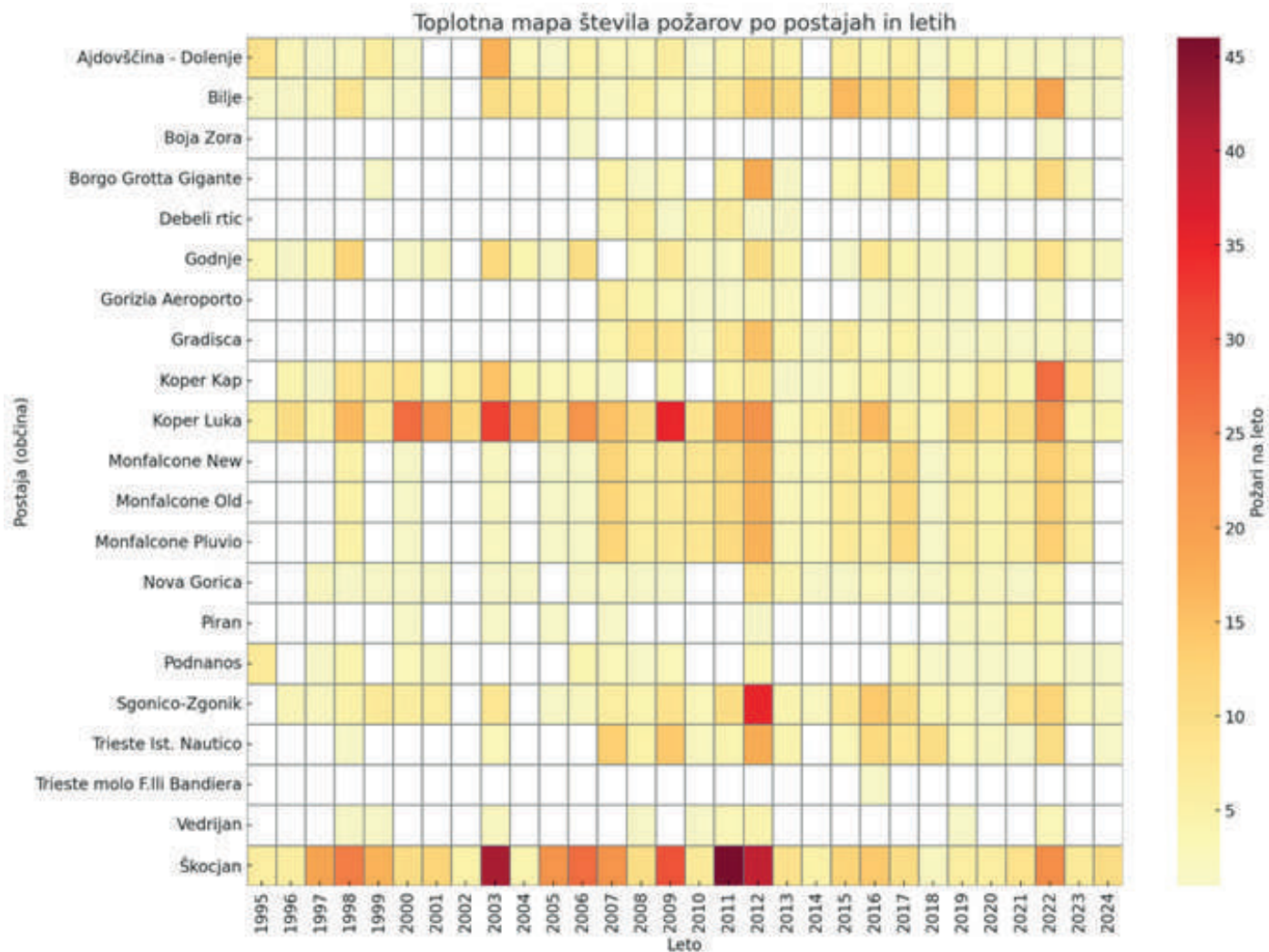
Confrontando i decenni, gli anni 2020 sono stati in media 1,38 °C più caldi rispetto agli anni '90 nelle cinque stazioni rappresentative con le registrazioni storiche più complete.

Figura 8 - Confronto tra le temperature del primo e dell'ultimo decennio. Grafico a barre orizzontali raggruppate che confronta le temperature medie tra il primo decennio (barre blu) e l'ultimo decennio (barre arancioni) del periodo di misurazione per ciascuna stazione. Le stazioni sono disposte verticalmente con i valori di temperatura visualizzati sull'asse orizzontale. I valori verdi indicano la differenza di temperatura tra i decenni. (crediti: Infodata Media Library).



Queste misurazioni empiriche non solo confermano l'intensificarsi degli effetti del cambiamento climatico sui regimi di incendi locali, ma evidenziano anche l'eterogeneità spaziale nei modelli di riscaldamento in tutta la regione del Carso. L'analisi spaziotemporale degli incendi boschivi rivela inoltre chiari modelli nella frequenza di innesco e nella distribuzione geografica, che si allineano con i gradienti di temperatura osservati. Queste informazioni non solo convalidano l'importanza dei fattori climatici e antropici utilizzati nella modellizzazione, ma offrono anche preziose informazioni per il monitoraggio a lungo termine e la pianificazione delle strategie di prevenzione degli incendi.

Figura 9 - Mappa termica con la concentrazione degli incendi boschivi nel Carso dal 1995 al 2025 (crediti: Infodata Media Library).



## 5 INTEGRAZIONE NEL PORTALE WEB KARST FIREWALL 5.0

I set di dati storici elaborati in questo documento vengono integrati nel portale web Karst Firewall 5.0, attualmente in fase di sviluppo nell'ambito delle attività del WP2. Questa piattaforma digitale è progettata per fungere da hub centralizzato per l'analisi del rischio di incendi boschivi, il supporto decisionale e il monitoraggio in tempo reale. In questa sezione anticipiamo come gli algoritmi predittivi vengono adottati in un sistema digitale di gestione e allerta incendi boschivi.

Per garantire un accesso efficiente e funzionalità di query avanzate, i registri degli incendi boschivi vengono archiviati in un database MySQL strutturato, consentendo rapide operazioni di pivoting, filtraggio e correlazione tra variabili quali ora, posizione e causa. I dati meteorologici, che includono grandi volumi di informazioni telemetriche (ad esempio, temperatura, umidità, precipitazioni), vengono archiviati in InfluxDB, un database ottimizzato per serie temporali, particolarmente adatto alla gestione di dati provenienti da sensori ad alta frequenza.

Questa architettura a doppio database supporta sia la profondità analitica che le prestazioni, consentendo agli algoritmi predittivi sviluppati in questo documento di essere collegati a flussi di dati in tempo reale e storici. Di conseguenza, il portale Karst Firewall 5.0 è destinato a diventare uno strumento operativo fondamentale per la preparazione e la risposta agli incendi boschivi transfrontalieri nella regione del Carso.

### 5.1 SET DI DATI METEOROLOGICI SUL PORTALE FIREWALL KARST

Questo portale raccoglie e memorizza i dati meteorologici provenienti dalle stazioni meteorologiche designate elencate nella seguente pagina: <https://karst.way.to.it/weather-station>

Figura 10 - Screenshot del set di dati meteorologici (fonte: Karst Firewall Portal - crediti: Infordata Media Library).

| # | ID | Name              | Station Code     | Latitude  | Longitude | Altitude | City     | Province          | Region        | Country  | Active | Options                                                                                                                                                                     |
|---|----|-------------------|------------------|-----------|-----------|----------|----------|-------------------|---------------|----------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 1  | Ajrovinc - Dolnja | AJROV-RJA_DOLNJE | 45.888200 | 13.907300 | 85       | Ajrovinc | Ajrovinc          | Gorizia       | Slovenia | Yes    |   |
| 2 | 2  | Biše              | NOVA-GOR_BISE    | 45.891600 | 13.824000 | 55       | Biše     | Mura-Kostanjevica | Gorizia       | Slovenia | Yes    |   |
| 3 | 3  | Debeli Rti        | TRZAS-ZAL        | 45.601600 | 13.535200 | 9        | Trzask   | Trzask            | Obalno-Kraška | Slovenia | Yes    |   |
| 4 | 4  | Biše Zora         | DEBEL-RTI        | 45.603200 | 13.671300 | 9        | Trzask   | Trzask            | Obalno-Kraška | Slovenia | Yes    |   |
| 5 | 5  | Gedga             | GOORJE           | 45.754700 | 13.843300 | 320      | Gedga    | Sežana            | Obalno-Kraška | Slovenia | Yes    |   |
| 6 | 6  | Koper Kap         | KOPER_KAPET-LA   | 45.548100 | 13.724600 | 4        | Koper    | Koper             | Obalno-Kraška | Slovenia | Yes    |   |
| 7 | 7  | Koper Luka        | KOPER_LUKA       | 45.564300 | 13.744800 | 2        | Koper    | Koper             | Obalno-Kraška | Slovenia | Yes    |   |

Quando si aggiunge una nuova stazione, è necessario fornire i seguenti dettagli:

- Nome della stazione.
- Codice della stazione (utilizzato per l'identificazione univoca: è importante inserirlo correttamente).
- Coordinate.
- Paese.
- Città.
- Regione/Provincia (può essere riassunta come “regione amministrativa”).

Il codice stazione è fondamentale per identificare la stazione all'interno del sistema. Si prega di verificarlo attentamente per evitare errori. Se una stazione non è più necessaria, non è necessario eliminarla. Può semplicemente essere contrassegnata come inattiva, preservando i dati storici e la coerenza del sistema.

Figura 11 - Screenshot della definizione della stazione meteorologica (fonte: Karst Firewall Portal - crediti: Infordata Media Library).



Name \*

Bija

Station Code

NOV-008\_BIJE

Latitude

45.895000

Longitude

13.824000

Altitude

55

City

Bija

Province

Mura-Korčak

Region

Gorizia

Country \*

Slovenia

Active

Yes

Save and Close Save Close without saving

I dati raccolti vengono archiviati in un database di serie temporali InfluxDB. L'utilizzo di InfluxDB offre diversi vantaggi per l'archiviazione e l'interrogazione dei dati di serie temporali:

- Prestazioni elevate: InfluxDB è ottimizzato per dati con timestamp, consentendo letture e scritture rapide, anche con volumi di dati elevati.
- Archiviazione efficiente: comprime i dati in modo efficace, rendendolo ideale per la conservazione di dati storici a lungo termine senza elevati costi di archiviazione.

- Analisi in tempo reale: ideale per dashboard e avvisi in cui informazioni aggiornate sono fondamentali.
- Scalabilità: InfluxDB può gestire dati da più dispositivi o sensori contemporaneamente senza degrado delle prestazioni.

## 5.2 PARAMETRI RACCOLTI

Ogni stazione meteorologica raccoglie e trasmette una serie di parametri ambientali, che possono includere quanto segue:

- Temperatura.
- Umidità.
- Precipitazioni.
- Velocità del vento.
- Velocità massima del vento.
- Direzione del vento.
- Direzione massima del vento.
- Radiazione.
- Pressione atmosferica (hPa).

Nota: non tutte le stazioni forniscono l'insieme completo dei parametri. La disponibilità dei dati può variare a seconda della stazione.

I dati vengono letti da ciascuna stazione almeno una volta all'ora. In genere, la maggior parte delle stazioni trasmette i dati ogni ora, garantendo aggiornamenti regolari per un monitoraggio e un'analisi quasi in tempo reale.

È possibile visualizzare i dati storici di tutte le stazioni meteorologiche alla seguente pagina:

<https://karst.way.to.it/weather-station-log>

Questa interfaccia consente di:

- Seleziona un intervallo di tempo.
- Scegli una stazione meteorologica specifica.
- Visualizza informazioni meteorologiche dettagliate per il periodo selezionato.

Fornisce un modo pratico per analizzare le condizioni meteorologiche passate e monitorare le tendenze ambientali a lungo termine.

Figura 12 - Screenshot dei registri meteorologici storici (fonte: Karst Firewall Portal - crediti: Infodata Media Library).

Date Range: 2025-04-16 00:00:00 to 2025-04-16 23:59:59  
Visualizza 1-20 di 438 elementi.

| # | ID      | Weather Station | Datetime TT         | Temperature | Humidity | Precipitation | Wind Speed | Wind Max Speed | Wind Direction | Wind Direction Max | Radiation | Pressure Hpa | Options |
|---|---------|-----------------|---------------------|-------------|----------|---------------|------------|----------------|----------------|--------------------|-----------|--------------|---------|
| 1 | 8300511 | Podnanos        | 16/04/2025 10:30:00 | 17.5        | 74       | 0             | 7          | 12             |                |                    | 0         | 0            |         |
| 2 | 8300512 | Vodijan         | 16/04/2025 10:30:00 | 16          | 67       | 0             | 8          | 8              |                |                    | 330       | 0            |         |
| 3 | 8300505 | Biše            | 16/04/2025 10:30:00 | 18.9        | 67       | 0             | 2          | 6              |                |                    | 357       | 1015.1       |         |
| 4 | 8300507 | Biše Završ      | 16/04/2025 10:30:00 | 17.7        | 64       | 0             | 8          | 8              |                |                    | 0         | 0            |         |
| 5 | 8300508 | Gorjane         | 16/04/2025 10:30:00 | 16          | 64       | 0             | 6          | 11             |                |                    | 218       | 0            |         |

Informazioni meteorologiche dettagliate per una stazione specifica in un orario scelto

Figura 13 - Screenshot delle metriche attuali della stazione meteorologica (fonte: Karst Firewall Portal - crediti: Infodata Media Library).

|                    |                     |
|--------------------|---------------------|
| ID                 | 8300505             |
| Weather Station    | Biše                |
| Datetime           | 16/04/2025 10:30:00 |
| Temperature        | 18.9                |
| Humidity           | 67                  |
| Precipitation      | 0                   |
| Wind Speed         | 2                   |
| Wind Max Speed     | 6                   |
| Wind Direction     | 45                  |
| Wind Direction Max | 74                  |
| Radiation          | 357                 |
| Pressure Hpa       | 1015.1              |

## 5.3 SISTEMA DI ATTIVAZIONE DELLE NOTIFICHE

Un sistema efficace di gestione del rischio di incendi boschivi si basa non solo su un rilevamento accurato, ma anche su una comunicazione tempestiva e mirata delle minacce. Questa sezione descrive il sistema di attivazione delle notifiche progettato per generare, distribuire e tracciare automaticamente gli avvisi quando modelli di intelligenza artificiale, sensori ambientali o telecamere di sorveglianza identificano potenziali rischi di incendio boschivo. Priorizzando gli avvisi in base alla gravità e indirizzandoli alle parti interessate appropriate, tra cui agenzie governative e soccorritori, il sistema garantisce una rapida mobilitazione e una risposta strutturata agli incidenti. Include elementi configurabili come la Matrice degli Avvisi, la creazione automatica degli incidenti e un Registro delle Notifiche completo, a supporto della piena tracciabilità e responsabilità durante l'intero processo di allerta e risposta. Quando modelli di intelligenza artificiale, sensori o telecamere identificano potenziali rischi di incendio boschivo, il sistema genera un avviso che descrive in dettaglio la natura della minaccia (ad esempio, "Incendio Rilevato"), l'ora del rilevamento e la sua gravità, con avvisi prioritari in base al livello di minaccia. Questi avvisi vengono automaticamente inoltrati alle parti interessate, tra cui agenzie governative e squadre di pronto intervento, per consentire la rapida mobilitazione di risorse come unità antincendio o droni per la valutazione della situazione. Alla ricezione di un avviso, le squadre di pronto intervento intervengono immediatamente per mitigare la minaccia, spegnendo gli incendi, creando fasce tagliafuoco o eseguendo altre misure di contenimento. Tutte le azioni vengono registrate dal sistema per l'analisi e la revisione post-incidente.

Per abilitare la gestione automatizzata del rischio di incendi boschivi, il sistema di allerta viene innanzitutto configurato tramite l'interfaccia Alert Matrix, come mostrato nello screenshot. Questa configurazione include la definizione della descrizione dell'avviso, della frequenza e delle condizioni di attivazione, come incidenti rilevati da IA, sensori o telecamere. È possibile includere o escludere posizioni specifiche e assegnare destinatari o ruoli per garantire che gli avvisi raggiungano le parti interessate corrette tramite canali di comunicazione designati. Questa matrice flessibile garantisce risposte tempestive e mirate alle minacce di incendi boschivi.

Figura 14 - Screenshot dello strumento Matrice di avviso (fonte: Karst Firewall Portal - crediti: Infodata Media Library).

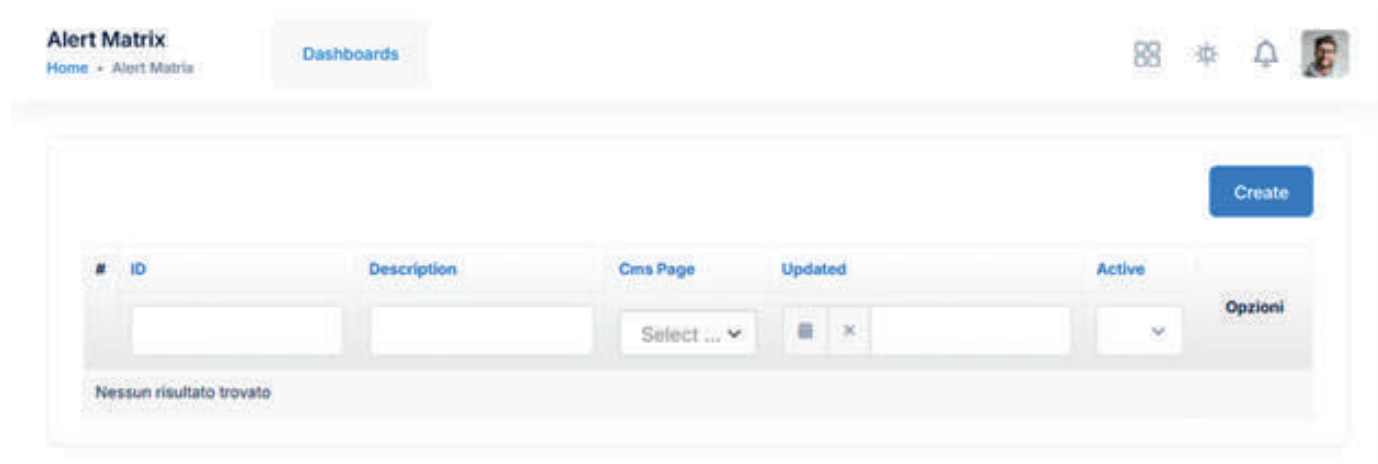
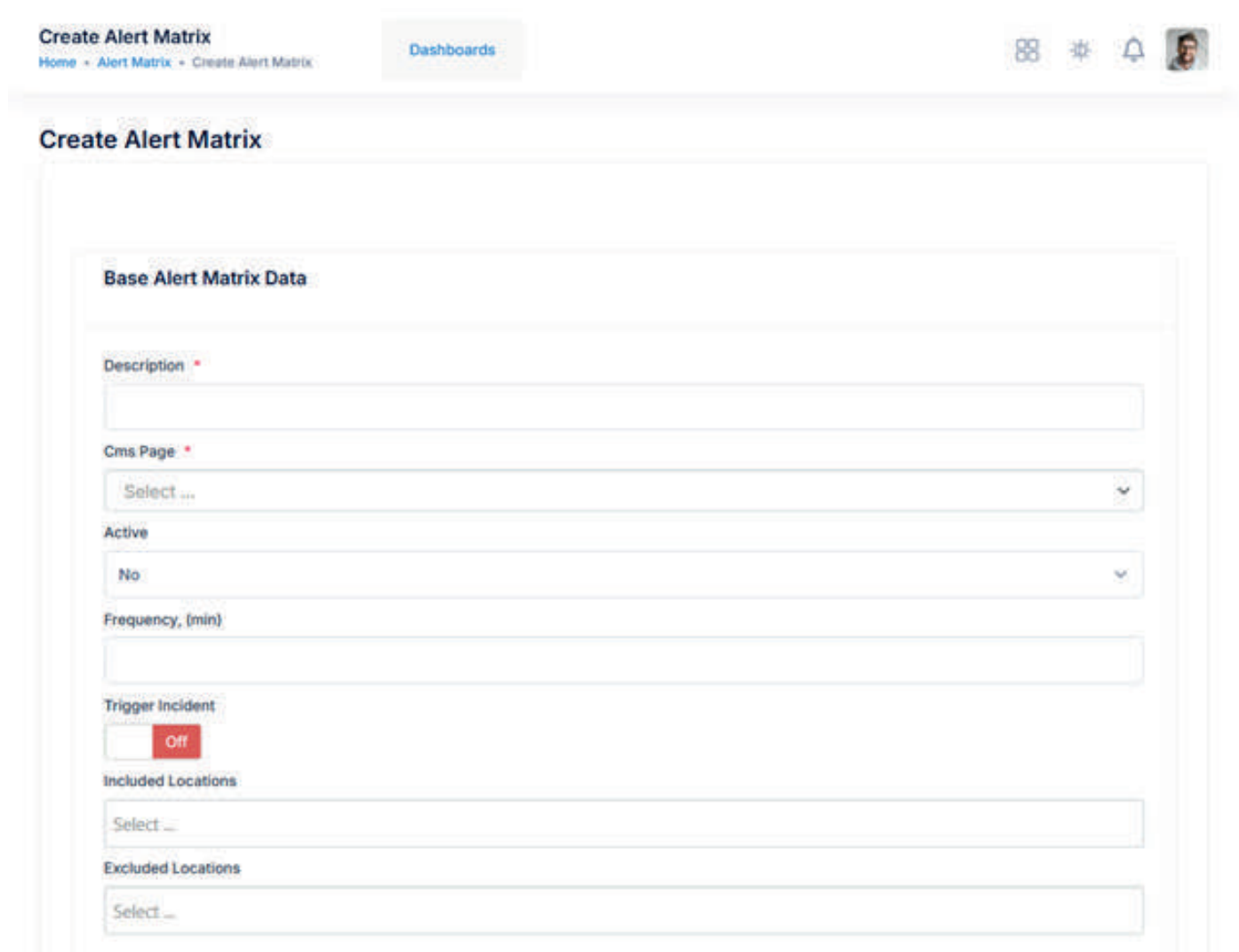
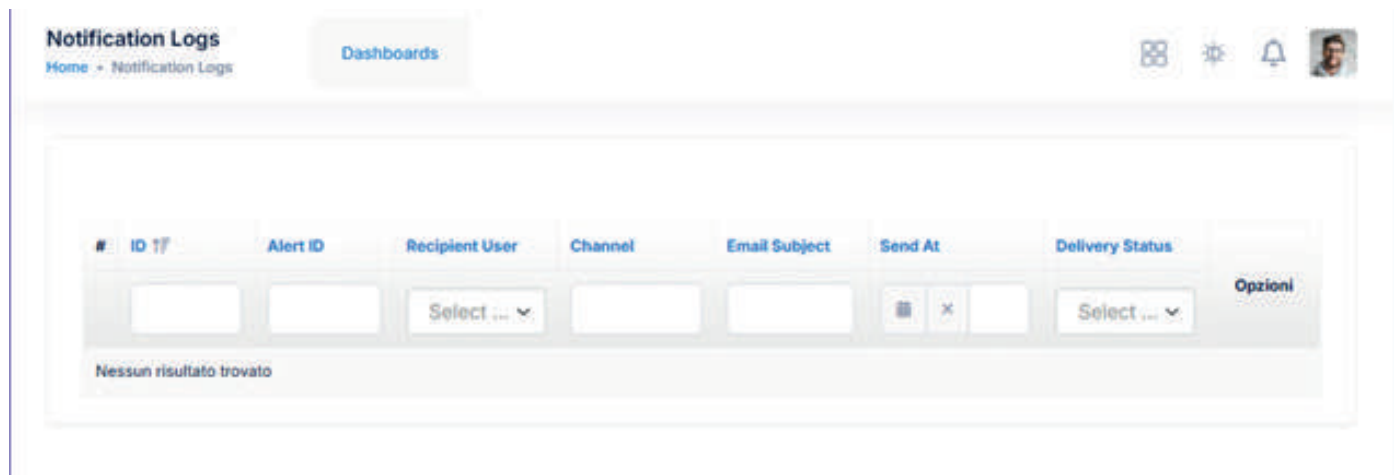


Figura 15 - Screenshot della configurazione della matrice di avviso (fonte: Karst Firewall Portal - crediti: Infodata Media Library).



Una volta attivati gli avvisi e inviate le notifiche, questi vengono automaticamente registrati nei registri delle notifiche, come mostrato nello screenshot. Questa sezione fornisce una panoramica ricercabile e filtrabile di ciascun evento di notifica, inclusi dettagli come ID avviso, utente destinatario, canale di comunicazione, oggetto dell'email, timestamp di invio e stato di consegna. Questo registro garantisce la completa tracciabilità delle comunicazioni di avviso, supportando la verificabilità e la trasparenza del sistema.

Figura 16 - Screenshot del registro delle notifiche per gli avvisi (fonte: Karst Firewall Portal - crediti: Infodata Media Library).



**Notification Logs**  
Home » Notification Logs

**Dashboards**

| # | ID | Alert ID | Recipient User | Channel | Email Subject | Send At | Delivery Status | Opzioni |
|---|----|----------|----------------|---------|---------------|---------|-----------------|---------|
|   |    |          | Select ...     |         |               |         | Select ...      |         |

Nessun risultato trovato

Per gli avvisi che richiedono l'attivazione di un incidente, il sistema è configurato per creare automaticamente un incidente quando tale avviso viene attivato. Questo incidente appena creato segna l'inizio di un processo di risposta strutturato, che include:

- Incidente: Creato immediatamente dopo l'attivazione dell'allerta.
- Intervento: Azioni intraprese in risposta all'incidente.
- Personale coinvolto: Elenco delle persone incaricate di gestire l'incidente.
- Attrezzature: Risorse e strumenti impiegati durante l'intervento.

Questo flusso di lavoro garantisce che gli eventi critici non solo vengano rilevati, ma anche seguiti da risposte sistematiche e tracciabili che coinvolgano le risorse umane e materiali necessarie.

Figura 17 - Screenshot del pannello di monitoraggio degli incidenti causati dagli incendi boschivi (fonte: Karst Firewall Portal - crediti: Infodata Media Library).



Figura 18 - Elenco degli screenshot degli incendi boschivi (fonte: Karst Firewall Portal - crediti: Infodata Media Library).

Incidents

Dashboards

Create

Visualizzo 1-20 di 38.580 elementi.

| #  | ID                   | Code                          | Us ID                | Status     | Opzioni |
|----|----------------------|-------------------------------|----------------------|------------|---------|
|    | <input type="text"/> | <input type="text"/>          | <input type="text"/> | Select ... |         |
| 1  | 48579                | 2020_11981205_SMALL PINES     | (nessun valore)      |            |         |
| 2  | 48578                | 2020_11981111_FOOT PRINT      | (nessun valore)      |            |         |
| 3  | 48577                | 2020_11981035_DUBOIS          | (nessun valore)      |            |         |
| 4  | 48576                | 2020_11980985_BIG SNAG        | (nessun valore)      |            |         |
| 5  | 48575                | 2020_11980913_SWITCHBACK      | (nessun valore)      |            |         |
| 6  | 48574                | 2020_11980821_COW CREEK       | (nessun valore)      |            |         |
| 7  | 48573                | 2020_11980770_LITTLE CHIEF    | (nessun valore)      |            |         |
| 8  | 48572                | 2020_11980587_CREEK 5         | (nessun valore)      |            |         |
| 9  | 48571                | 2020_11980528_ROCK STATION    | (nessun valore)      |            |         |
| 10 | 48570                | 2020_11980510_LEFT FIELD      | (nessun valore)      |            |         |
| 11 | 48569                | 2020_11980377_COUNTY ROAD 205 | (nessun valore)      |            |         |

Figura 19 - Screenshot del riepilogo della gestione degli incidenti (fonte: Karst Firewall Portal).

**Update Incident: 48579** [Dashboards](#)

[Home](#) • [Incidents](#) • [Update](#)

[General](#) [Characteristics](#) [Interventions](#) [Damage](#)

### Basic Information

Report Date:   Year:  Day Of Week:

### Time and Location

Fire Start:

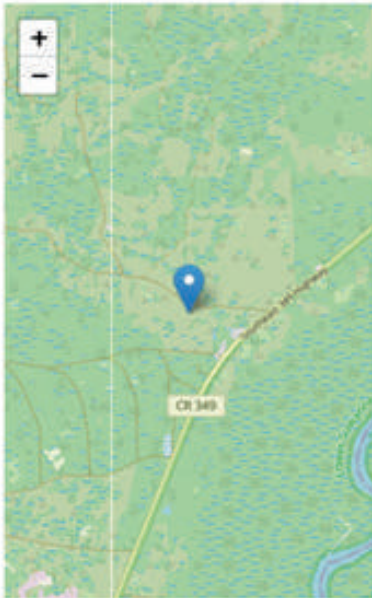
Fire End:

Total Fire Duration, (min):

Forest:

Location:

Expected Containment Location:



## 6 RIFERIMENTI

- [1] Development and Structure of Prometheus: the Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model [https://spyd.com/fgm.ca/Prometheus\\_Information\\_Report\\_NOR-X-417\\_2010.pdf](https://spyd.com/fgm.ca/Prometheus_Information_Report_NOR-X-417_2010.pdf)
- [2] COM Documentation for Programmers <https://firegrowthmodel.ca/resources/com/PrometheusCOM/index.html>
- [3] Mapping Variable Wildfire Source Areas Through Inverse Modeling - DOI: 10.3390/fire7120454 [https://www.researchgate.net/publication/386399479\\_Mapping\\_Variable\\_Wildfire\\_Source\\_Areas\\_Through\\_Inverse\\_Modeling](https://www.researchgate.net/publication/386399479_Mapping_Variable_Wildfire_Source_Areas_Through_Inverse_Modeling)
- [4] Adversarial Robustness for Deep Learning-Based Wildfire Prediction Models - DOI 10.3390/fire8020050 [https://www.researchgate.net/publication/388448962\\_Adversarial\\_Robustness\\_for\\_Deep\\_Learning-Based\\_Wildfire\\_Prediction\\_Models](https://www.researchgate.net/publication/388448962_Adversarial_Robustness_for_Deep_Learning-Based_Wildfire_Prediction_Models)
- [5] Atmospheric Modeling for Wildfire Prediction - DOI 10.3390/atmos16040441 [https://www.researchgate.net/publication/390678489\\_Atmospheric\\_Modeling\\_for\\_Wildfire\\_Prediction](https://www.researchgate.net/publication/390678489_Atmospheric_Modeling_for_Wildfire_Prediction)
- [6] Machine Learning based Wildfire Area Estimation Leveraging Weather Forecast Data - DOI: 10.5815/ijitcs.2025.01.01 [https://www.researchgate.net/publication/388820171\\_Machine\\_Learning\\_based\\_Wildfire\\_Area\\_Estimation\\_Leveraging\\_Weather\\_Forecast\\_Data](https://www.researchgate.net/publication/388820171_Machine_Learning_based_Wildfire_Area_Estimation_Leveraging_Weather_Forecast_Data)
- [7] Predicting Wildfires Using Machine Learning Methods - DOI: 10.55525/tjst.1063284 - [https://www.researchgate.net/publication/363225926\\_Predicting\\_Wildfires\\_Using\\_Machine\\_Learning\\_Methods](https://www.researchgate.net/publication/363225926_Predicting_Wildfires_Using_Machine_Learning_Methods)
- [8] Seber, G. A. in Lee, A. J., "Linear Regression Analysis", Vol. 329, John Wiley & Sons, 2012.
- [9] Trucchia, A.; Meschi, G.; Fiorucci, P.; Gollini, A.; Negro, D. Definition of Wildfire Susceptibility Maps in Italy to Understand Seasonal Wildfire Regimes at the National Level. Fire 2022, 5, 30. <https://doi.org/10.3390/fire5010030>

## 7 APPENDICE A

L'analisi presentata in questo studio si basa sui dati raccolti da 21 stazioni meteorologiche distribuite nella regione del Carso. La Tabella A.1 fornisce informazioni complete su ciascuna stazione, incluse coordinate geografiche, altitudine e codice identificativo. La Tabella A.2 mostra la distribuzione delle stazioni nella regione.

Figura 20 - Posizioni delle stazioni meteorologiche prese in considerazione per i dati storici meteo (crediti: Infordata Media Library).

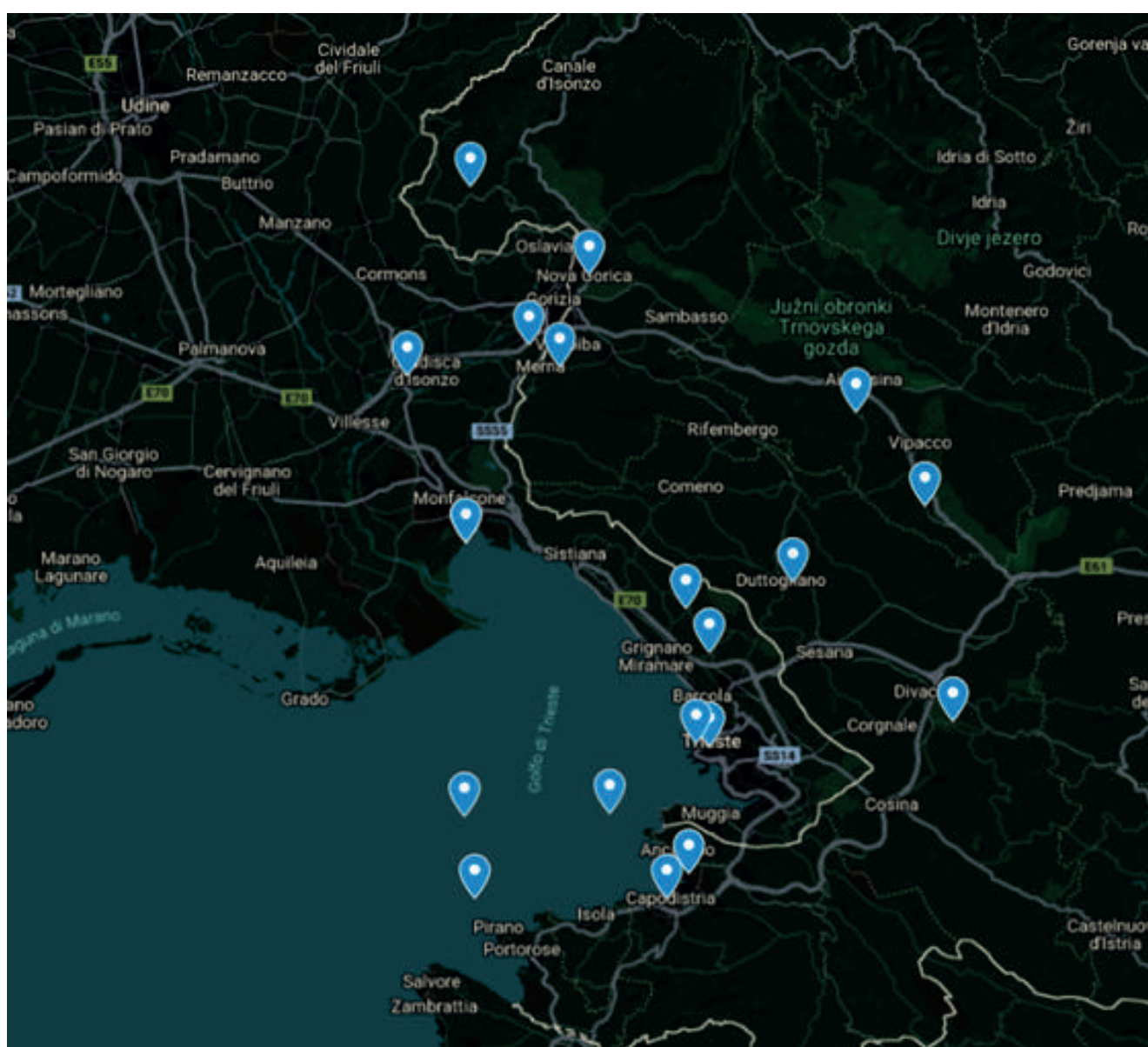


Tabella 3 - Elenco delle stazioni meteorologiche ARPA (Italia) e ARSO (Slovenia) utilizzate nell'ambito del progetto.

| ID | NOME                        | PAESE    | LATITUDINE | LONGITUDINE | ALTITUDINE |
|----|-----------------------------|----------|------------|-------------|------------|
| 1  | Ajdovščina - Dolenje        | Slovenia | 45.866200  | 13.901300   | 86         |
| 2  | Bilje                       | Slovenia | 45.895600  | 13.624000   | 55         |
| 3  | Debeli rtic                 | Slovenia | 45.591600  | 13.705200   | 0          |
| 4  | Boja Zora                   | Slovenia | 45.603200  | 13.671300   | 0          |
| 5  | Godnje                      | Slovenia | 45.754700  | 13.843300   | 320        |
| 6  | Koper Kap                   | Slovenia | 45.548100  | 13.724600   | 4          |
| 7  | Koper Luka                  | Slovenia | 45.564500  | 13.744800   | 2          |
| 8  | Nova Gorica                 | Slovenia | 45.955600  | 13.652400   | 112        |
| 9  | Piran                       | Slovenia | 45.548100  | 13.545400   | 0          |
| 10 | Podnanos                    | Slovenia | 45.804500  | 13.965900   | 153        |
| 11 | Škocjan                     | Slovenia | 45.663800  | 13.993100   | 420        |
| 12 | Vedrijan                    | Slovenia | 46.013100  | 13.541000   | 232        |
| 13 | Gorizia Aeroporto           | Italy    | 45.910390  | 13.595497   | 68         |
| 14 | Monfalcone Pluvio           | Italy    | 45.780471  | 13.536554   | 0          |
| 15 | Sgonico-Zgonik              | Italy    | 45.738004  | 13.742056   | 268        |
| 16 | Trieste Ist. Nautico        | Italy    | 45.647393  | 13.764540   | 30         |
| 17 | Trieste molo F.lli Bandiera | Italy    | 45.649996  | 13.752242   | 1          |
| 18 | Borgo Grotta Gigante        | Italy    | 45.709385  | 13.764681   | 275        |
| 19 | Gradisca                    | Italy    | 45.889791  | 13.481807   | 29         |