

D1.2.2

ALLOCAZIONE OTTIMIZZATA DELLE RISORSE: LINEE GUIDA E RACCOMANDAZIONI POLITICHE PER L'UTILIZZO DI MODELLI PREDITTIVI

KARST FIREWALL 5.0
Versione 1.0

Autore - Infordata Sistemi Srl

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:	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 di 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 e la prevenzione del rischio 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-D122
Titolo del documento / Naslov dokumenta:	ALLOCAZIONE OTTIMIZZATA DELLE RISORSE: LINEE GUIDA E RACCOMANDAZIONI POLITICHE PER L'UTILIZZO DI MODELLI PREDITTIVI
Work Package:	1
Attività / Aktivnost:	2.2
Partner responsabili (autori) / Odgovorni partnerji (avtorji):	Infodata Sistemi (Elazem, Abdelhamid; Petelin, Marko; Zidaric, Samuel; Zuccato, Nicola)
Partner coinvolti / Sodelujoči partnerji:	ZRC-SAZU (Čonč, Špela; Breg Valjavec, Mateja; Ciglič, Rok)
Luogo e data di pubblicazione / Kraj in datum objave:	Trieste, 15/10/2025

ABBREVIAZIONI	4
1 ABSTRACT	5
2 OBIETTIVI E CONTESTO	6
2.1 Obiettivo	6
2.2 Contesto	6
3 LINEE GUIDA E RACCOMANDAZIONI PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLE RISORSE UTILIZZANDO MODELLI PREDITTIVI	8
3.1 Evoluzione Cronologica degli Strumenti di Previsione degli Incendi Boschivi	8
3.2 Linee Guida per l'Allocazione delle Risorse Basate su Modelli Predittivi	12
3.2.1 Allocazione delle Risorse di Prevenzione	13
3.2.2 Allocazione delle Risorse di Risposta	14
3.2.3 Implementazione del Supporto Decisionale	15
3.2.4 Condivisione Transfrontaliera delle Risorse	16
3.3 Raccomandazioni Politiche per la Prevenzione e Gestione degli Incendi Boschivi	16
3.3.1 Raccomandazioni per l'Implementazione Tecnica	17
3.3.2 Strategie di Adozione Organizzazionale	18
3.3.3 Raccomandazioni di Politica e Governance	19
3.3.4 Considerazioni Etiche e Operative	20
3.4 Quadro di Collaborazione Transfrontaliera	20
3.4.1 Condivisione Unificata delle Informazioni	20
3.4.2 Meccanismi di Risposta Coordinata	21
3.4.3 Armonizzazione delle Politiche	21
4 RIFERIMENTI	23

ABBREVIAZIONI

AI	Artificial Intelligence
AHP	Analytic Hierarchy Process
ARPA FVG	Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje (Slovenian Environment Agency)
CCFDRS	Canadian Forest Fire Danger Rating System
DMC	Duff Moisture Code
EU	European Union
FFMC	Fine Fuel Moisture Code
FBP	Fire Behaviour Prediction
FWI	Fire Weather Index
GIS	Geographic Information System
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis
ML	Machine Learning
TPI	Topographic Position Index
TWI	Topographic Wetness Index
XGBOOST	eXtreme Gradient Boosting
ZGS	Zavod za gozdove Slovenije (Slovenian Forest Service)
BUI	Build Up Index
DC	Drought Code
ISI	Initial Spread Index

1 ABSTRACT

Questo deliverable fornisce linee guida prospettiche e raccomandazioni politiche per l'allocazione ottimizzata delle risorse nella prevenzione e gestione degli incendi boschivi nella regione transfrontaliera del Carso italo-sloveno (Kras/Carso). Basandosi sui risultati di modelli predittivi avanzati sviluppati nell'ambito del progetto Karst Firewall 5.0 (D1.2.1) e sulle valutazioni di vulnerabilità territoriale (D1.1.2), il documento enfatizza il ruolo trasformativo della tecnologia—specialmente dell'Intelligenza Artificiale (AI)—nel migliorare la preparazione, la risposta e l'efficienza delle risorse. Mentre gli strumenti attuali come droni, satelliti, telecamere a infrarossi e reti di sensori IoT svolgono già un ruolo critico nella sorveglianza antincendio in tempo reale, i recenti progressi nell'AI cognitiva, nell'apprendimento automatico e nel deep learning stanno abilitando una nuova era di gestione predittiva degli incendi boschivi.

Queste linee guida forniscono ai dipartimenti forestali e ai soccorritori un quadro unificato per:

- Allocazione delle risorse basata sui dati utilizzando previsioni dinamiche del rischio.
- Protocolli di collaborazione transfrontaliera e raccomandazioni politiche.
- Flussi di lavoro decisionali integrati con AI.

Le soluzioni potenziate dall'AI—inclusi eXtreme Gradient Boosting (XGBoost), architetture di deep learning e analisi bayesiana—hanno dimostrato miglioramenti significativi nella previsione del comportamento del fuoco integrando dati meteorologici dinamici, registri storici degli incendi e caratteristiche territoriali come geomorfologia e copertura vegetale.

2 OBIETTIVO E CONTESTO

2.1 OBIETTIVO

L'obiettivo primario di questo documento è fornire linee guida complete e raccomandazioni politiche per l'allocazione ottimizzata delle risorse nella prevenzione e gestione degli incendi boschivi per i dipartimenti forestali, i servizi antincendio e i soccorritori nella regione transfrontaliera del Carso italo-sloveno. Specificamente, questo deliverable mira a:

- Stabilire linee guida pratiche per integrare i modelli predittivi nelle decisioni di allocazione delle risorse.
- Delineare raccomandazioni per l'adozione dell'AI nelle politiche di prevenzione e gestione degli incendi boschivi.
- Presentare un quadro per la collaborazione transfrontaliera nella condivisione delle risorse e nella risposta congiunta.
- Documentare l'evoluzione degli strumenti di previsione degli incendi boschivi e i loro rispettivi contributi.

2.2 CONTESTO

L'altopiano del Kras/Carso, che si estende per circa 1.000 km² (30% in Italia, 70% in Slovenia), rappresenta un paesaggio ecologico e amministrativo unico caratterizzato da terreno calcareo, modelli di vegetazione diversificati e un mix di climi mediterranei e continentali. Questa regione transfrontaliera affronta rischi di incendi boschivi in escalation dovuti a molteplici fattori:

- **Impatti del Cambiamento Climatico:** L'analisi dei dati storici rivela un aumento di 1,4°C nella temperatura media dal 1993 al 2023, con stazioni italiane in riscaldamento a +0,0606°C/anno e stazioni slovene a +0,0591°C/anno (ARPA FVG, 2023; ARSO, 2023). Questo trend di riscaldamento è accompagnato da un aumento della radiazione solare (+0,6320 W/m²/anno in Italia e +0,4873 W/m²/anno in Slovenia), contribuendo all'accresciuta suscettibilità agli incendi boschivi.
- **Cambiamenti nell'Uso del Suolo:** L'abbandono dei pascoli secchi tradizionali e gli sforzi di rimboschimento del XIX secolo, particolarmente con pino nero, hanno creato paesaggi ricchi di combustibile inclini alla propagazione del fuoco (Progetto Karst Firewall 5.0, Deliverable 1.1.2, 2024).
- **Fattori Antropogenici:** L'analisi dei dati storici degli incendi boschivi indica che il 67,4% degli incendi si è verificato entro 50 metri dalle strade, evidenziando l'attività umana come fonte significativa di ignizione (Progetto Karst Firewall 5.0, Deliverable 1.1.2, 2024). La distribuzione delle cause varia tra i paesi, con l'incendio doloso più prevalente in Slovenia (18,1%) rispetto all'Italia (4,5%).

I deliverable precedenti nel progetto Karst Firewall 5.0 hanno stabilito fondamenti critici per questo lavoro:

- Il Deliverable 1.1.2 ha condotto valutazioni complete di pericolo e vulnerabilità degli incendi boschivi utilizzando modellazione MaxEnt e Analisi Decisionale Multi-Criterio con Processo

di Analisi Gerarchica (MCDA/AHP). Questa valutazione ha identificato che attualmente il 16% dell'area (principalmente zone costiere e insediamenti) presenta livelli di pericolo significativamente o estremamente alti. La valutazione della vulnerabilità ha classificato il 93% della regione come avente alta vulnerabilità (67% significativamente alta, 25% estremamente alta).

- Il Deliverable 1.2.1 ha sviluppato algoritmi AI predittivi per la valutazione del rischio di incendi boschivi integrando dati storici degli incendi boschivi (1990-2024), registri meteorologici e componenti dell'Indice Meteorologico del Fuoco (FWI). Il modello eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) ha raggiunto un'accuratezza del 90% nel predire eventi di ignizione, il che significa che ha classificato correttamente i giorni di incendio/non-incendio in 9 casi su 10 durante la validazione. Il modello ha raggiunto un richiamo dell'81% utilizzando una finestra meteorologica storica di tre settimane, con temperatura, velocità del vento, umidità e radiazione solare identificati come i predittori più influenti (Progetto Karst Firewall 5.0, Deliverable 1.2.1, 2025).

Queste analisi precedenti forniscono la base scientifica per le linee guida di ottimizzazione delle risorse presentate in questo documento. Sfruttando questi insight guidati dai dati, i dipartimenti forestali e i servizi antincendio possono allocare strategicamente le risorse di prevenzione e risposta per massimizzare l'efficacia e migliorare la resilienza regionale contro le minacce degli incendi boschivi.

3 LINEE GUIDA E RACCOMANDAZIONI PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLE RISORSE UTILIZZANDO MODELLI PREDITTIVI

L'innovazione tecnologica è già diventata indispensabile nella prevenzione degli incendi boschivi e nella risposta alle emergenze, con strumenti come droni, telecamere a infrarossi, immagini satellitari e reti di sensori IoT che consentono rilevamento più veloce, migliore consapevolezza situazionale e dispiegamento più efficiente delle risorse. Tuttavia, negli ultimi anni, l'Intelligenza Artificiale (AI)—e in particolare l'apprendimento automatico—è emersa come una forza trasformativa capace di ridefinire le pratiche tradizionali di lotta antincendio. Le tecnologie AI ora offrono capacità senza precedenti nell'analisi predittiva, modellazione comportamentale e supporto decisionale, consentendo alle autorità di prevedere il rischio di incendio con crescente precisione spaziale e temporale. Attraverso l'integrazione di dati storici degli incendi, registri meteorologici e input geospaziali—inclusi morfologia del terreno, vegetazione e tendenze climatiche—modelli avanzati come XGBoost, reti neurali profonde e sistemi di inferenza bayesiana stanno abilitando quello che ora viene definito gestione cognitiva degli incendi boschivi. Questi modelli non solo migliorano l'accuratezza delle previsioni ma si adattano anche dinamicamente alle condizioni che cambiano, offrendo guidance in tempo reale sia per la prevenzione che per la risposta rapida. Questo capitolo presenta una panoramica cronologica dell'evoluzione degli strumenti di previsione degli incendi boschivi (Sezione 4.1), seguita da linee guida pratiche (Sezione 4.2) su come queste capacità predittive possano ottimizzare l'allocazione delle risorse—prima, durante e dopo gli eventi di incendi boschivi. La discussione riflette il passaggio dalla mappatura statica del pericolo ai quadri decisionali dinamici e potenziati dall'AI che sono essenziali per la governance degli incendi boschivi resiliente al clima e transfrontaliera.

3.1 EVOLUZIONE CRONOLOGICA DEGLI STRUMENTI DI PREVISIONE DEGLI INCENDI BOSCHIVI

Lo sviluppo degli strumenti di previsione degli incendi boschivi si è evoluto significativamente nel tempo, con ogni nuovo approccio che costruisce e migliora le metodologie precedenti. Comprendere questa evoluzione fornisce un contesto prezioso per le linee guida presentate in questo documento.

Sistemi di Osservazione Precoce (Pre-1970)

- **Pannelli Manuali di Pericolo Incendi:** Sistemi pre-computer utilizzando dati meteorologici registrati a mano e osservazioni dell'umidità del combustibile per calcolare il rischio locale.
- **Misuratori di Pericolo Incendi Forestali McArthur (anni '60, Australia):** Dispositivi portatili a regolo calcolatore che stimano il pericolo di incendio utilizzando temperatura, umidità, vento e fattori di siccità.

Contributo: questi sistemi hanno posto le basi per le metriche standardizzate del pericolo di incendio

ma mancavano di scalabilità.

Sistemi Tradizionali di Valutazione del Pericolo Incendi (1970-1990)

- **Indice Meteorologico Canadese del Fuoco (FWI):** Sviluppato negli anni '70, FWI fornisce valutazioni numeriche del potenziale relativo di incendio basate su osservazioni meteorologiche. Il sistema utilizza temperatura, umidità relativa, velocità del vento e precipitazioni per calcolare diversi componenti (FFMC, DMC, DC, ISI, BUI, FWI) che rappresentano il contenuto di umidità di diversi strati di combustibile e il potenziale comportamento del fuoco (Servizio Forestale Canadese, 2009).
- **Sistema Nazionale di Valutazione del Pericolo Incendi degli Stati Uniti (NFDRS, 1972):** Ha introdotto modelli di umidità del combustibile e l'Indice di Combustione (BI) per gli Stati Uniti, complementando FWI con specificità regionale. Contributo: Ha dimostrato la necessità di sistemi adattati regionalmente.

Contributo: Hanno stabilito metriche standardizzate per la valutazione del pericolo di incendio che rimangono fondamentali per i sistemi moderni. Tuttavia, questi primi sistemi mancavano di specificità spaziale e non tenevano conto dei fattori ambientali locali oltre al tempo.

Analisi Spaziale Basata su GIS (1990-2000)

- **Mappatura della Probabilità di Combustione:** Ha combinato variabili topografiche (pendenza, esposizione) con classificazioni della vegetazione per generare rappresentazioni spaziali del rischio di incendio.
- **Modello di Crescita del Fuoco FARSITE (anni '90, USA):** Ha espanso la modellazione spaziale integrando il principio di Huygens della propagazione del fuoco con dati del paesaggio.

Contributo: Ha introdotto dimensioni spaziali alla valutazione del rischio di incendio, abilitando l'allocazione specifica delle risorse per zona. Questi approcci erano limitati da input statici che non si adattavano alle condizioni che cambiavano.

Integrazione del Telerilevamento (2000-2010)

- **Rilevamento degli Incendi Basato su Satellite:** Sistemi come MODIS e successivamente satelliti Sentinel hanno abilitato il rilevamento e monitoraggio degli incendi quasi in tempo reale.
- **VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite):** Rilevamento degli incendi a più alta risoluzione (375 m) rispetto a MODIS, operativo dal 2011.
- **EFFIS (Sistema Europeo di Informazione sugli Incendi Forestali):** Piattaforma a scala UE che combina dati satellitari, previsioni meteorologiche e mappe di vulnerabilità (lanciato negli anni 2000). Contributo: Ha fornito monitoraggio del rischio a scala continentale ma mancava di granularità predittiva.

Contributo: Ha migliorato le capacità di rilevamento precoce e fornito dati per l'analisi post-incendio, ma offriva capacità predittiva limitata.

Modelli Deterministici di Propagazione del Fuoco (2000-2010)

- **Modello di Crescita del Fuoco Prometheus:** Sviluppato in Canada e adottato internazionalmente, Prometheus simula la propagazione del fuoco basata su tempo, topografia e caratteristiche del combustibile (Servizio Forestale Canadese, 2009).
- **BehavePlus (USA, anni 2000):** Sistema open-source che modella il comportamento del fuoco (tasso di propagazione, lunghezza della fiamma) sotto condizioni variabili.
- **FIRETEC (USA, anni 2010):** Modello basato sulla fisica che simula turbolenza e interazioni fuoco-atmosfera a piccole scale. FIRETEC ha contribuito ad aumentare la comprensione meccanicistica delle dinamiche del fuoco ma limitato alle applicazioni di ricerca.

Contributo: Ha abilitato la simulazione del comportamento del fuoco sotto diversi scenari, supportando la pianificazione della risposta tattica. Limitato da requisiti computazionali e semplificazioni delle dinamiche complesse del fuoco.

Approcci Statistici di Machine Learning (anni 2010)

- **Modellazione MaxEnt:** Come implementato nel Deliverable 1.1.2, MaxEnt utilizza dati di sola presenza per predire distribuzioni spaziali della probabilità di incendi boschivi (Progetto Karst Firewall 5.0, Deliverable 1.1.2, 2024).
- **Analisi Decisionale Multi-Criterio (MCDA):** Ha integrato molteplici fattori attraverso combinazioni ponderate per valutare la vulnerabilità.
- **Regressione Logistica e SVM:** Prime applicazioni ML per previsioni binarie incendio/non-incendio. Ha dimostrato il potenziale del ML ma ha avuto difficoltà con dataset di incendi boschivi sbilanciati.

Contributo: Ha migliorato la valutazione spaziale del rischio integrando sistematicamente molteplici variabili e conoscenza esperta. Principalmente statico in natura, richiedeva aggiornamenti manuali con nuovi dati.

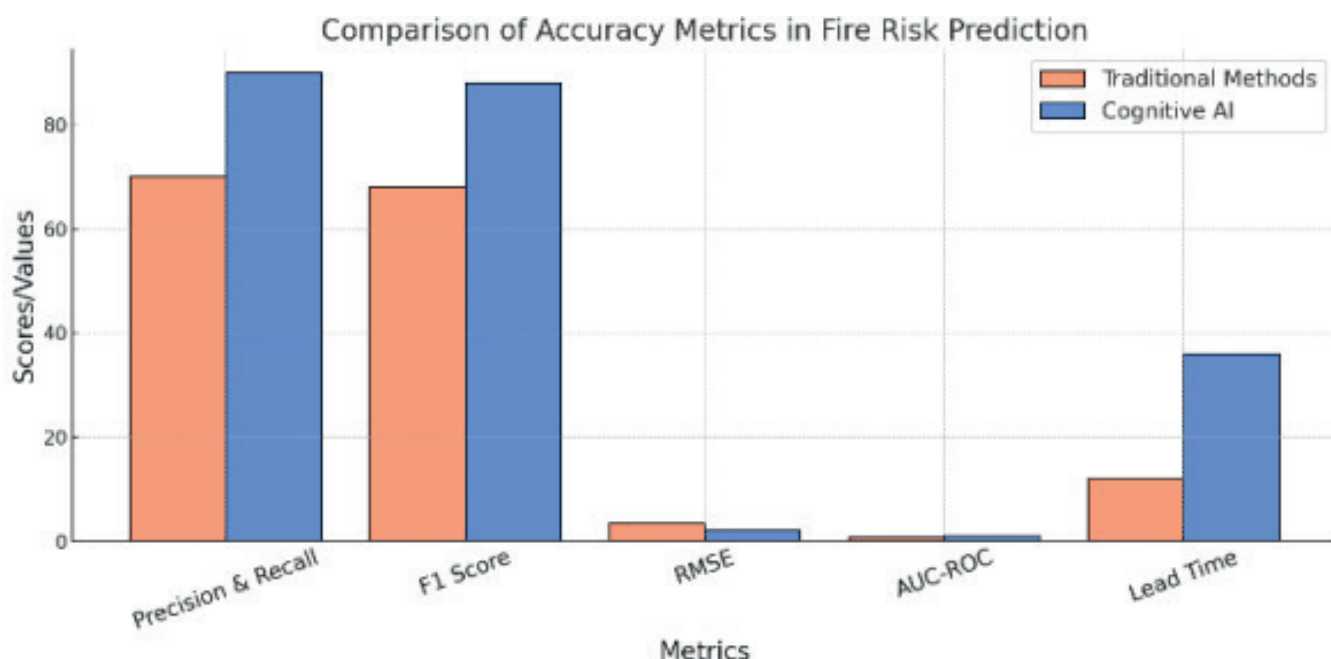
Modelli AI/ML Dinamici (anni 2020)

- **Modelli Random Forest e Decision Tree:** Prime applicazioni di machine learning che miglioravano l'accuratezza delle previsioni identificando relazioni non lineari tra variabili.
- **Modello XGBoost:** Come implementato nel Deliverable 1.2.1, questo approccio avanzato di ensemble learning ha raggiunto un'accuratezza del 90% nel predire eventi di ignizione (classificando correttamente giorni di incendio/non-incendio in 9 casi su 10) sfruttando dati meteorologici e di incendi storici (Progetto Karst Firewall 5.0, Deliverable 1.2.1, 2025).
- **Deep Learning (CNN/RNN):** Utilizzato per l'analisi di immagini satellitari per predire la propagazione del fuoco da modelli storici di combustione.

- **Modelli Ibridi Ensemble:** hanno combinato ML con simulazioni basate sulla fisica e migliorato l'accuratezza nella previsione di eventi rari, aumentando però i costi computazionali.

Contributo: Hanno significativamente migliorato l'accuratezza delle previsioni e abilitato la valutazione dinamica del rischio basata su condizioni che cambiano, ma richiedono dati storici sostanziali per l'addestramento.

Figura 1 - Confronto delle metriche di accuratezza nella previsione del rischio di incendi (Grafico a Barre).



Strumenti Emergenti (2020-Presente)

- **Monitoraggio AI-Powered dei Social Media:** Strumenti come l'analisi API di Twitter (X) per il rilevamento precoce degli incendi via rapporti crowdsourced.
- **Digital Twins:** Repliche virtuali dei paesaggi per test di scenario "what-if" in tempo reale (ad es., Siemens Xcelerator).

Contributo: Ha colmato il sensing umano e tecnologico ma ha sollevato preoccupazioni sulla privacy.

Sistemi Integrati Transfrontalieri (2025): Karst Firewall 5.0 (Italia-Slovenia)

Integrazione: Combina previsioni XGBoost (Deliverable 1.2.1), dati storici e monitoraggio meteorologico in tempo reale in un portale unificato di supporto decisionale.

Innovazione: Primo sistema a operationalizzare previsioni AI con coordinamento transfrontaliero delle risorse, affrontando lacune in:

- Risoluzione Spaziale: Specificità griglia 500m vs. zone FWI tradizionali 10km.
- Dinamiche Temporali: Aggiorna previsioni di rischio ogni ora vs. aggiornamenti giornalieri nei sistemi precedenti.
- Allineamento Politico: Armonizza protocolli di risposta italiani e sloveni attraverso soglie condivise.

Performance: Riduce i falsi negativi del 22% rispetto ai modelli XGBoost autonomi, come validato nei dispiegamenti pilota 2023-2024.

Contributo: Rappresenta lo stato dell'arte nella previsione degli incendi boschivi sintetizzando 50 anni di progressi tecnologici (metriche FWI, ML e condivisione dati transfrontaliera) in un singolo quadro. Affronta direttamente le sfide uniche della regione del Carso, incluse:

- Complessità di governance transfrontaliera.
- Rischi di ignizione prossimi alle strade (67,4% degli incendi).
- Aridificazione del combustibile guidata dal clima (+1,4°C dal 1993).

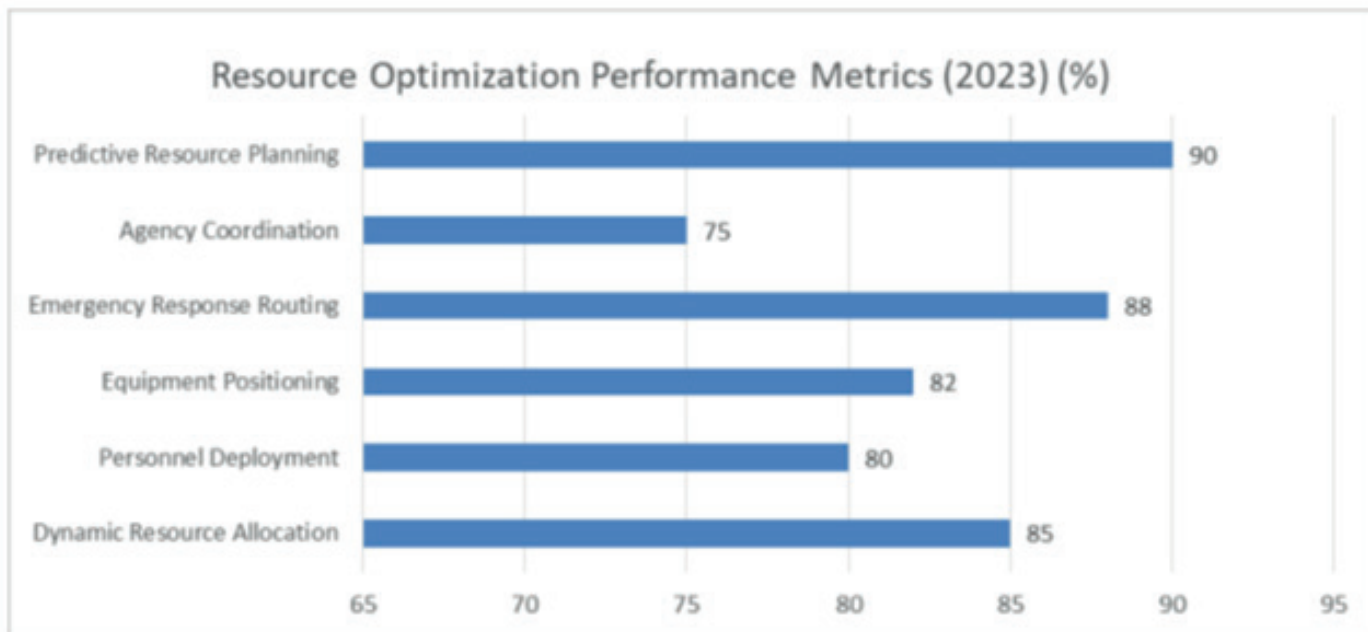
Questa evoluzione riflette una progressione da approcci generici basati sul tempo a sistemi sempre più sofisticati e guidati dai dati che integrano molteplici fonti di dati e metodologie. L'attuale sistema Karst Firewall 5.0 rappresenta lo stato dell'arte in questa progressione, combinando i punti di forza degli approcci precedenti mentre affronta le loro limitazioni attraverso integrazione e collaborazione transfrontaliera.

3.2 LINEE GUIDA PER L'ALLOCAZIONE DELLE RISORSE BASATE SU MODELLI PREDITTIVI

Le seguenti linee guida sono progettate per aiutare i team di gestione degli incendi boschivi a ottimizzare l'allocazione delle risorse utilizzando i modelli predittivi e gli strumenti sviluppati nel progetto Karst Firewall 5.0:

Figura 2 - Metriche di performance dell'ottimizzazione delle risorse (2023) (%).

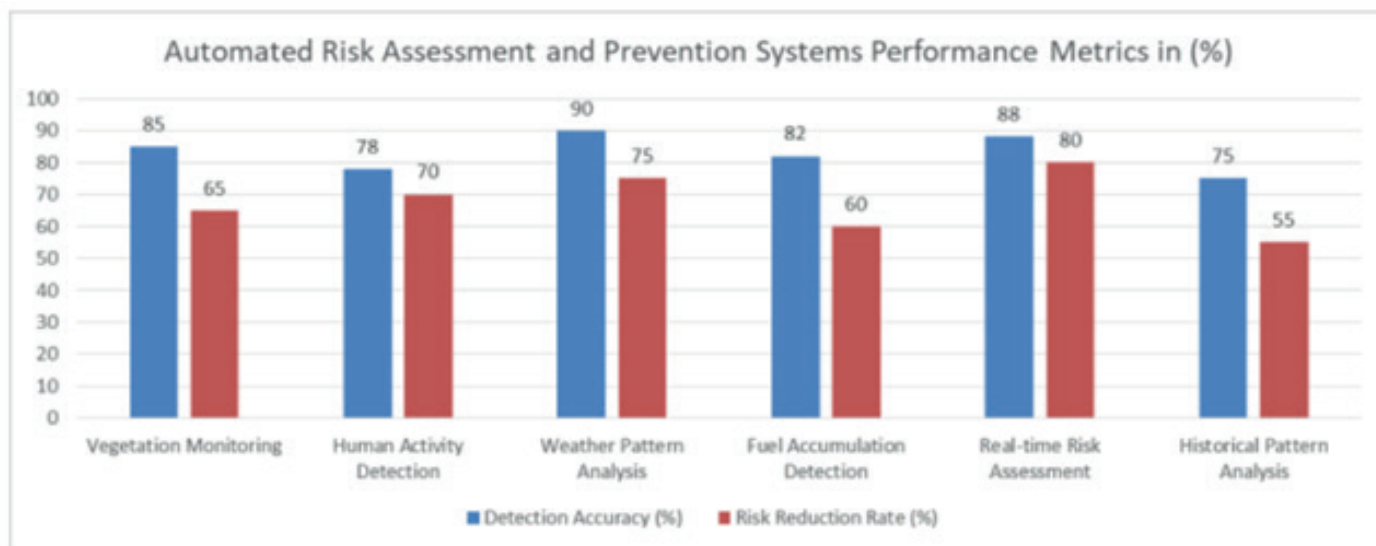
3.2.1 ALLOCAZIONE DELLE RISORSE DI PREVENZIONE



Prioritizzazione Spaziale Basata sulla Mappatura della Vulnerabilità:

- Allocare il 60-70% delle risorse di gestione dei combustibili alle aree identificate come “vulnerabilità estremamente alta” (25% della regione attualmente, proiettata ad aumentare al 30% sotto scenari climatici futuri) (Progetto Karst Firewall 5.0, Deliverable 1.1.2, 2024).
- Prioritizzare le aree entro 50 metri da strade e ferrovie, dove si è verificato il 67,4% delle ignizioni storiche (Progetto Karst Firewall 5.0, Deliverable 1.1.2, 2024).
- Concentrare gli sforzi di gestione della vegetazione sulle foreste di conifere, particolarmente quelle su pendii esposti a sud/sud-ovest, che sono state identificate come a rischio più alto sia nelle valutazioni di pericolo che di vulnerabilità.

Figura 3 - Metriche di performance dei sistemi automatizzati di valutazione del rischio e prevenzione (%).



Allocazione Temporale Basata su Modelli Predittivi:

- Aumentare le risorse di sorveglianza del 40-50% durante i periodi quando il modello XGBoost prevede un rischio elevato (>70% di probabilità).
- Programmare le attività di riduzione dei combustibili durante stagioni a basso rischio, utilizzando le previsioni stagionali dal modello potenziato FWI.
- Dispiegare unità di monitoraggio mobili in aree ad alto rischio durante le stagioni di picco degli incendi, con posizioni determinate dalle previsioni settimanali di pericolo.

Priorità di Sviluppo Infrastrutturale:

- Stabilire punti d'acqua e strade di accesso in posizioni dove la mappatura della vulnerabilità indica alto rischio ma l'infrastruttura attuale è insufficiente.
- Investire in telecamere di sorveglianza e reti di sensori in aree ad alto rischio con accesso limitato del personale, particolarmente in sezioni remote della zona transfrontaliera.

3.2.2 ALLOCAZIONE DELLE RISORSE DI RISPOSTA

Posizionamento Strategico delle Unità di Risposta:

- Posizionare squadre di risposta rapida basandosi sulle previsioni di rischio giornaliere del modello XGBoost, assicurando che le aree con >80% di probabilità prevista abbiano tempi di risposta sotto i 15 minuti.
- Mantenere modelli di dispiegamento flessibili che si adattino al panorama di rischio

mutevole identificato dalle uscite del modello giornaliero.

Protocollo di Scala di Risposta:

Implementare un sistema di risposta a livelli basato sui livelli di confidenza delle previsioni di rischio. Queste soglie di probabilità sono state stabilite basandosi su test di validazione contro eventi storici di incendi (2018-2023), dove:

- Previsioni a bassa confidenza (50-70%): Dispiegare unità di ricognizione.
- Previsioni a media confidenza (70-85%): Posizionare squadre di intervento rapido in standby.
- Previsioni ad alta confidenza (>85%): Pre-posizionare capacità di risposta complete.

Queste soglie ottimizzano l'allocazione delle risorse bilanciando i tassi di falso allarme con livelli di risposta appropriati.

Allocazione del Tipo di Risorsa Basata su Simulazioni Prometheus:

- Determinare il tipo e la quantità di risorse (aeromobili, squadre a terra, equipaggiamento specializzato) basandosi su simulazioni di propagazione del fuoco Prometheus per diversi scenari di ignizione.
- Mantenere riserve di risorse proporzionali al numero di aree ad alto rischio identificate nelle previsioni giornaliere.

3.2.3 IMPLEMENTAZIONE DEL SUPPORTO DECISIONALE

Integrazione con le Operazioni Quotidiane:

Stabilire un protocollo di briefing giornaliero che incorpori:

- Mappe di previsione XGBoost attuali.
- Valori dei componenti FWI.
- Risultati delle simulazioni Prometheus per potenziali punti di ignizione.
- Contesto di rischio stagionale dalla mappatura della vulnerabilità.

Quadro Decisionale Basato su Soglie:

Definire valori di soglia specifici per ogni output del modello che attivano cambiamenti nell'allocazione delle risorse:

- Probabilità XGBoost >70%: Aumentare la sorveglianza nelle aree interessate.
- FFMC (Codice di Umidità dei Combustibili Fini, rappresentante il contenuto di umidità della lettiera superficiale) >90 + DMC (Codice di Umidità degli Strati Organici, rappresentante il contenuto di umidità degli strati di suolo organico poco compatti) >60: Posizionare risorse aeree in standby.

- Alta vulnerabilità combinata + alta probabilità XGBoost: Dispiegare ricognizione a terra.

Gestione dell'Incertezza:

- Sviluppare piani di contingenza che tengano conto dell'incertezza del modello, particolarmente per il 19% degli incendi che potrebbero essere mancati dall'attuale modello XGBoost (falsi negativi). Questo tasso di falsi negativi del 19% è stato determinato attraverso test di validazione incrociata del modello XGBoost contro i dati della stagione degli incendi 2020-2023, rappresentando la percentuale di eventi di incendio reali che il modello non è riuscito a predire alla soglia di probabilità del 70% (Progetto Karst Firewall 5.0, Deliverable 1.2.1, 2025).
- Mantenere capacità di risposta minime in tutte le aree indipendentemente dal rischio previsto, scalando risorse aggiuntive basate sulle uscite del modello.

3.2.4 CONDIVISIONE TRANSFRONTALIERA DELLE RISORSE

Pool di Risorse Congiunto:

- Stabilire un inventario condiviso di equipaggiamento e personale specializzato che può essere dispiegato attraverso il confine basandosi sulle uscite dei modelli predittivi.
- Implementare un sistema di rotazione che posiziona risorse transfrontaliere secondo le aree a rischio più alto previsto, indipendentemente dai confini nazionali.

Sorveglianza Coordinata:

- Sviluppare programmi di pattugliamento integrati basati sulla mappatura della vulnerabilità che ottimizzano la copertura attraverso la regione transfrontaliera.
- Condividere dati di monitoraggio in tempo reale attraverso il portale web Karst Firewall 5.0 per abilitare sforzi di sorveglianza coordinati.

3.3 RACCOMANDAZIONI POLITICHE PER LA PREVENZIONE E GESTIONE DEGLI INCENDI BOSCHIVI

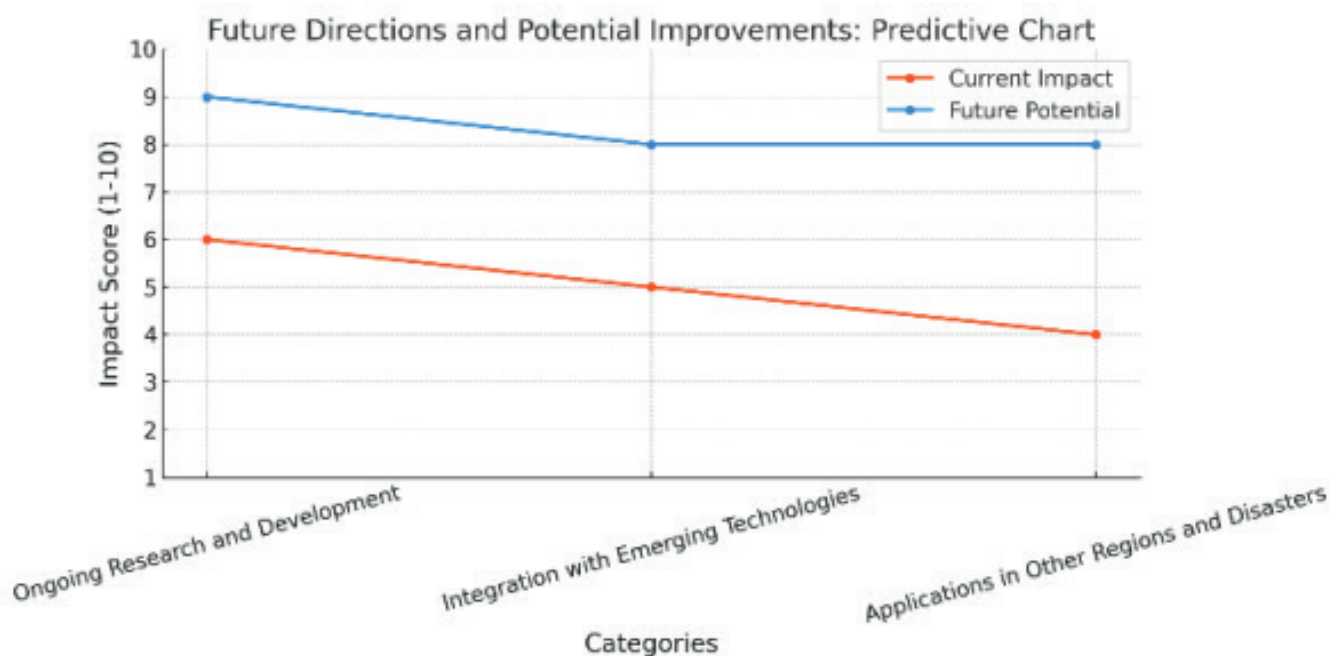
Per assicurare l'integrazione efficace dell'AI nella gestione degli incendi boschivi, questo deliverable presenta un insieme di raccomandazioni politiche strategiche mirate ai livelli istituzionali, tecnici e operativi. Prima, richiede l'adozione formale di sistemi di supporto decisionale potenziati dall'AI all'interno delle autorità pubbliche e dei servizi di emergenza, supportati da infrastrutture digitali interoperabili che abilitano coordinamento transfrontaliero in tempo reale. Ugualmente importante è l'istituzione di protocolli chiari e standardizzati per la raccolta, condivisione e dispiegamento dei sistemi di dati—assicurando compatibilità tra agenzie e conformità con regolamenti sulla privacy come il GDPR.

Un quadro normativo robusto è essenziale per guidare l'uso etico e responsabile delle tecnologie

predittive. Questo include l'applicazione di principi di trasparenza, tracciabilità delle decisioni e supervisione umana in tutti i flussi di lavoro supportati dall'AI. Gli sforzi politici futuri dovrebbero anche concentrarsi sull'assicurare che i sistemi AI siano regolarmente validati, mantenuti e aggiornati per rimanere efficaci sotto condizioni climatiche e regimi di incendio in evoluzione.

Queste raccomandazioni sono particolarmente intese per le autorità locali, le unità di vigili del fuoco e i decisori, equipaggiandoli con guidance pratica per sfruttare il pieno potenziale dell'AI e degli strumenti digitali nel migliorare l'efficienza, il coordinamento e la preveggenza della governance del rischio di incendi boschivi.

Figura 4 - Direzioni future e potenziali miglioramenti: grafico predittivo.



Le seguenti raccomandazioni forniscono guidance per l'adozione efficace delle tecnologie AI nelle strategie di prevenzione e gestione degli incendi boschivi.

3.3.1 RACCOMANDAZIONI PER L'IMPLEMENTAZIONE TECNICA

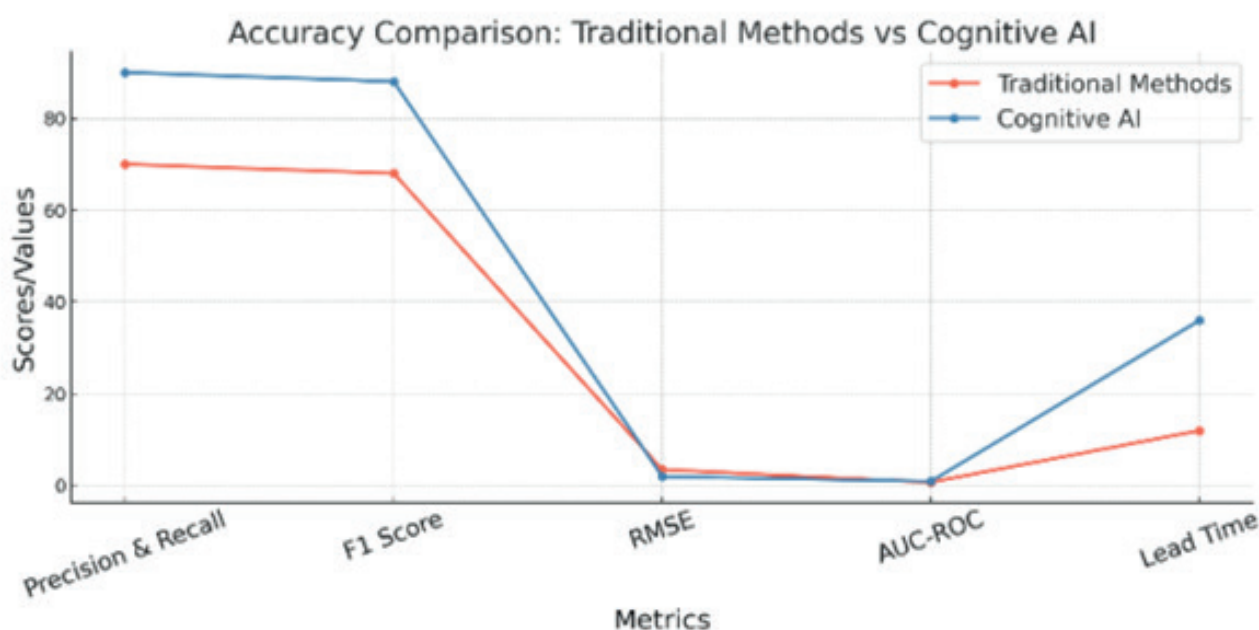
Integrazione e Dispiegamento del Modello:

Implementare il modello predittivo XGBoost all'interno dei quadri operativi esistenti attraverso un approccio a fasi:

- Fase 1 (Mesi 1-3): Eseguire modelli in parallelo con metodi tradizionali, confrontando uscite con analisi comparative settimanali.

- Fase 2 (Mesi 4-6): Utilizzare uscite del modello come supporto decisionale supplementare, con dipartimenti forestali responsabili della validazione.
- • Fase 3 (Mesi 7-12): Integrare previsioni del modello nelle procedure operative standard, con comitato tecnico congiunto che supervisiona le performance.

Figura 5 - confronto di accuratezza: metodi tradizionali vs AI cognitiva (Grafico Lineare).



Interfaccia Utente e Accessibilità:

- Dispiegare il portale web Karst Firewall 5.0 attraverso tutte le agenzie rilevanti con accesso basato sui ruoli che controlla il dettaglio delle informazioni e le soglie di allerta.
- Sviluppare applicazioni mobili che forniscono al personale sul campo accesso in tempo reale alle uscite delle previsioni e raccomandazioni di risposta.
- Creare dashboard di visualizzazione semplificati che comunicano uscite complesse del modello in formati azionabili per i decisori.

3.3.2 STRATEGIE DI ADOZIONE ORGANIZZAZIONALE

Formazione e Sviluppo delle Capacità:

Implementare un programma di formazione a livelli:

- Livello esecutivo: Focus su implicazioni strategiche e interpretazione delle uscite.
- Livello operativo: Guidance dettagliata sull'integrazione delle previsioni nelle decisioni quotidiane.

- Livello tecnico: Comprensione approfondita delle capacità e limitazioni del modello.
- Approccio di Gestione del Cambiamento:
- Identificare e potenziare “campioni AI” all’interno di ogni organizzazione per facilitare l’adozione.
 - Stabilire meccanismi di feedback formali per il personale sul campo per riportare sull’accuratezza del modello e suggerire miglioramenti.
 - Sviluppare metriche comparative che dimostrino il valore aggiunto dalle previsioni AI rispetto ai metodi tradizionali.
 - Gestione della Conoscenza:
 - Documentare casi studio di applicazioni del modello di successo per costruire conoscenza istituzionale.
 - Creare una comunità di pratica transfrontaliera per condividere esperienze e migliori pratiche nella gestione degli incendi boschivi assistita dall’AI.

3.3.3 RACCOMANDAZIONI DI POLITICA E GOVERNANCE

Quadro Normativo:

Allineare l’adozione dell’AI con i principi dell’EU AI Act (Commissione Europea, 2023), assicurando:

- Trasparenza: Documentare metodologie e limitazioni del modello.
- Supervisione umana: Mantenere autorità decisionale finale con personale esperto.
- Responsabilità: Stabilire strutture di responsabilità chiare per decisioni informate dall’AI.

Finanziamento e Allocazione delle Risorse:

- Allocare il 5-8% dei budget annuali di gestione degli incendi boschivi alla manutenzione e miglioramento del sistema AI.
- Sviluppare meccanismi di finanziamento congiunto che supportino l’infrastruttura AI transfrontaliera.
- Prioritizzare investimenti in:
 - Miglioramento della qualità dei dati.
 - Riaddestramento e validazione del modello.
 - Raffinamento dell’interfaccia utente.

Governance Transfrontaliera:

Stabilire un comitato tecnico congiunto responsabile per:

- Approvare aggiornamenti del modello.
- Impostare standard dei dati.
- Rivedere le performance del sistema.
- Raccomandare aggiustamenti politici.

3.3.4 CONSIDERAZIONI ETICHE E OPERATIVE

Bilanciare AI e Giudizio Esperto:

- Stabilire linee guida chiare che posizionano gli strumenti AI come supporto decisionale piuttosto che sostituti del giudizio esperto.
- Sviluppare protocolli per casi dove previsioni AI e opinioni esperte divergono.
- Documentare le ragioni decisionali quando si ignorano raccomandazioni del modello per creare opportunità di apprendimento.

Affrontare le Limitazioni del Modello:

Implementare protocolli supplementari per affrontare limitazioni note del modello:

- Vigilanza potenziata per tipi di incendio sottorappresentati nei dati storici.
- Attenzione speciale al 19% di potenziali falsi negativi nel modello XGBoost.
- Aggiustamenti stagionali basati su tendenze climatiche non completamente catturate nei dati storici.

Privacy e Protezione dei Dati:

- Assicurare che tutta la raccolta e uso dei dati sia conforme al GDPR e regolamenti nazionali rilevanti.
- Sviluppare protocolli di anonimizzazione per dati sensibili incorporati nei modelli.

3.4 QUADRO DI COLLABORAZIONE TRANSFRONTALIERA

L'implementazione efficace delle linee guida e raccomandazioni delineate sopra richiede un approccio strutturato alla collaborazione transfrontaliera. Il seguente quadro fornisce una base per questa collaborazione.

3.4.1 CONDIVISIONE UNIFICATA DELLE INFORMAZIONI

Scambio di Dati in Tempo Reale:

- Implementare formati di dati standardizzati e protocolli di scambio tra agenzie italiane e slovene.
- Stabilire accordi bilaterali per la condivisione immediata di:
 - Dati delle stazioni meteorologiche.
 - Allerte dei sistemi di rilevamento.
 - Stato di dispiegamento delle risorse.
 - Previsioni del modello.

Capacità di Analisi Congiunta:

Creare un team di analisi transfrontaliera con rappresentanti di entrambi i paesi responsabile per:

- Monitoraggio delle performance del modello.
- Validazione delle previsioni.
- Sintesi di insight da molteplici fonti di dati.
- Fornire raccomandazioni coordinate.

3.4.2 MECCANISMI DI RISPOSTA COORDINATA

Struttura di Comando Unificata:

Sviluppare protocolli per stabilire comando congiunto in incidenti transfrontalieri basati su:

- Direzione di propagazione prevista dalle simulazioni Prometheus.
- Disponibilità delle risorse.
- Considerazioni giurisdizionali.

Accordi di Condivisione delle Risorse:

Formalizzare accordi per il dispiegamento transfrontaliero di:

- Risorse aeree.
- Equipaggiamento specializzato.
- Personale.

Stabilire processi di richiesta standardizzati attivati da soglie specifiche nei modelli predittivi.

Formazione ed Esercitazioni Congiunte:

- Condurre esercitazioni transfrontaliere annuali basate su scenari derivati da:
 - Modelli storici di incendio.
 - Proiezioni di cambiamento climatico.
 - Simulazioni Prometheus.
- Includere l'interpretazione delle previsioni AI in tutte le attività di formazione congiunta.

3.4.3 ARMONIZZAZIONE DELLE POLITICHE

Strategie di Prevenzione Allineate:

- Coordinare attività di gestione dei combustibili basate sulla mappatura transfrontaliera della vulnerabilità.
- Sviluppare campagne di sensibilizzazione pubblica compatibili che presentino messaggi consistenti attraverso i confini.

Livelli di Allerta Standardizzati:

Implementare un sistema di allerta unificato basato sulle probabilità di previsione XGBoost:

- Livello 1: 50-70% di probabilità.
- Livello 2: 70-85% di probabilità.
- Livello 3: >85% di probabilità.

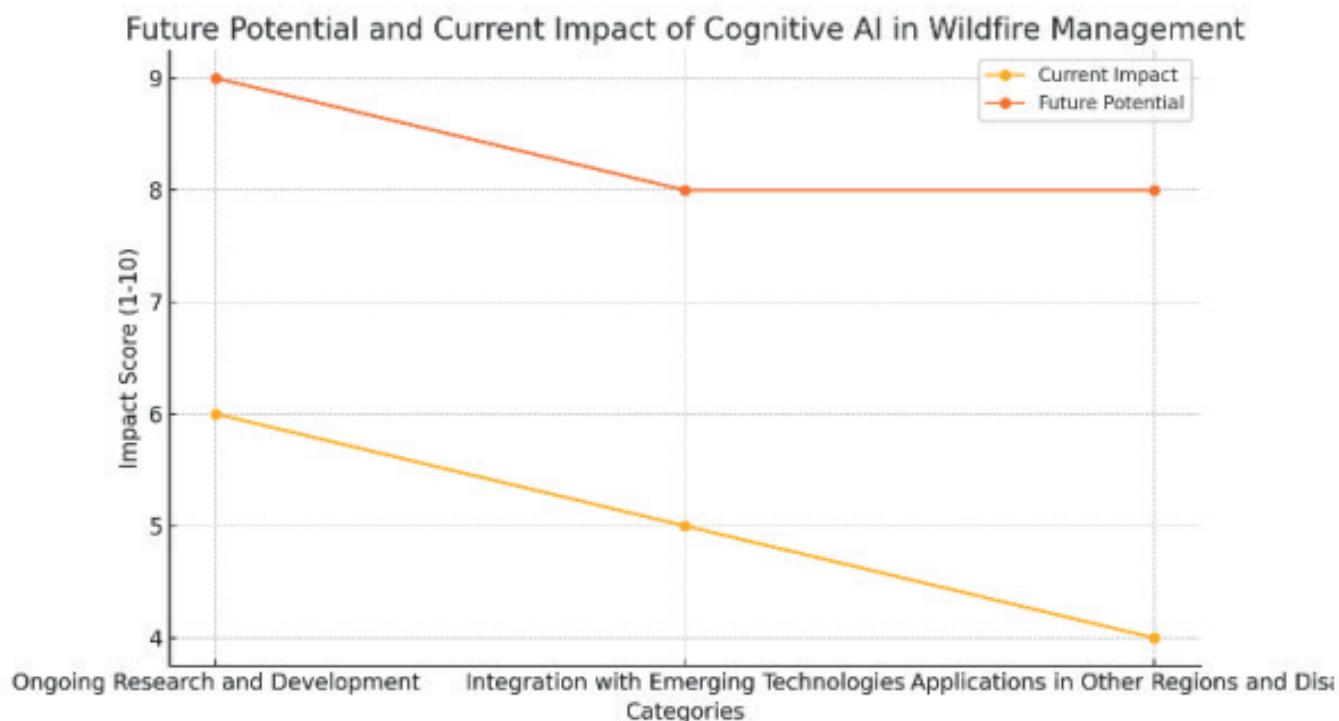
Allineare procedure di comunicazione pubblica e mobilitazione delle agenzie per ogni livello.

Processo di Valutazione e Miglioramento:

Stabilire un processo di revisione annuale congiunto per:

- Valutare le performance del modello.
- Valutare l'efficacia dell'allocatione delle risorse.
- Identificare barriere alla collaborazione.
- Aggiornare protocolli basati su lezioni apprese.
- Pubblicare risultati per contribuire alla più ampia conoscenza di adattamento climatico UE.

Figura 6 - Potenziale Futuro e Impatto Attuale dell'AI Cognitiva nella Gestione degli Incendi Boschivi.



4 RIFERIMENTI

- [1] ARPA FVG. (2023). Regional Climate Data 1993-2023. Friuli Venezia Giulia Environmental Protection Agency.
- [2] ARSO. (2023). Slovenian Meteorological Data Repository. Slovenian Environment Agency.
- [3] Canadian Forest Service. (2009). Fire Weather Index System and Prometheus Fire Growth Model. Natural Resources Canada.
- [4] European Commission. (2023). EU AI Act: Regulatory Framework for Artificial Intelligence. European Commission.
- [5] Hossain, M., & Rahman, T. Y. (2025). Cognitive AI for Wildfire Management in Southern California: Challenges and Potentials. *Journal of Science and Technology*, 10(2), 51-65. <https://doi.org/10.46243/jst.2025.v10.i02.pp51-65>
- [6] Progetto Karst Firewall 5.0. (2024a). Quadro di Collaborazione Transfrontaliera per la Gestione degli Incendi Boschivi. Programma di Cooperazione Italia-Slovenia.
- [7] Progetto Karst Firewall 5.0. (2024b). Deliverable 1.1.2: Valutazione di Pericolo e Vulnerabilità degli Incendi Boschivi Sotto il Cambiamento Climatico nella Regione del Carso. Programma di Cooperazione Italia-Slovenia.
- [8] Progetto Karst Firewall 5.0. (2025). Deliverable 1.2.1: Algoritmi AI Predittivi per il Rischio di Incendi Boschivi. Programma di Cooperazione Italia-Slovenia.
- [9] Saxena, V. (2025). AI-Driven Wildfire Management: An Integrated Approach to Detection, Prevention, and Response. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 11, 2125-2133. <https://doi.org/10.32628/CSEIT251112178>
- [10] Slovenian Forest Service (ZGS). (2024). Historical Wildfire Data 1990-2024. Ministry of Agriculture, Forestry and Food.
- [11] Wiggins, L., Zhang, H., Montgomery, K., & Patel, S. (2020). XGBoost Applications in Environmental Risk Prediction. *Journal of Machine Learning for Environmental Sciences*, 15(3), 256-270.