Interreg Italia-Slovenija
Karst Firewall 5.0

Cofinanziato dall'Unione europea
Sofinancira Evropska unija

VALUTAZIONE DEL PERICOLO E DELLA VULNERABILITÀ AGLI INCENDI BOSCHIVI SUL CARSO E L'IMPATTO DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO

KARST FIREWALL 5.0

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

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

Il progetto Karst Firewall 5.0 è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Projekt Karst Firewall 5.0 sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.
www.ita-slo.eu/karst-firewall-50

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-D112
Titolo del documento / Naslov dokumenta:	VALUTAZIONE DEL PERICOLO E DELLA VULNERABILITÀ AGLI INCENDI BOSCHIVI SUL CARSO E L'IMPATTO DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO
Work Package:	1
Attività / Aktivnost:	1.2
Partner responsabili (autori) / Odgovorni partnerji (avtorji):	IUAV Università di Venezia (Granceri Bradaschia, Massimiliano; Morassutti, Giacomo; Pintarič, Domen; Longato, Davide; Maragno, Denis; Musco, Francesco) ZRC-SAZU (Čonč, Špela; Breg Valjavec, Mateja; Ciglič, Rok)
Citazione / Citiranje:	Granceri Bradaschia M., Čonč Š., Morassutti G., Breg M., Longato D., Pintarič D., Ciglič R., Maragno D., Musco F., 2025, "VALUTAZIONE DEL PERICOLO E DELLA VULNERABILITÀ AGLI INCENDI BOSCHIVI SUL CARSO E L'IMPATTO DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO / OCENA NEVARNOSTI IN RANLJIVOSTI ZARADI POŽAROV V NARAVI OB PODNEBNIH SPREMEMBAH NA KRAŠKEM OBMOČJU", Karst Firewall 5.0 project, EU Interreg Italia Slovenia, 10.5281/zenodo.18220789
Luogo e data di pubblicazione / Kraj in datum objave:	Trieste, 10/10/2025

INDICE

1 INTRODUZIONE 4
1.1 Il Progetto Karst Firewall 5.0 4
2 L'AREA DI STUDIO 6
3 MATERIALI E METODI 8
3.1 Le variabili esplicative 8
3.2 Punti di innesco degli incendi boschivi storici 12
3.3 Modellazione MaxEnt per la valutazione del pericolo di incendi boschivi 13
3.4 Valutazione della vulnerabilità con approccio MCDA/AHP 15
4 RISULTATI E DISCUSSIONE 20
4.1 Analisi del pericolo di incendi boschivi 20
4.2 Valutazione della vulnerabilità agli incendi boschivi 29
4.3 Considerazioni sulla distribuzione spaziale dei punti di innesco degli incendi passati e sulla validazione delle carte di pericolo e di vulnerabilità 31
4.4 Punti salienti e approfondimenti sugli approcci adottati per l'analisi del pericolo e della vulnerabilità agli incendi boschivi 37
5 CONCLUSIONE 39
6 RIFERIMENTI 41

1 INTRODUZIONE

1.1 Il Progetto Karst Firewall 5.0

Il regime degli incendi boschivi nell'area del Kras/Carso è influenzato dal cambiamento climatico in corso. È probabile che gli incendi diventino più frequenti e intensi a causa di diversi trend, come l'aumento delle temperature, ondate di calore prolungate e siccità (Dupuy et al., 2020). Le strategie attuali di gestione degli incendi stanno diventando meno efficaci, rendendo necessario esplorare nuove modalità di adattamento. Il progetto Karst Firewall 5.0 affronta due sfide presenti nell'area del programma: gli incendi boschivi e la gestione della governance degli stessi. Per affrontarli intende sviluppare piani di azione innovativi per preservare lo stato di salute del territorio carsico e massimizzarne la resilienza, ponendo uno sguardo al futuro. Data le caratteristiche transfrontaliere dell'area di studio nel paesaggio carsico tra Italia e Slovenia, è fondamentale promuovere la cooperazione tra entrambi i paesi per affrontare l'urgente necessità di ridurre il rischio di incendi e sviluppare strategie di risposta tempestive, come dimostrato dall'importante incendio dell'estate 2022.

Il progetto intende aprire la strada non solo a un maggiore dialogo e a una maggiore cooperazione tra gli attori direttamente coinvolti nella gestione e nell'attuazione delle strategie di risposta agli incendi boschivi dai due lati del confine, ma anche tra gli attori di diversi settori, nonché la comunità in generale che sono in qualche modo coinvolti negli impatti che ne derivano. In questo modo, il progetto Karst Firewall potrebbe essere davvero determinante per lo sviluppo di un efficace meccanismo transfrontaliero di prevenzione e gestione degli incendi boschivi, grazie al fatto che tutti gli attori coinvolti, dai singoli cittadini e utenti del territorio ai decisori di alto livello, svolgono un ruolo molto importante e complementare a questo obiettivo.

Il Work Package 1 del progetto Karst Firewall 5.0 è intitolato "Come renderlo meno infiammabile: un quadro concettuale per la riduzione del rischio di incendi transfrontalieri nel Carso" e mira a sviluppare un quadro concettuale per promuovere la riduzione del

rischio di incendi boschivi attraverso la creazione di una collaborazione transfrontaliera per un'efficace gestione adattiva degli incendi boschivi nelle regioni carsiche. Ciò include l'elaborazione di specifiche analisi spaziali che analizzano il pericolo di incendi boschivi, attuale e nel futuro prossimo secondo i dati fornitici dalle proiezioni climatiche e la vulnerabilità del territorio nell'area di progetto, oggetto di questo deliverable. A tale scopo, sono stati selezionati e testati due approcci: l'analisi tramite **modellazione di Massima Entropia (MaxEnt)** per la valutazione del **pericolo di incendi boschivi** (di seguito definita come pericolo) e **l'Analisi Decisionale Multi-criteriale (MCDA)** per l'analisi della **vulnerabilità del territorio agli incendi** (di seguito vulnerabilità).

La modellazione con MaxEnt ha guadagnato una vasta popolarità grazie alla sua relativa semplicità ed è ampiamente utilizzata, soprattutto nei campi dell'ecologia e della biogeografia (Phillips et al., 2006). Tuttavia, questi metodi di modellazione ecologica, come MaxEnt, i modelli lineari generalizzati (GLM) o i modelli additivi generalizzati (GAM), si sono già dimostrati efficaci anche in altri campi per prevedere la distribuzione spaziale di determinati fenomeni e comprendere i i pattern spaziali dei processi naturali. Ad esempio, la modellazione con MaxEnt è stata utilizzata per prevedere la distribuzione spaziale di grotte che identificano le aree del più critiche per il flusso delle acque sotterranee nel sistema carsico (Blitch et al., 2023). Negli ultimi anni, MaxEnt è stato utilizzato con successo anche per valutare il rischio, la vulnerabilità e la probabilità di incendi boschivi in ambienti diversi, performando in alcuni studi comparativi meglio di algoritmi di Random forest e modelli GLM (Kim et al., 2019; Mishra et al., 2023; Paudel et al., 2024; Vilar et al., 2016; Yang et al., 2021).

L'analisi di vulnerabilità agli incendi boschivi richiede la valutazione di fattori diversi che possono concorrere a determinarlo. Poiché questi fattori sono eterogenei, caratterizzati da un certo grado di importanza relativa e misurati con unità di misura diverse, per identificare le aree di maggiore o minore vulnerabilità agli incendi è stato scelto l'approccio dell'analisi decisionale multi-criteriale (MCDA) applicato a valutazioni spazialmente esplicite con sistemi informativi geografici (GIS) (Malczewski, 2006). Nell'ambito dell'MCDA, il metodo Analytic Hierarchy Process (AHP), uno dei metodi più diffusi per valutare l'importanza relativa di tutti i fattori analizzati (Gigović & Jakovljević, 2018; Goleiji et al., 2017; Maniatis et al., 2022; Sivrikaya & Küçük, 2022) è stato utilizzato per assegnare i pesi rappresentanti l'importanza

relativa di tutti i fattori selezionati. L'AHP è stato teorizzato per la prima volta da Saaty (2002) per confrontare i diversi criteri in un MCDA e fornire un metodo matematico per quantificare le valutazioni soggettive della loro relativa importanza.

2 L'AREA DI STUDIO

L'area di studio comprende la regione storico-geografica dell'altopiano carsico (denominato Carso in Italia e Kras in Slovenia) e le sue aree limitrofe, abbracciando il nord del Mare Adriatico. L'area di studio si estende per circa 1000 km^2, ricadendo approssimativamente per il 30% in Italia e per il 70% in Slovenia. L'area è compresa tra le coordinate geografiche 13,47 long., 45,55 lat. e 14,05 long., 45,96 lat. (EPSG:4326-WGS84). L'area è caratterizzata sia da climi mediterranei superiori, sulla costa, sia da zone fitoclimatiche più continentali sul versante interno. Il Carso è un classico esempio di altopiano a substrato calcareo, che si innalza rapidamente dalla costa fino a 350 m s.l.m., con creste collinari che raggiungono i 400-700 m s.l.m.. La vegetazione varia dalle macchie costiere di leccio mediterraneo (Quercus ilex) alle associazioni di carpino nero (Ostrya carpinifolia) e frassino (Fraxinus ornus), dominate dalla roverella (Quercus pubescens) che ricopre sempre la landa carsica sull'altopiano, sempre di più in stato di abbandono (Oriolo et al., 2021). Sono comuni macchie di foreste di pino nero (Pinus nigra), specie non autoctona importata con gli sforzi di rimboschimento della landa carsica risalenti al XIX secolo.

Figura 1 L'area di studio. A sinistra la parte ricadente in Italia, a destra in Slovenia.

3 MATERIALI E METODI

Questo lavoro ha eseguito due analisi: **Il pericolo di incendi boschivi** basata sulla modellazione di Massima Entropia (MaxEnt) e la **vulnerabilità agli incendi boschivi** basata sull'Analisi Decisionale Multicriteriale (MCDA) utilizzando l'Analytic Hierarchy Process (AHP). Prima di eseguire le analisi sono state selezionate, sulla base dei dati transfrontalieri disponibili (e comparabili), le variabili esplicative che concorrono all'innesco e alla diffusione degli incendi.

3.1 Le variabili esplicative

Sulla base di una revisione della letteratura (Gigović & Sekulović, 2018; Maniatis et al., 2022; Mishra et al., 2023; Nuthammachot & Stratoulias, 2021; Sivrikaya & Küçük, 2022; Trucchia et al., 2022, 2023; Yang et al., 2021), sono state selezionate **11 variabili esplicative** che sono state utilizzate per la modellazione e le analisi in quanto potenziali fattori che influenzano il pericolo e la vulnerabilità agli incendi boschivi. Tra queste vi sono delle variabili che riflettono le caratteristiche **antropiche** (la distanza da ferrovie, strade (strade principali, strade forestali e sentieri escursionistici) e insediamenti), **ambientali** (copertura del suolo), **climatiche** (precipitazioni e temperatura) e **topografiche** (aspetto, elevazione, pendenza, Indice di Posizionamento Topografico (TPI, *Topographic Position Index*), Indice Topografico di Saturazione (TWI, *Topographic Wetness Index*), un indice della saturazione del versante). L'elenco delle variabili, con la fonte dei dati, è riportato nella Tabella 1. Tutte le variabili sono state elaborate con i software ESRI ArcGIS Pro 3.4.0 (ESRI, Redlands, CA, USA) e QGIS 3.40.4 (QGIS Development Team, 2025).

A causa della natura transfrontaliera dell'area di studio, sono state incontrate alcune sfide nella raccolta e nella standardizzazione dei dati di input. Al fine di ottenere la massima risoluzione possibile, abbiamo cercato di ottenere il maggior numero possibile di dati da banche dati locali, nazionali o regionali (Tabella 1). I dati che riflettono le caratteristiche antropiche sono stati forniti dall'Autorità di rilevamento e cartografia della Repubblica di Slovenia (GURS) e dall'Infrastruttura per i dati ambientali e territoriali (IRDAT) della Regione

autonoma Friuli-Venezia Giulia (RAFVG). Tuttavia, poiché Openstreetmap (OSM) contiene una rappresentazione più completa dei sentieri escursionistici, sia in Italia che in Slovenia, i layer delle strade è stato integrato con elementi scaricati dal database OSM.

I layer delle variabili antropiche, disponibili in formato vettoriale sia per la parte italiana che per quella slovena, sono stati prima uniti in un unico layer contenente tutta l'area di studio successivamente rasterizzati. Per ottenere le variabili della distanza dalle strade e dalle ferrovie è stato utilizzato l'algoritmo di distanza euclidea. Per elaborare invece il layer di copertura del suolo, si è scelto di ricorrere ai dati di copertura del suolo nazionali e regionali, che hanno una risoluzione significativamente più alta rispetto alla carta europea Corine Land Cover (CLC). Quest'ultima è stata comunque sfruttata per la sua definizione unitaria di ciascuna categoria di copertura del suolo applicata poi al layer italiano e sloveno. Così è stato possibile dopo la fusione dei due layer assegnare dalla classificazione CLC la corretta definizione corrispondente di copertura del suolo. Inoltre, le aree che rientravano nella categoria di copertura forestale sono state rimosse dal layer unificato e sostituite con gli elementi della carta di tipo forestale ad alta risoluzione Copernicus Forest Type, che identifica più accuratamente, grazie ad immagini satellitari, fino a piccole macchie di foresta distinguendone il tipo prevalente, latifoglie o conifere.

A causa delle diverse caratteristiche spazio-temporali dei dati climatici nazionali e regionali per l'Italia e la Slovenia, si è deciso di utilizzare i dati forniti dal progetto CHELSA Climate sia per le serie storiche climatiche più recenti (1981-2010) che per le proiezioni climatiche del prossimo futuro (2011-2040) (Brun et al., 2022; Karger et al., 2017). Poiché i dati climatici erano disponibili ad una risoluzione di 1 km × 1 km, sono stati successivamente ricampionati ad una risoluzione di 3 m × 3 m. Il modello digitale del terreno (DTM) con una risoluzione di cella di 1 m × 1 m, fornito dall'Agenzia slovena per l'ambiente (ARSO) e dall'IRDAT FVG, è stato utilizzato per calcolare le caratteristiche topografiche (Tabella 1). Tutte le variabili sono state poi estratte alla stessa estensione dell'area di studio e ricampionate alla stessa risoluzione (cioè 3 m × 3 m). Lo strumento Raster to ASCII è stato utilizzato per esportare gli strati raster in formato leggibile da MaxEnt (cioè .ascii).

Utilizzando due diversi test in ArcGIS Pro, è stata verificata anche la collinearità tra le variabili, allo scopo di identificare le variabili potenzialmente molto correlate che avrebbero causato una doppia valutazione degli stessi fattori. È stato utilizzato lo strumento "Band collection statistics" per produrre la matrice di correlazione e lo strumento "Ordinary Least Squares (OLS)" per ottenere informazioni sul fattore di inflazione della varianza (VIF). Poiché entrambi i test di collinearità hanno mostrato che due variabili sono correlate (cioè l'altitudine e la temperatura, Tabella 4 e 5), è stato deciso di eliminare dalle analisi la variabile altitudine e di mantenere la temperatura.

Tabella 1: Elenco delle variabili con la fonte dei dati

	Variabile	Fonte del dato SLO	Fonte del dato ITA
Antropiche	Distanza da strade, strade boschive e sentieri	Dati forniti dall'Autorità di Geografia della Repubblica Slovenia (GURS), Openstreetmap	RAFVG, ISPRA e Insiel S.p.a., Openstreetmap
	Distanza da ferrovie		
	Distanza da insediamenti		
Ambientali	Copertura del suolo	Dati forniti dal Ministero dell'Agricoltura, delle Foreste e dell'Almentazione (MKGP), Corine Land Cover (CLC)	RAFVG, Corine Land Cover (CLC)
Climatiche	Precipitazione media annua (1981–2010)	CHELSA Climate (Brun et al., 2022; Karger et al., 2017)	
	Temperatura media annua (1981–2010)		
	Precipitazione media annua (2011–2040)		
	Temperatura media annua (2011–2040)		

	Variabile	Fonte del dato SLO	Fonte del dato ITA
Topografiche	Orientamento del terreno	Dati Lidar (risoluzione 1 × 1 m) forniti dall'Agenzia della Repubblica Slovenia per l'Ambiente (ARSO)	Dati Lidar (risoluzione 1 x 1 m cell) forniti dalla RAFVG
	Altitudine		
	Pendenza		
	Indice di Posizonamento Topografico (TPI)		
	Indice Topografico di Saturazione (TWI)		

Tabella 2: Matrice di correlazione delle variabili predittive: 1 – Orientamento del terreno, 2 – Altitudine, 3 – Copertura del suolo, 4 – Precipitazioni, 5 – Distanza da ferrovie, 6 – Distanza da strade, 7 – Pendenza, 8 – Distanza da insediamenti, 9 – Temperatura, 10 – TPI, 11 – TWI

Variabile	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	-0,02	-0,05	-0,06	-0,01	-0,02	-0,01	-0,05	0,03	0,01	-0,00
2	-0,02	1	0,31	0,25	0,32	0,09	0,11	0,44	**-0,94**	0,10	-0,03
3	-0,05	0,31	1	0,19	0,17	0,09	0,25	0,39	-0,29	0,02	-0,08
4	-0,06	0,25	0,19	1	0,07	0,15	0,06	0,16	-0,41	0,01	-0,05
5	-0,01	0,32	0,17	0,07	1	0,12	0,10	0,22	-0,40	0,02	-0,01
6	-0,02	0,09	0,09	0,15	0,12	1	-0,02	0,18	-0,15	0,02	0,01
7	-0,01	0,11	0,25	0,06	0,10	-0,02	1	0,06	-0,14	-0,12	-0,37
8	-0,05	0,44	0,39	0,16	0,21	0,18	0,06	1	-0,41	0,04	-0,00
9	0,03	**-0,94**	-0,29	-0,41	-0,40	-0,15	-0,14	-0,41	1	-0,04	0,02
10	0,01	0,10	0,02	0,01	0,02	0,02	-0,12	0,04	-0,04	1	-0,27
11	-0,00	-0,03	-0,08	-0,05	-0,01	0,01	-0,37	-0,00	0,02	-0,27	1

Tabella 3: Valori VIF (fattore di inflazione della varianza) delle variabili predittive.

Variabile	VIF
Orientamento del terreno	1,02
Altitudine	**18,43**
Copertura del suolo	1,07
Precipitazioni	2,36
Distanza da ferrovie	1,15
Distanza da strade	1,10
Pendenza	1,22
Distanza da centri abitati	1,24
Temperatura	**22,87**
TPI	1,25
TWI	1,26

3.2 Punti di innesco degli incendi boschivi storici

Per la modellazione MaxEnt e la validazione della valutazione della vulnerabilità sono stati utilizzati i punti di innesco degli incendi boschivi raccolti dal Servizio Forestale della Slovenia e dall'IRDAT. Il set di dati conteneva i punti di innesco di 2367 incendi, di cui 724 raccolti nel periodo 1994-2024 per la parte slovena e 1643 punti nel periodo 1990-2024 per la parte italiana.

Siccome i punti di innesco degli incendi si verificano con densità più elevate in determinate aree, il set di dati è stato filtrato spazialmente al fine di evitare di influenzare eccessivamente il modello verso determinate località a causa dell'autocorrelazione spaziale. Il set di dati è stato filtrato in base allo strumento “Spatially rarefy occurrence data tool” del SDM toolbox per ArcGIS Pro (Brown, 2014), che consente di ridurre i punti di accensione a un singolo punto entro la distanza euclidea specificata (Brown, 2014). Sono state applicate inizialmente tre diverse soglie di distanza (100, 250 e 500 m) trovando più adeguata la soglia di 250 m. A una distanza di 100 m, i cluster erano infatti ancora visibili, mentre a 500 m i dati erano troppo rarefatti (Tabella 6). I punti di innesco così filtrati (soglia di 250 m) sono stati esportati in un file .csv con tre colonne: specie (nel nostro caso riferentesi all’ “incendio”), longitudine e latitudine.

Tabella 4: Numero di duplicati rimossi, punti spazialmente autocorrelati rimossi e punti nel dataset finale per tre diverse soglie di distanza (100, 250 e 500 m) mediante lo strumento di dati di occorrenza di rarefazione spaziale.

	Numero di duplicati rimossi	Numero di punti spazialmente autocorrelati rimossi	Numero di punti nel dataset finale
soglia di 100 m	9	583	1775
soglia di 250 m	9	1152	1206
soglia di 500 m	9	1614	744

3.3 Modellazione MaxEnt per la valutazione del pericolo di incendi boschivi

MaxEnt è uno strumento software di machine learning di uso generico, sviluppato principalmente per la modellazione della distribuzione di specie. In sostanza, MaxEnt stima la probabilità della presenza di un determinato fenomeno (come ad esempio una specie target) sulla base di luoghi noti in cui esso si manifesta e di un set di variabili esplicative, utilizzando un approccio di massima entropia (Phillips, 2017; Phillips et al., 2006; Phillips & Dudík, 2008). La modellazione MaxEnt presenta molti vantaggi: il software è facile da usare, consente di utilizzare dati di presenza di un fenomeno (ma non di assenza) e di lavorare con piccoli campioni di dati. Supporta l'uso di variabili sia continue che categoriche, produce direttamente una mappa di idoneità spazialmente esplicita e l'importanza relativa delle singole variabili può essere facilmente valutata utilizzando il "Jackknife test" integrato (Phillips, 2017; Phillips et al., 2006; Phillips & Dudík, 2008). Oltre ai numerosi vantaggi, sono stati identificati alcuni punti deboli della modellazione MaxEnt, tra cui l'overfitting, la distorsione dei dati di presenza e i metodi di valutazione delle prestazioni del modello sono oggetto di discussione (Phillips et al., 2009; Phillips & Dudík, 2008).

Per modellare una previsione con MaxEnt, sono necessari due tipi di dati. Il primo è la presenza/distribuzione nota del fenomeno che si vuole prevedere (nel nostro caso, i punti campione dei luoghi di innesco degli incendi all'interno dell'area di studio, ciascuno definito da latitudine e longitudine), e il secondo le variabili che descrivono le caratteristiche dell'area

di studio già menzionate all'interno dell'estensione di distribuzione del fenomeno studiato (Merow et al., 2013; Phillips et al., 2006). Nella modellazione, l'estensione delle celle raster definisce l'area per la quale MaxEnt definirà la distribuzione di probabilità. I punti di presenza sono assegnati alle celle raster e questo rappresenta i punti campione per il modello. Lo strumento genera quindi nell'estensione dell'area di studio una serie di punti di sfondo che rappresentano i luoghi in cui la presenza del fenomeno è possibile ma sconosciuta. I punti di sfondo sono utilizzati per modellare le caratteristiche del territorio nelle località di presenza ignota e confrontarle con quelle del territorio nelle località di presenza note (Merow et al., 2013; Phillips et al., 2006). Il modello richiede che i dati delle variabili utilizzino la stessa estensione e risoluzione per ogni cella (Phillips, 2017).

Per la modellazione MaxEnt è stato utilizzato lo strumento Java open-source MaxEnt (ver. 3.4.4) (Phillips et al., 2017). Nello strumento abbiamo selezionato la generazione di curve di risposta, del test Jackknife e le immagini delle previsioni. Come formato dei dati di output abbiamo selezionato il cloglog predefinito, che fornisce una stima tra 0 e 1 della probabilità di presenza ed è il più facile da interpretare (Phillips, 2017). Nelle impostazioni di base è stato impostato il moltiplicatore di regolarizzazione a 1,5 per evitare l'overfitting e ottenere una previsione più diffusa e meno localizzata. Al fine di valutare l'idoneità del modello, è stato utilizzato un metodo di convalida incrociata k-fold, in cui i dati di presenza vengono suddivisi in modo casuale in un certo numero di gruppi di dimensioni uguali per l'addestramento e per il test, e i modelli vengono creati tralasciando a turno ogni gruppo. Questo metodo di validazione utilizza poi i gruppi che sono stati esclusi per la valutazione del modello (Phillips, 2017) scegliendo cinque repliche (k = 5) di convalida incrociata. Le altre impostazioni erano predefinite.

Per valutare il rischio di incendi nelle condizioni climatiche future, è stata scelta l'impostazione "Projection" per una previsione semplicistica del cambiamento climatico. Abbiamo impostato la "directory Projection layers" sulla cartella contenente gli stessi dati ambientali della directory "Layers", dove le variabili di precipitazione e temperatura contenevano i valori climatici futuri (2011-2040).

3.4 Valutazione della vulnerabilità con approccio MCDA/AHP

Per valutare la vulnerabilità basata sul metodo MCDA, è stato innanzitutto necessario uniformare le variabili predittive per poterle comparare. A questo scopo, ognuna è stata suddivisa in 5 classi (in base agli intervalli di valori continui o alle categorie se variabili discrete) alle quali sono stati assegnati dei valori di vulnerabilità, dall'1 (vulnerabilità bassa) al 5 (vulnerabilità estremamente elevata) (Tabella 5). Per questa procedura ci si è basati sulla letteratura esistente, considerando le modalità con cui studi simili hanno classificato le diverse variabili in classi di vulnerabilità/rischio di incendi boschivi (ad esempio, Djabri et al., 2024; Gigović et al., 2018; Maniatis et al., 2022; Sivrikaya & Küçük, 2022), adattandole eventualmente alla distribuzione dei dati e alle specificità dell'area di studio (Tabella 6).

Tabella 5: Classi di vulnerabilità.

1	Vulnerabilità bassa
2	Vulnerabilità moderata
3	Vulnerabilità elevata
4	Vulnerabilità significativamente elevata
5	Vulnerabilità estremamente elevata

In secondo luogo, per ogni variabile è stato prodotto un raster georiferito con una risoluzione di 3 m × 3 m ottenendo così una griglia dove a ogni pixel corrispondesse il rispettivo valore di vulnerabilità. Per ottenere la carta di vulnerabilità finale, i 10 raster delle singole variabili, classificati con i rispettivi punteggi di vulnerabilità, sono stati sovrapposti utilizzando il metodo della somma ponderata, secondo la seguente formula, dove m, n, p e q rappresentano i coefficienti di ponderazione assegnati metodo AHP:

Vulnerabilità agli incendi = m × fattori antropici + n × fattori climatici + p × fattori topografici + q × fattori ambientali

Tabella 6 Elenco delle variabili raggruppate per categoria, con range di dati e classi di vulnerabilità

	Variabile	Range (min–max)	Classi	Vulnerabilità (1, bassa - 5, elevata)
Antropiche	Distanza da strade, strade forestali e sentieri	0–1266,43 m	0–200 m	5
			400–600 m	4
			600–800 m	3
			800–1000 m	2
			> 1000 m	1
	Distanza da ferrovie	0–11.389,14 m	0–100 m	5
			100–200 m	4
			200–500 m	3
			500–1000 m	2
			> 1000 m	1
	Distanza da insediamenti	0–2509,65 m	0–500 m	5
			500–1000 m	4
			1000–1500 m	3
			1500–2000 m	2
			> 2000 m	1
Ambientali	Copertura del suolo	/	1: artificial surface	1
			2: agriculture	2
			3: seminatural area, overgrown agricultural land, transitional shrubland	3
			4: deciduous forest	4
			5: coniferous forest	5
			6: other natural areas (bare rock, marsh, ...)	2
			7: water	0/N/A
Climatiche	Precipitazioni medie annue (1981–2010)	1344,8 - 2365,83 mm	0–1500 mm	5
			1500–1700 mm	4
			1700–1900 mm	3
			1900–2100 mm	2
			> 2100 mm	1
	Temperatura media annua (1981–2010)	9.5–14,6 °C	9.5–10.5 °C	1
			10.5–11.5 °C	2
			11.5–12.5 °C	3
			12.5–13.5 °C	4

	Variabile	Range (min–max)	Classi	Vulnerabilità (1, bassa - 5, elevata)
			> 13.5 °C	5
	Precipitazioni medie annue (2011–2040)	1423,8–2520,3 mm	0–1500 mm	5
			1500–1700 mm	4
			1700–1900 mm	3
			1900–2100 mm	2
			> 2100 mm	1
	Temperatura media annua (2011–2040)	11,1–16,2°C	9.5–10.5 °C	1
			10.5–11.5 °C	2
			11.5–12.5 °C	3
			12.5–13.5 °C	4
			> 13.5 °C	5
Topografiche	Orientamento del terreno	0–360°	337.5 – 67.5°	1
			67.5 – 112.5°, 292.5 – 337.5°	2
			112.5 – 157.5°	3
			247.5 – 292.5°	4
			157.5 – 247.5°	5
	Pendenza	0–83,17°	<5%	1
			5 - 15%	2
			15 - 25%	3
			25 – 35%	4
			>35%	5
	Indice di Posizionamento Topografico (TPI)	-339,54–48,54	1: < -1 = valle/depressione	1
			2: -1– -0.5 = terreno piano o quasi	2
			3: -0.5–0.5 = pendio moderato	3
			4: 0.5–1 = pendio scosceso	4
			5: > 1 = cresta	5
	Indice Topografico di Saturazione (TWI)	-2,39–25,48	< 5	5
			5–6.5	4
			6.5–8.5	3
			8.5–12	2
			> 12	1

Nell'AHP, il peso per ricavare l'importanza relativa di ogni variabile è calcolato sulla base di una matrice di confronto a coppie, in cui ogni criterio (cioè, variabile) viene confrontato con gli altri assegnandogli un valore di importanza relativa. Questi valori vanno da 1 (uguale importanza) a 9 (importanza assoluta), come mostrato nella Tabella 7, e descrivono il giudizio di importanza relativa. I valori intermedi 2, 4, 6 e 8 si riferiscono a situazioni intermedie. Al contrario, la stessa scala con I valori reciproci (da 1 a 1/9) viene utilizzata per descrivere il giudizio di importanza se il criterio di riferimento è meno importante di quello con il quale lo si confronta.

Tabella 7: Valori di importanza relativa per il confronto a coppie dell'AHP.

Valore di importanza	**Definizione**
1	*Uguale importanza*
3	*Importanza moderata*
5	*Importanza forte*
7	*Importanza molto forte*
9	*Importanza assoluta*

Il confronto a coppie è stato eseguito in due fasi: nella prima sono state confrontate le variabili all'interno di ciascuna categoria, e nella seconda è stato eseguito il confronto a coppie complessivo tra le quattro categorie (Figura 2).

Figura 2 Struttura dell'AHP, in verde le categorie che comprendono le variabili sottostanti.

Sono state costituite di conseguenza, quattro matrici di confronto a coppie:

- Matrice di confronto a coppie delle categorie;
- Matrice di confronto a coppie delle variabili antropiche;
- Matrice di confronto a coppie delle variabili topografiche;
- Matrice di confronto a coppie delle variabili climatiche.

Il peso di ogni singola variabile nell'equazione finale è quindi il prodotto del peso ottenuto dalla variabile nella matrice di confronto all'interno della propria categoria e di quello ottenuto dalla categoria nella matrice di confronto con tutte le altre categorie. L'unica eccezione è la variabile relativa alla copertura del suolo, che essendo unica nella propria categoria di variabili ambientali non è stata sottoposta alla prima fase di confronto. L'assegnazione dei giudizi di importanza relativa nelle matrici di confronto a coppie si è basata sulla revisione della letteratura e concordata tra i ricercatori che hanno partecipato a questa attività. La coerenza tra tutti i giudizi è stata misurata anche con l'indice di coerenza, considerato accettabile se inferiore a 0,01 (Saaty, 2002).

Una volta ottenuti tutti i pesi e verificata la coerenza, tutte le variabili sono state sommate spazialmente secondo la formula sopra menzionata, generando una carta di vulnerabilità in formato raster con valori continui adimensionali compresi tra 0 e 5. Questo raster è stato infine categorizzato nelle 5 classi di vulnerabilità complessive:

- 0-1 = Bassa vulnerabilità
- 1-2 = Vulnerabilità moderata
- 2-3 = Alta vulnerabilità
- 3-4 = Vulnerabilità significativamente elevata
- 4-5 = Vulnerabilità estremamente elevata

RISULTATI E DISCUSSIONE

3.5 Analisi del pericolo di incendi boschivi

Le prestazioni del modello complessivo sono state valutate sulla base dell'AUC (area sotto la curva *Receiver Operating Characteristic* (ROC)). Il valore medio dell'AUC per le cinque iterazioni del modello è di 0,754 con una deviazione standard di 0.014. Dato che questo valore supera la soglia di 0,75, i risultati della modellazione del pericolo di incendi boschivo possono considerarsi statisticamente validi. I valori AUC delle 5 iterazioni del modello sono presentati nella tabella 8.

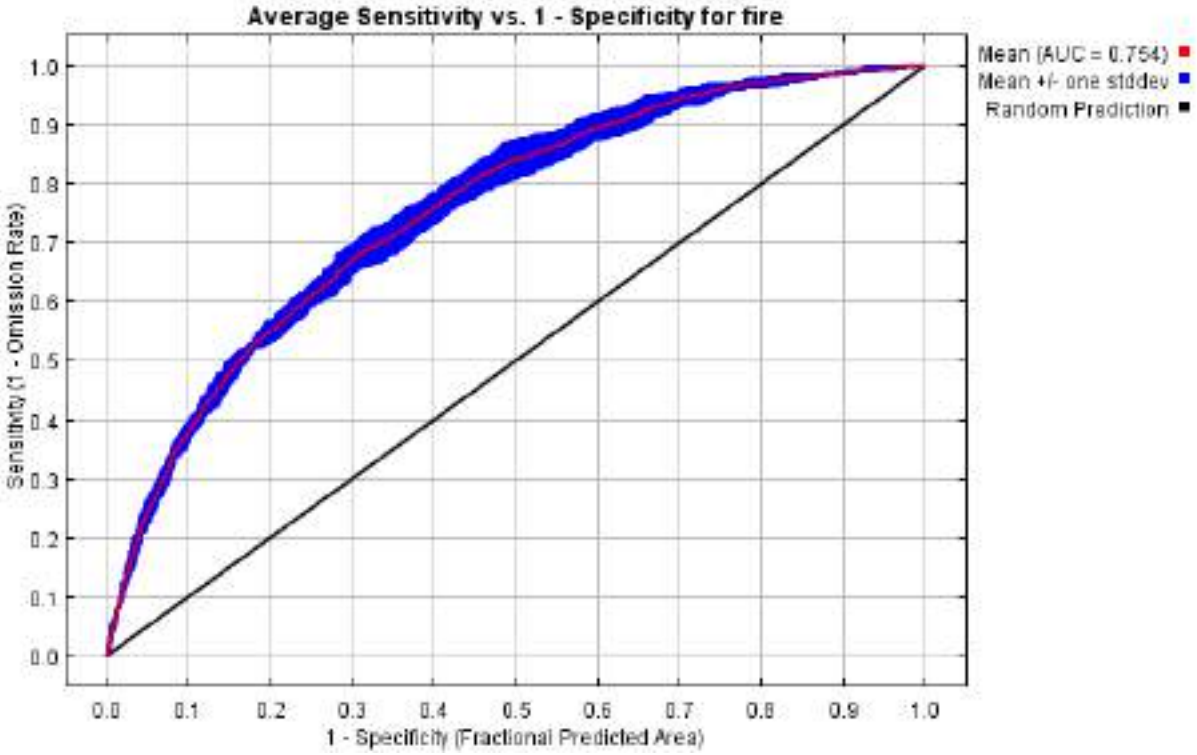


Figura 3 Curva ROC (Receiver Operating Characteristic) con il valore medio di AUC (Area sotto la curva) dei cinque modelli. La linea rossa mostra il valore AUC medio delle cinque iterazioni del modello per i dati di addestramento, mentre la linea blu mostra i valori medi ± la deviazione standard dei dati di test. La linea nera rappresenta la previsione casuale

Tabella 8: I valori AUC per I dataset di apprendimento e di test per tutti e 5 i modelli.

Modello	1	2	3	4	5
Dataset di apprendimento	0.762	0.768	0.764	0.761	0.766
Dataset di test	0.766	0.735	0.760	0.768	0.740

Per valutare l'impatto di ciascuna variabile sul modello, sono stati analizzati i seguenti parametri: il contributo di ciascuna variabile (%) alla previsione finale, la significatività delle variabili secondo il test Jackknife e le rispettive curve di risposta. Il contributo più elevato è riconducibile alle variabili antropiche e ambientali, ovvero alla distanza dalle strade (50,6%), alla copertura del suolo (16,3%) e alla distanza dalle ferrovie (16,1%) (Tabella 9). Le caratteristiche topografiche (esposizione, TPI e TWI) hanno avuto invece il contributo più basso (Tabella 9).

Tabella 9: Contributo e importanza della permutazione di ciascuna variabile al pericolo di incendio nel modello MaxEnt.

Variabile	Contributo percentuale (%)	Importanza della Permutazione (%)
Distanza da strade	**50.6**	**44.9**
Copertura del suolo	**16.3**	**16.2**
Distanza da ferrovie	**16.1**	**12.7**
Precipitazioni	7.0	11.6
Temperatura	2.8	4.5
Pendenza	2.8	3.5
Distanza da insediamenti	2.7	4.0
Orientamento del terreno	0.9	1.8
TPI	0.7	0.6
TWI	0.1	0.2

I risultati del test Jackknife mostrano l'importanza delle variabili per il modello (Fig. 4). Nel test Jackknife di training, test e AUC, la variabile con la performance più elevata quando utilizzata isolatamente è la distanza dalle strade, che sembra contenere da sé quindi le informazioni più importanti. Analogamente, la previsione del modello ha avuto meno successo in assenza della stessa variabile, il che significa che questa variabile contiene informazioni che le altre non contengono. La linea rossa indica le prestazioni del modello considerando tutte le variabili. Confrontando i grafici dei dati di training e test, si nota che le

prestazioni complessive dei dati di test sono leggermente superiori. La significatività delle singole variabili nei due grafici è molto simile (Fig. 4).

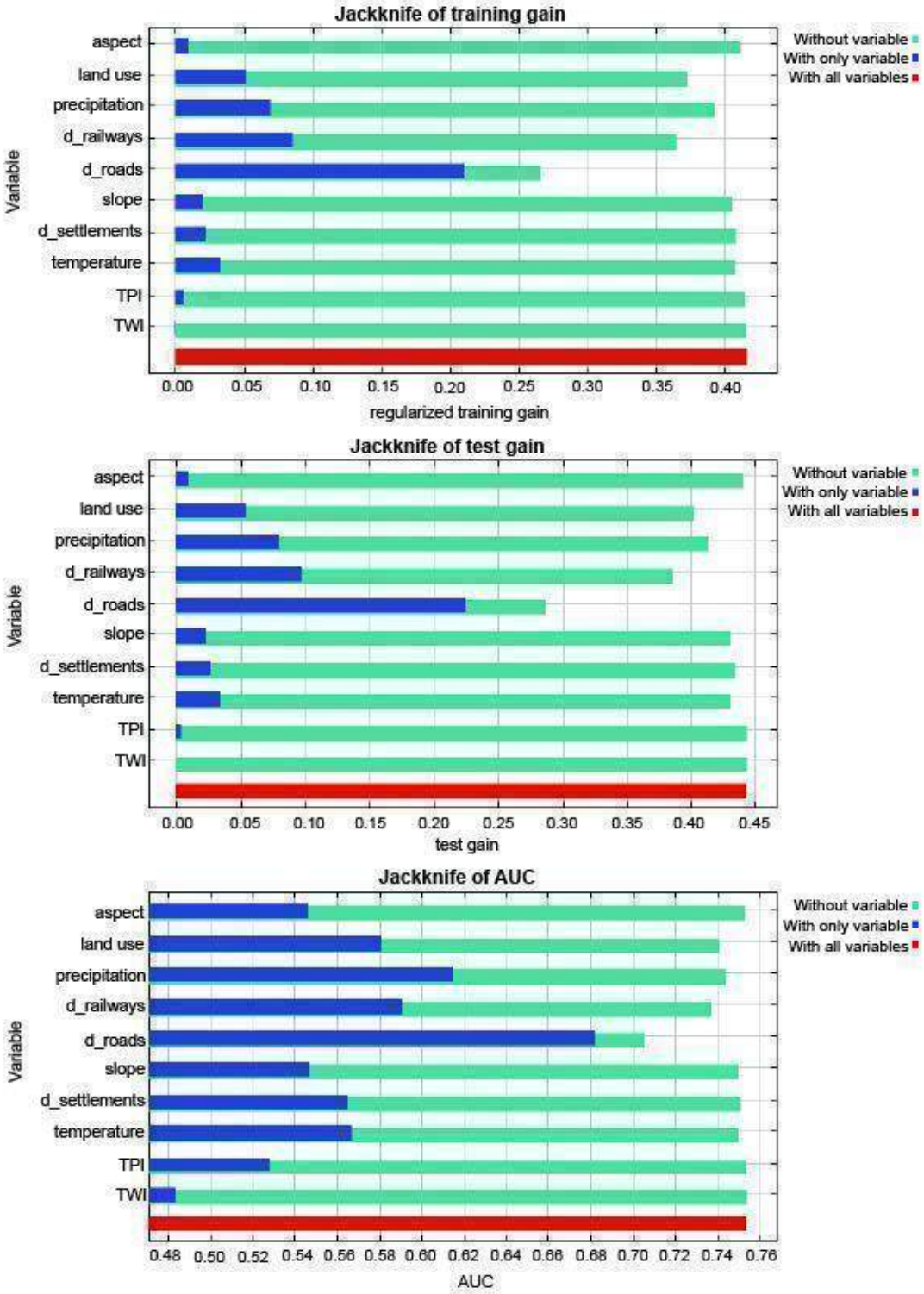


Figura 4 Risultati del test di Jackknife per i dataset di apprendimento, test e l'AUC.

L'analisi produce curve di risposta per ciascuna variabile utilizzata nella modellazione sotto forma di grafico e mostra come la probabilità di presenza prevista cambia al variare di ciascuna variabile, mantenendo tutte le altre variabili al loro valore medio campionario (Phillips, 2017). Sulla base delle curve di risposta presentate in Figura 5, possiamo osservare che la probabilità prevista di un incendio boschivo è più elevata tra i valori di esposizione di 150° e 250°, rispettivamente. Ciò indica che la probabilità è maggiore nelle aree esposte a sud e sud-ovest, mentre è minore nelle aree esposte a nord (rispettivamente intorno a 0° e 360°).

Il pericolo di incendio boschivo è più elevato (> 60%) nelle categorie di copertura del suolo 3, 5 e 6, che rappresentano aree incolte e seminaturali, foreste di conifere e altre aree naturali. D'altra parte, la probabilità è minore (< 30%) nella categoria di copertura del suolo 1 (superfici artificiali).

La curva di risposta mostra che la probabilità di incendio boschivo è massima a bassi livelli di precipitazione, diminuisce con l'aumentare delle precipitazioni e poi aumenta nuovamente con precipitazioni molto elevate (rispettivamente 2200 mm). Questo aumento finale potrebbe essere dovuto agli effetti della topografia che influenzano il rischio di incendio boschivo (ad esempio, un'elevata frequenza storica di incendi boschivi a quote più elevate, soggette a maggiori precipitazioni). La curva di risposta mostra che la probabilità di incendio boschivo è massima a bassi livelli di precipitazione, diminuisce con l'aumentare delle precipitazioni e poi aumenta nuovamente con precipitazioni molto elevate (rispettivamente 2200 mm). Questo aumento finale potrebbe essere dovuto agli effetti della topografia che influenzano il rischio di incendio boschivo (ad esempio, un'elevata frequenza storica di incendi boschivi a quote più elevate, soggette a maggiori precipitazioni).

L'analisi della probabilità di incendio evidenzia una forte correlazione negativa tra la distanza da ferrovie e strade e pericolo di incendio, segno che la vicinanza alle infrastrutture di trasporto ha un impatto importante sugli incendi boschivi. Analogamente, la probabilità di incendio boschivo prevista diminuisce con l'aumentare della distanza dagli insediamenti.

La curva di risposta mostra che la probabilità di incendio boschivo è minima sui terreni pianeggianti, aumenta rapidamente sui pendii dolci (rispettivamente 0-10°C) per diminuire gradualmente sui pendii più ripidi. Ciò suggerisce che il rischio di incendio boschivo è più probabile nelle aree con pendenze moderate.

La probabilità di incendio boschivo aumenta con la temperatura, raggiungendo un picco rispettivamente intorno a 11,5-12°C, per poi diminuire gradualmente a temperature più elevate. Ciò indica che temperature moderate favoriscono il verificarsi di incendi boschivi, probabilmente a causa delle condizioni ottimali per l'essiccazione della vegetazione, mentre temperature più basse e più alte potrebbero essere meno favorevoli agli incendi a causa della ritenzione idrica o di altri fattori climatici.

La curva di risposta per il TWI, simile a quella della temperatura, suggerisce che la probabilità di incendio boschivo aumenta a livelli di umidità moderati, raggiunge il picco a un valore di TWI intermedio e poi diminuisce con l'ulteriore aumento dell'umidità. Questo andamento riflette probabilmente un equilibrio tra la disponibilità di combustibile e l'umidità; le aree moderatamente umide possono supportare una maggiore vegetazione, fornendo combustibile sufficiente per gli incendi boschivi, mentre le aree molto secche mancano di biomassa e le aree molto umide trattengono troppa umidità per sostenere la propagazione degli incendi boschivi.

Il pericolo di incendio boschivo aumenta con valori di TPI più elevati, il che significa che è più probabile che si verifichino incendi boschivi in terreni elevati come creste e pendii superiori. Questo andamento deriva probabilmente da una maggiore esposizione al vento, da un migliore drenaggio che riduce la ritenzione di umidità e da una maggiore radiazione solare che promuove condizioni più asciutte, mentre valori di TPI più bassi (pianure/pendii inferiori e valli/depressioni) trattengono più umidità, rendendoli meno soggetti a incendi boschivi.

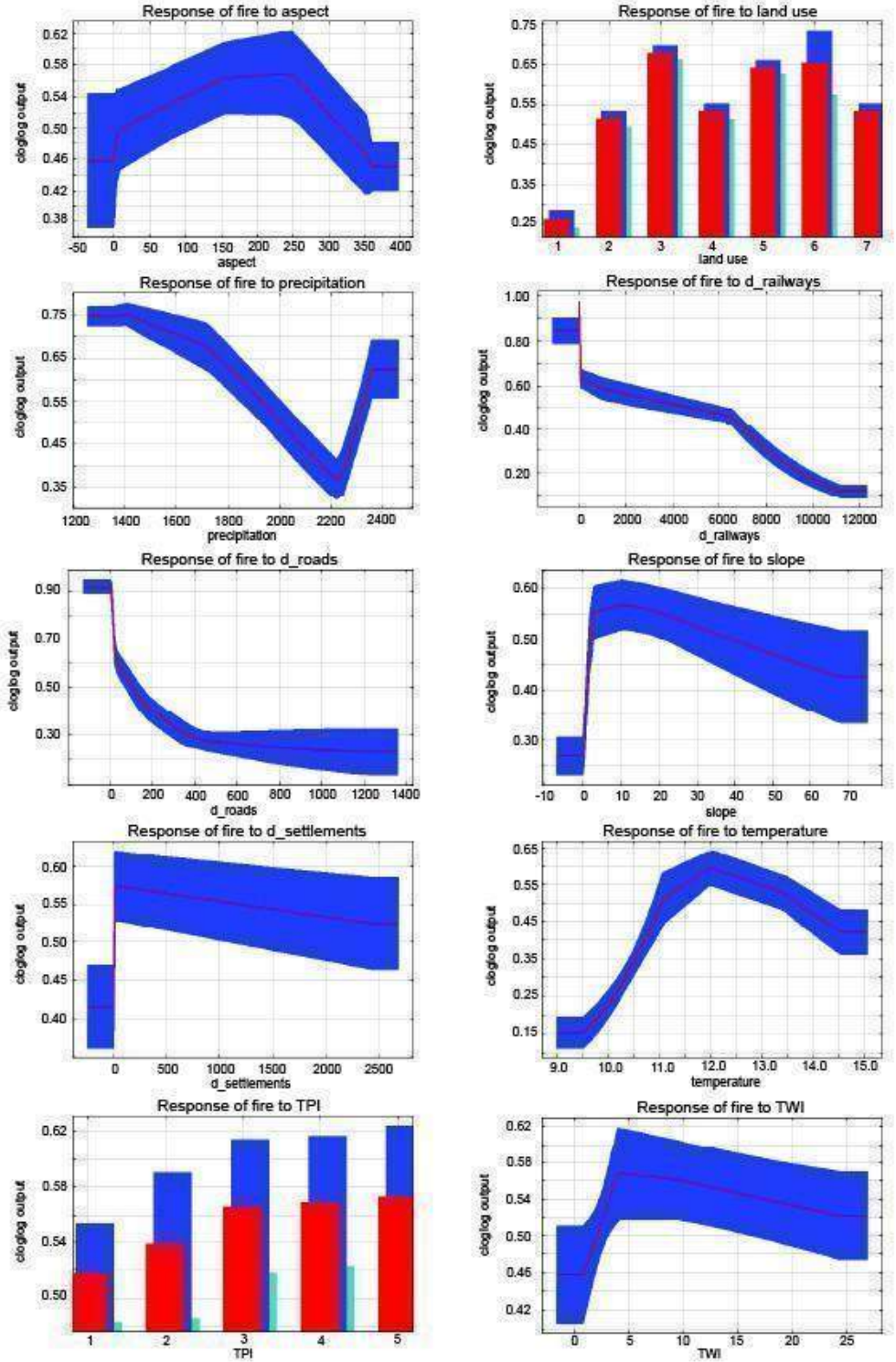


Figura 5 Le curve di risposta indicanti l'impatto di ciascuna variabile sulla previsione del modello Maxent. In rosso la risposta media dei cinque modelli replicati, ± la deviazione standard (in blu).

I livelli finali del pericolo attuale e futuro di incendi boschivi sono stati classificati in cinque livelli (basso, moderato, alto, significativamente alto ed estremamente alto) in base all'intervallo definito, di dimensioni pari a 0,20 (Fig. 6). Le cinque classi con diversi livelli di pericolosità classificata rappresentano rispettivamente il 22,71%, il 38,20%, il 23,00%, il 10,30% e il 5,78% dell'area di studio (Tabella 10). La maggior parte dell'area di studio è coperta da aree classificate a pericolosità moderata, che coprono il 38,20% dell'area totale. Seguono le aree con pericolosità elevata (23,00%) e bassa (22,71%). Le aree con pericolosità significativamente ed estremamente alta rappresentano rispettivamente il 10,30% e il 5,78% (Tabella 10). È evidente che le aree classificate come zone di pericolo di incendi boschivi significativamente elevato e superiore rappresentano una percentuale relativamente bassa (16,08%) dell'area di studio.

Nello scenario futuro di pericolo di incendi boschivi, i cinque livelli rappresentano rispettivamente il 26,83%, il 40,16%, il 21,25%, l'8,24% e il 3,51% dell'area di studio (Tabella 10). Analogamente all'attuale pericolo di incendi boschivi, la maggior parte dell'area di studio rimane nella categoria di pericolo di incendi boschivi moderato, coprendo il 40,16% dell'area totale. Tuttavia, l'area classificata a basso pericolo di incendi boschivi è aumentata del 4,12%, raggiungendo il 26,83%, mentre la categoria di pericolo di incendi boschivi elevato è leggermente diminuita, attestandosi al 21,25%. In particolare, la percentuale di aree classificate a pericolo di incendi boschivi significativamente elevato ed estremamente elevato è diminuita, rispettivamente, dal 2,06% e dal 2,27% all'8,24% e al 3,51% (Tabella 10). Ciò indica che in futuro si osserverà uno spostamento globale della pericolosità di incendi boschivi verso livelli più bassi, con un minor numero di aree soggette a condizioni di pericolosità significativamente o estremamente elevata.

Un'analisi della distribuzione spaziale delle zone di pericolosità rivela una considerevole variazione geografica del rischio di incendi boschivi all'interno dell'area di studio. Le aree con pericolo di incendio elevato, significativamente elevato ed estremamente elevato sono distribuite prevalentemente lungo la costa e attorno ai maggiori insediamenti, dove la densità di strade e ferrovie è maggiore. Le proiezioni indicano che nelle proiezioni climatiche future il pericolo di incendi boschivi diminuirà nelle regioni costiere, mentre aumenterà nelle aree interne (Fig. 6).

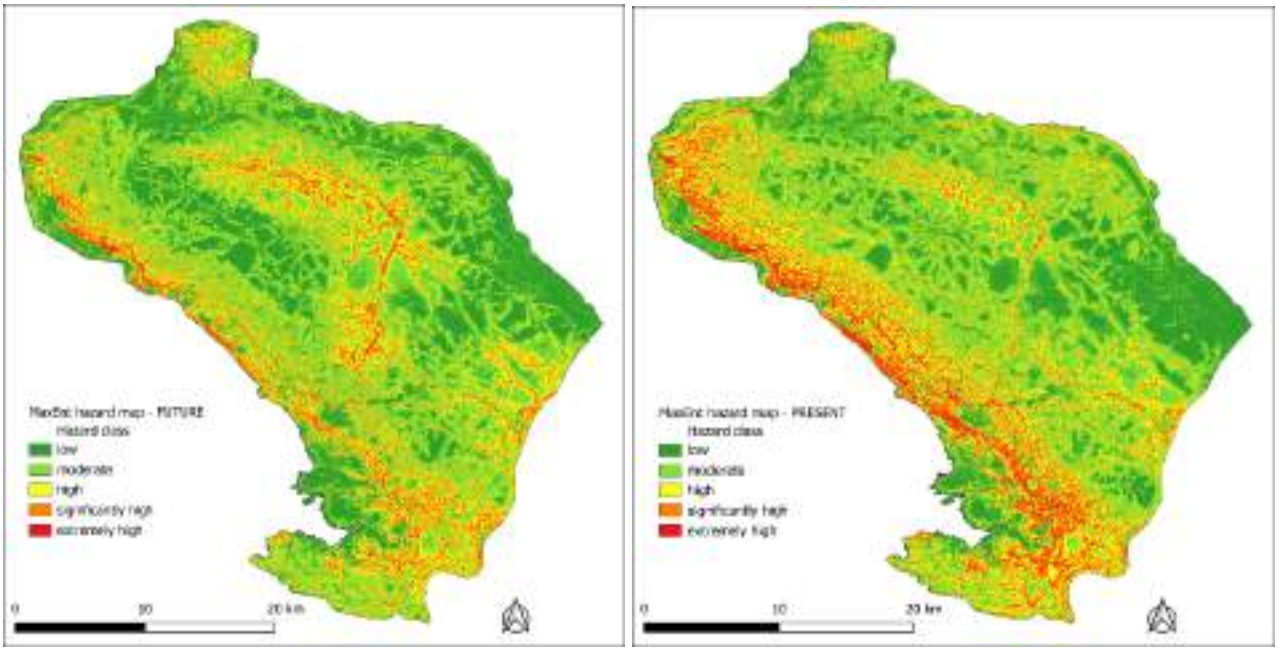


Figura 6 Carta del pericolo di incendi boschivi nelle condizioni climatiche attuali, a destra, e future, a sinistra.

Tabella 10: Area (km^2) delle classi di pericolo nell'area studio secondo le condizioni climatiche odierne e future e lor percentuale sul totale (%).

	Pericolo odierno		Pericolo futuro		Differenza	
	Area	Percentuale	Area	Area	Percentuale	Area
Bassa	228,36	22,71	269,78	26,83	41,42	4,12
Moderata	384,10	38,20	403,83	40,16	19,73	1,96
Elevata	231,28	23,00	213,67	21,25	-17,61	-1,75
Significativamente elevata	103,60	10,30	82,88	8,24	-20,72	-2,06
Estremamente elevata	58,12	5,78	35,30	3,51	22,82	-2,27
Totale	1005,46	100	1005,46	100	/	/

3.6 Valutazione della vulnerabilità agli incendi boschivi

Il processo di confronto a coppie AHP è stato eseguito con successo, ottenendo indici di coerenza ben al di sotto della soglia critica di 0,01. I pesi di ciascuna variabile e le relative categorie risultanti dall'AHP sono riportati nella Tabella 11. La categoria di variabili più importante è quella antropica, come ampiamente dimostrato anche in studi precedenti (Djabri et al., 2024; Gigović et al., 2018; Sivrikaya & Küçük, 2022), con un peso complessivo del 51%. Tra le variabili antropiche, la più rilevante è la distanza dalle strade (37%), seguita dalla distanza dagli insediamenti (9%) e dalle ferrovie (5%). Al secondo posto si colloca la categoria di variabili ambientali, rappresentata dalla variabile copertura del suolo con un peso del 31,5%. Le categorie topografica (con l'11,6%) e climatica (con il 5,8%) sono le due meno rilevanti.

Tabella 11: Risultati del confronto a coppie delle variabili esplicative e delle categorie di variabili. Nella colonna a destra il peso finale di ciascuna variabile, prodotto di entrambi gli step dell'AHP.

	Variabili	**Categoria**	**Peso finale**
Distanza da strade	0,72	0,511	0,3679
Distanza da ferrovie	0,1		0,0511
Distanza da insediamenti	0,18		0,092
Pendenza	0,42	0,116	0,0486
Orientamento del terreno	0,42		0,0493
TWI	0,09		0,0101
TPI	0,07		0,0084
Temperatura	0,75	0,058	0,0432
Precipitazioni	0,25		0,0144
Copertura del suolo	-	0,315	0,31

Le carte di vulnerabilità (Figura 7) mostrano che, nelle attuali condizioni climatiche, la maggior parte dell'area di studio rientra nella classe di vulnerabilità significativamente

elevata (67%), seguita dalle aree di vulnerabilità estrema (25%) (Tabella 12). Considerando le proiezioni climatiche future, le aree caratterizzate da una vulnerabilità estremamente elevata aumentano fino al 30%, a scapito di quelle caratterizzate da una vulnerabilità significativamente elevata (62%) (Tabella 12).

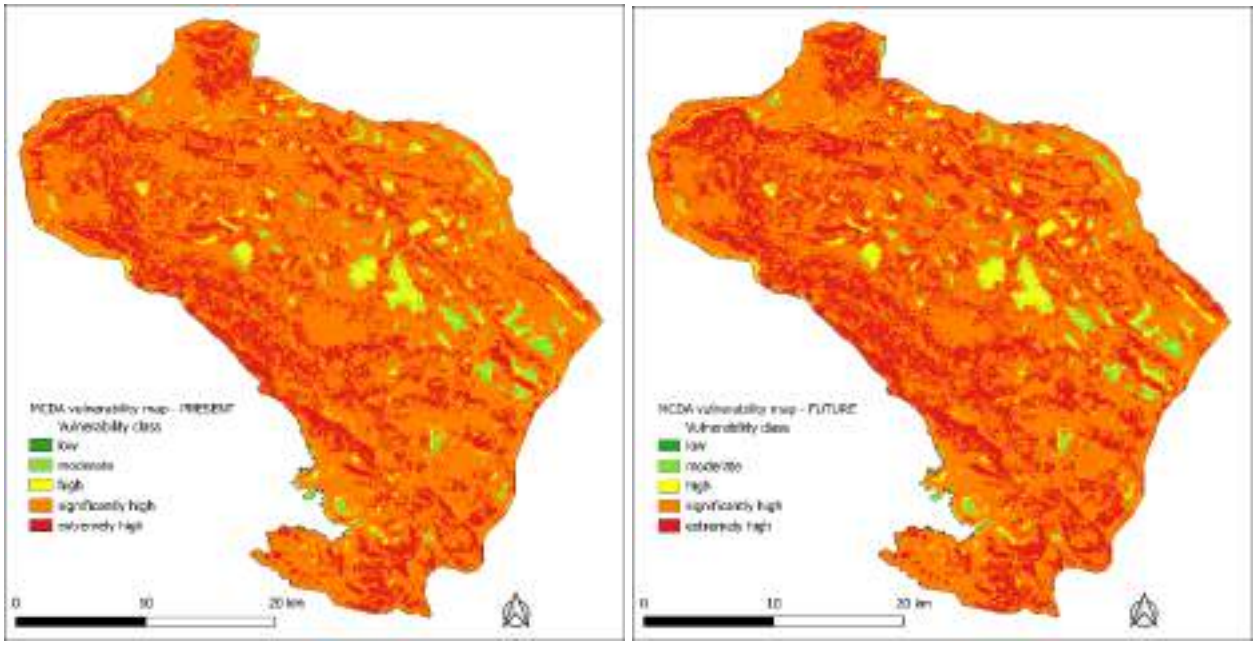


Figura 7 Carta della vulnerabilità nelle condizioni climatiche odierne, sulla sinistra, e secondo le proiezioni climatiche future, sulla destra.

Tabella 12: Area (km^2) delle classi di vulnerabilità nell'area studio secondo le condizioni climatiche odierne e future e percentuale sul totale (%).

	Vulnerabilità odierna		Vulnerabilità futura		Differenza	
	Area	Percentuale	Area	Percentuale	Area	Percentuale
Bassa	0,04	0,004	0,02	0,002	-0,02	-0,001
Moderata	25,1	2,49	21,2	2,11	-3,86	-0,38
Elevata	44,8	4,46	43,3	4,31	-1,52	-0,15

Significativamente elevata	679,4	67,58	630,4	62,70	-49,04	-4,87
Estremamente elevata	256,1	25,47	310,4	30,87	54,32	5,40
Totale	1005,5	100,00	1005,5	100,00	-	-

Le variabili climatiche sembrano comunque essere la categoria meno impattante sulla vulnerabilità agli incendi boschivi nel nostro scenario. Infatti, i *layer* di dati climatici utilizzati nello studio tengono conto solo dei valori medi annui di temperatura e dei valori cumulativi annui di precipitazione. La mancanza di una distribuzione dei dati nell'arco dell'anno non consente di distinguere gli andamenti meteorologici stagionali, che potrebbero celare la presenza di periodi più lunghi caratterizzati da clima secco e caldo. Inoltre, le proiezioni della quantità e della distribuzione delle precipitazioni durante le stagioni sono più difficili da stabilire a causa dell'elevato numero di variabili coinvolte e sono per lo più non significative per il periodo futuro più prossimo (Bertalanič et al., 2018).

3.7 Considerazioni sulla distribuzione spaziale dei punti di innesco degli incendi passati e sulla validazione delle carte di pericolo e di vulnerabilità

Gli incendi boschivi possono avere origine in numerosi modi, sia naturali che antropici. L'istogramma (Fig. 8) mostra la percentuale delle varie cause di incendi boschivi nel Carso, confrontando le statistiche complessive (grigio) con i dati di Italia (verde) e Slovenia (blu). La categoria più numerosa è quella degli incendi di origine sconosciuta (non classificati), che rappresenta oltre la metà di tutti i casi, con l'Italia (65,8%) che presenta una percentuale maggiore rispetto alla Slovenia (34,1%). Gli incendi boschivi accidentali (di origine antropica) sono più frequenti in Slovenia (33,4%) che in Italia (10,6%), il che suggerisce una maggiore incidenza di incendi di origine antropica in quella parte della regione. Al contrario, gli incendi boschivi di origine naturale (causati da fulmini) si verificano a tassi simili in entrambi i Paesi, intorno al 17-19%. Gli incendi dolosi intenzionali, sebbene generalmente meno frequenti, sono notevolmente più elevati in Slovenia (18,1%) rispetto all'Italia (4,5%). Queste variazioni

evidenziano differenze regionali nelle fonti di innesco degli incendi boschivi, che possono essere influenzate dall'uso del suolo, dalle misure di prevenzione degli incendi boschivi, da fattori socio-economici e dalle modalità di registrazione dei dati sugli incendi boschivi. In Slovenia, le cause degli incendi boschivi sono suddivise in nove categorie (Evidenca gozdnih požarov, 2024), mentre il livello degli incendi boschivi italiani è suddiviso in quattro categorie (RAFVG, 2024).

Per facilitare il confronto, è stata utilizzata la categorizzazione italiana delle cause, unendo nella categoria "accidentali (antropici)" le seguenti categorie per gli incendi boschivi registrate in Slovenia: lavori forestali, industria, lavori agricoli, comunicazioni (ferrovie, linee elettriche, ecc.) e visitatori (turisti, bambini, ecc.), altro (militari, ecc.)

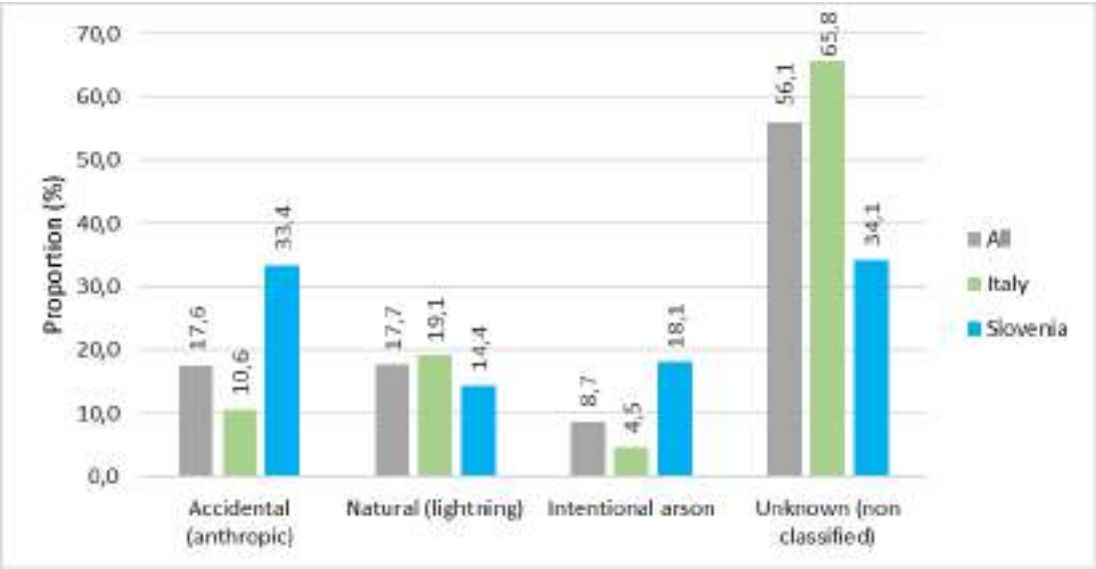


Figura 8 La percentuale di cause di incendi boschivi nella regione del Carso, confrontando le statistiche complessive (grigio) con i dati di Italia (verde) e Slovenia (blu).

Il grafico delle serie temporali (Fig. 9) mostra il numero di incendi boschivi nell'area di studio dal 1990 al 2024. I dati rivelano una significativa variabilità interannuale, con picchi nel numero di incendi boschivi negli anni 1993, 1998, 2003, 2006 e 2013, quando gli incendi

hanno superato quota 100. Questi picchi corrispondono principalmente a condizioni meteorologiche estreme (ad esempio, siccità e ondate di calore) verificatesi nella regione dell'area di studio (Sušnik et al., 2023). Dopo il 2014, si osserva una generale tendenza al calo degli incendi boschivi, sebbene persistano alcune fluttuazioni. Il basso numero di incendi negli ultimi anni potrebbe essere attribuito a una migliore gestione degli incendi boschivi, a strategie di prevenzione o a variazioni climatiche che riducono le condizioni favorevoli agli incendi. Tuttavia, l'aumento nel 2022 suggerisce che il rischio di incendi boschivi resta comunque episodico e dipendente da fattori ambientali e antropici. Comprendere queste fluttuazioni è essenziale per mitigare in futuro il rischio di incendi boschivi nella regione.

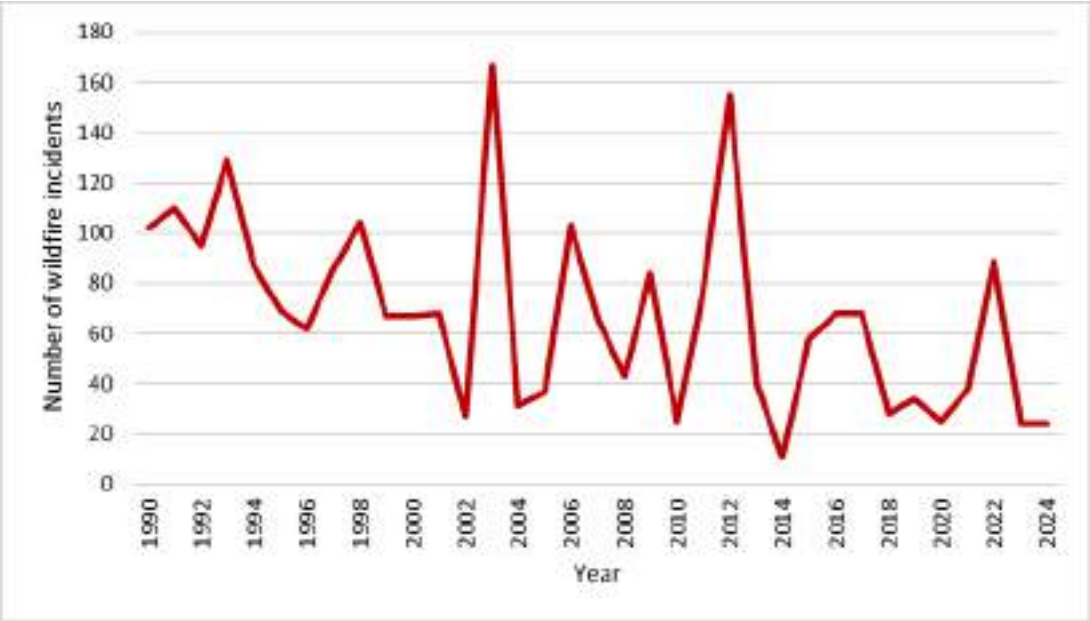


Figura 9 Numero di incendi boschivi negli anni sul Carso, Italiano e sloveno.

L'analisi degli incendi boschivi passati (n = 2.367) in relazione alle infrastrutture e alla copertura del suolo fornisce informazioni preziose sui pattern di incidenza degli incendi boschivi nell'area di studio. La vicinanza a strade, strade forestali e sentieri escursionistici, gioca un ruolo significativo nell'innesco degli incendi boschivi, rappresentando il fattore più critico. Nelle loro immediate vicinanze (fascia di 50 m) si è verificato infatti il 67,4% (n = 1.595) degli incendi. In media, gli incendi boschivi si sono verificati a una distanza di 52,52 m

dalle strade. Ciò evidenzia la forte correlazione tra l'innesco degli incendi boschivi e le reti di trasporto. Le strade possono fungere da fonti di innesco a causa dell'attività antropica (ad esempio, scarto di mozziconi di sigarette, scintille provenienti dai veicoli). Inoltre, il 14,1% degli incendi boschivi (n = 334) si è verificato entro una fascia di 50 m dalle ferrovie, il che suggerisce che le ferrovie, sebbene meno influenti delle strade, svolgono comunque un ruolo rilevante nell'innesco di incendi boschivi, probabilmente a causa delle scintille generate dai treni. La distanza media di tutti gli incendi dalle ferrovie è molto maggiore, 1.598,5 m, conseguenza di una rete ferroviaria meno densa nell'area di studio. Anche la vicinanza agli insediamenti contribuisce all'innesco di incendi boschivi visto che il 16,2% (n = 383) di questi si è verificato entro una fascia di 50 m da essi. La distanza media dagli insediamenti è di 403,3 m.

Gli incendi boschivi sono predominanti nelle seguenti categorie di copertura del suolo: aree seminaturali e incolte (39,8%) e foreste di latifoglie (36,9%). Seguono le aree agricole (9,4%) e le foreste di conifere (8,9%). I terreni artificiali (4,4%) e altre aree naturali (0,6%) hanno mostrato una minore incidenza di incendi boschivi.

L'accuratezza della probabilità di incendio boschivo è stata stimata anche confrontando i punti di innesco degli incendi boschivi con le categorie di pericolosità. Il 41,3% degli incendi boschivi passati ricade in aree appartenenti alla categoria di pericolo "estremamente elevato", seguita da quella "significativamente elevato" (21,7%) e "elevato" (21,3%). Ciò conferma che gli incendi boschivi osservati corrispondono alle aree a più alta pericolosità previste dal modello. Nelle attuali condizioni climatiche, le aree a vulnerabilità significativa ed estremamente elevata rappresentano invece il 98,6% degli incendi boschivi passati, percentuale che aumenterà fino al 98,9% nelle condizioni climatiche future (Fig. 10).

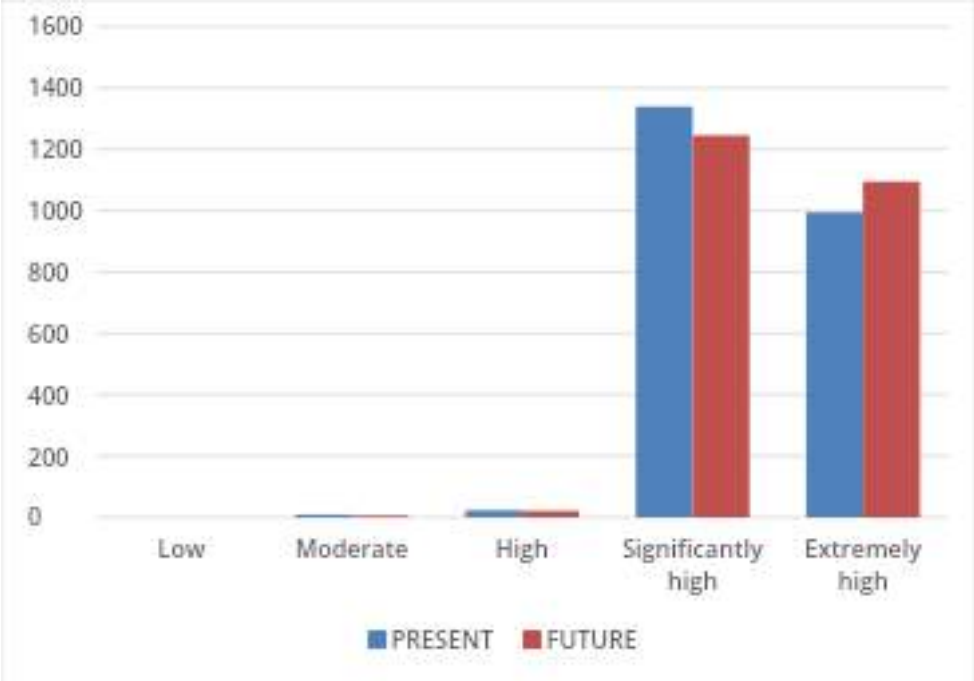


Figura 10 Distribuzione degli incendi boschivi passati nelle rispettive classi di vulnerabilità.

La carta della vulnerabilità è stata sovrapposta ai punti di innesco degli incendi boschivi (Fig. 11), rivelando che il 42% dei punti di innesco degli incendi boschivi del passato si è verificato in aree classificate come estremamente vulnerabili, mentre il 56% si è verificato in aree classificate come significativamente vulnerabili. Questo risultato indica che l'analisi della vulnerabilità ha identificato accuratamente le aree più soggette a incendi boschivi.

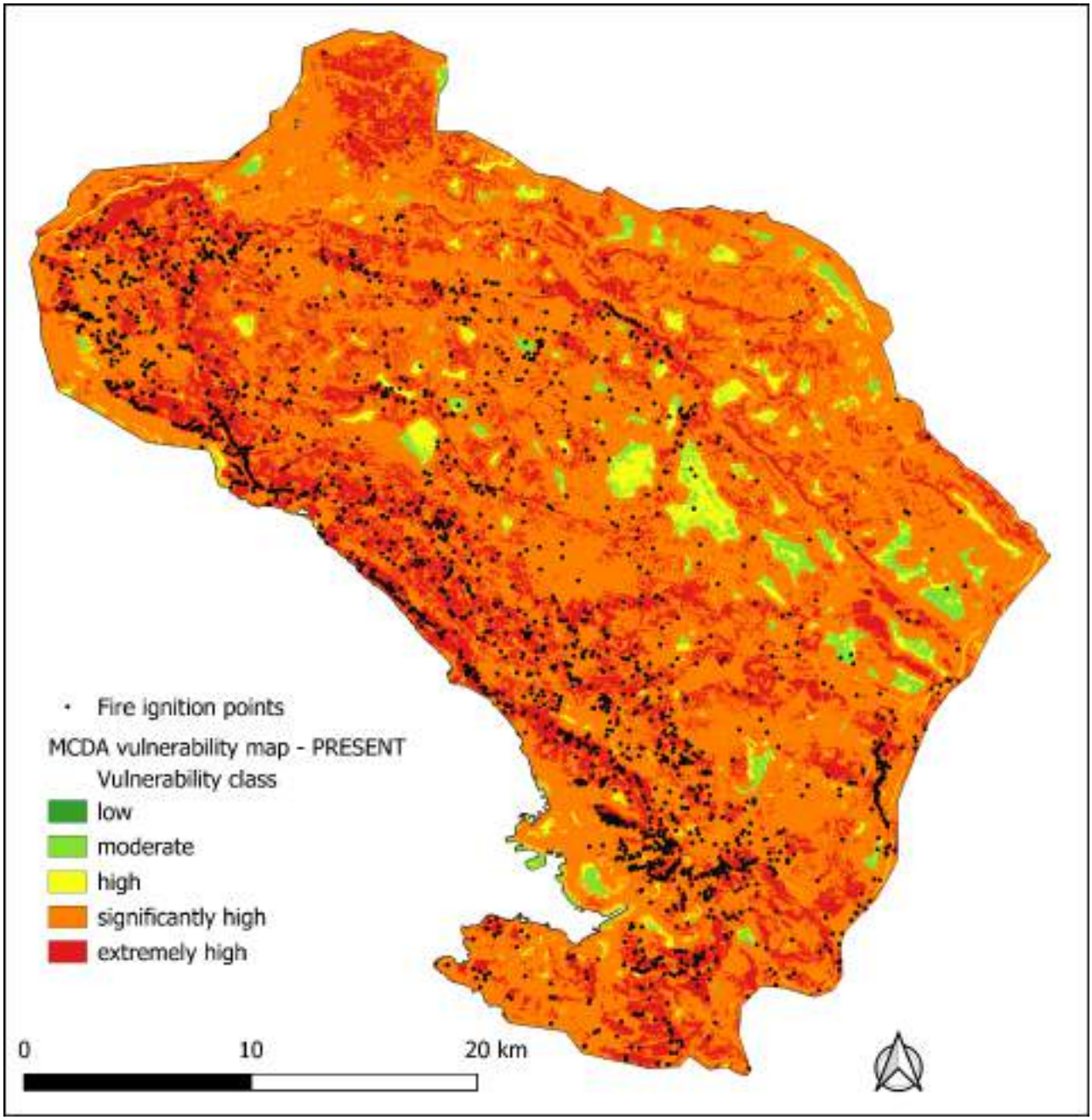


Figura 11 L'attuale carta della vulnerabilità degli incendi boschivi con la sovrapposizione dei punti di innesco degli incendi boschivi del passato, in nero.

3.8 Punti salienti e approfondimenti sugli approcci adottati per l'analisi del pericolo e della vulnerabilità agli incendi boschivi

Le carte di vulnerabilità e di pericolo ottenute sono notevolmente diverse. Mentre infatti l'analisi della vulnerabilità ha identificato come aree di vulnerabilità significativamente ed estremamente elevata il 93% dell'area di studio che rientra in aree ad alta vulnerabilità, le due classi di pericolo più elevato costituiscono solamente il 16% dell'intera area di studio nell'analisi del pericolo di incendio. Ciò è probabilmente dovuto alla distribuzione spaziale degli incendi boschivi passati, particolarmente concentrata in un'area ristretta rispetto all'intera area studio. Il dataset di input è stato appositamente ridotto da 2367 a 1206 punti per ridurne l'effetto distorsivo sul modello. La modellazione MaxEnt sembra essere più indicata per le analisi del pericolo di incendio boschivo, appunto perché è focalizzata sulla probabilità di accadimento di incendi boschivi. D'altra parte, l'analisi di vulnerabilità distribuisce equamente le aree ad alta vulnerabilità in tutta l'area studio, indipendentemente dagli eventi di incendio passati, fornendo così informazioni, oltre che sulle aree in cui è più probabile che gli incendi boschivi si inneschino, anche su dove è più probabile che si propaghino una volta innescati.

Un'altra differenza fondamentale tra i due metodi è la proiezione futura della probabilità di rischio di incendi boschivi e della loro vulnerabilità. Nello specifico, l'analisi di vulnerabilità prevede un aumento delle aree classificate a vulnerabilità estremamente elevata, dal 25% al 30% dell'area totale, mentre l'analisi di pericolosità ha previsto una diminuzione della probabilità di incendi boschivi nello scenario climatico futuro. Ciò è verosimilmente dovuto al fatto che, come risulta dall'AHP nell'analisi di vulnerabilità, alla temperatura e alle precipitazioni viene attribuito un peso rispettivamente del 4,32% e dell'1,44%. L'analisi indica che la temperatura ha un impatto tre volte superiore a quello delle precipitazioni sulla vulnerabilità finale, mentre l'analisi di pericolosità MaxEnt assegna alla temperatura e alla precipitazione un contributo rispettivamente del 2,8% e del 7,0%. Secondo le proiezioni climatiche future, è previsto che entrambe le variabili aumenteranno, ma ciascuna ha un effetto opposto sugli incendi boschivi. A seconda di quale delle due prevalga in ciascun approccio, i risultati saranno contraddittori.

Entrambi gli approcci si sono dimostrati strumenti efficaci per la mappatura della pericolosità e della vulnerabilità agli incendi boschivi, concentrandosi su diverse caratteristiche del rischio. La loro efficacia nell'analisi del rischio di incendio boschivo può quindi essere massimizzata integrando i rispettivi risultati. La modellazione MaxEnt ha fornito preziose informazioni attraverso le curve di risposta, dimostrando che la probabilità di incendi boschivi è maggiore sui pendii esposti a sud e sud-ovest, nelle aree forestali seminaturali e di conifere e nelle regioni con precipitazioni e pendenze moderate. Inoltre, la probabilità di rischio di incendi boschivi ha mostrato anche una forte correlazione negativa con la distanza da strade, ferrovie e insediamenti, sottolineando il ruolo critico delle infrastrutture nell'innesco degli incendi boschivi.

CONCLUSIONE

Il modello del pericolo di incendi boschivi basato su MaxEnt ha mostrato buone prestazioni, con un valore medio di AUC pari a 0,754 (± 0,014), superiore alla soglia di 0,75 di validità statistica. La **distanza dalle strade** è stata individuata come la variabile più influente, seguita dalla **copertura del suolo** e dalla **distanza dalle ferrovie**, confermando l'importanza assoluta dei fattori antropici nel determinare il pericolo di incendio. Le variabili topografiche come esposizione, TPI e TWI hanno contribuito invece in misura minore. La valutazione del pericolo con modelli MaxEnt permette di generare sulla base dei dati di presenza degli incendi passati delle curve di risposta per ogni variabile, che si rivelano fondamentali per comprendere meglio le dinamiche dei fattori che influenzano il pericolo di incendi. Il confronto con i dati reali ha infatti mostrato una forte corrispondenza con le aree classificate dal modello come di pericolo elevato, confermandone l'affidabilità.

Allo stesso modo, l'analisi della **vulnerabilità** attraverso il metodo MCDA/AHP ha identificato correttamente le aree a **vulnerabilità significativamente elevata ed estremamente elevata**, che comprendono insieme il **98,6% degli incendi passati**. Anche in questo caso, il fattore più influente è stato la distanza dalle strade, seguito dalla copertura del suolo.

L'analisi spaziale ha rivelato che le aree ad alto pericolo di incendio si concentrano lungo la costa e vicino agli insediamenti più grandi, dove la densità delle infrastrutture è maggiore. Una parte significativa degli incendi (67,4%) si è verificata infatti entro un raggio di 50 metri dalle strade, mentre il 14,1% in prossimità delle ferrovie e il 16,2% degli insediamenti. Gli incendi sono stati più frequenti nelle aree vegetate incolte (39,8%) e nelle foreste di latifoglie (36,9%), a conferma del ruolo chiave che gioca la disponibilità di combustibile.

Nonostante entrambe le analisi siano state condotte utilizzando le stesse variabili in input, i risultati sono alquanto diversi per quanto riguarda la distribuzione spaziale delle aree a più alto rischio:

- L'**analisi della vulnerabilità** ha identificato il **93%** dell'area di studio come significativamente o estremamente vulnerabile.

- Invece, queste due classi coprono solo il **16%** dell'area nello scenario di **pericolo di incendio**.

Ciò avviene perché l'analisi del pericolo si basa maggiormente sulla probabilità storica di innesco degli incendi, mentre l'analisi della vulnerabilità distribuisce uniformemente le zone di elevata vulnerabilità su tutta l'area studio basandosi solo sui fattori statici che vi concorrono.

Inoltre, ci sono importanti differenze per quanto riguarda la valutazione dello scenario climatico futuro (2011–2040):

- Secondo le analisi, le aree a **vulnerabilità estremamente alta** aumenteranno infatti del **5%;**

- La previsione del **pericolo** di incendi denota invece un calo in futuro.

Questa differenza è dovuta verosimilmente al diverso peso attribuito nei due approcci alle variabili climatiche. Le variabili climatiche utilizzate in questo studio descrivono soltanto le medie annuali, di temperatura e di precipitazioni, il che rappresenta naturalmente un limite, poiché non consente di distinguere i pattern stagionali.

Nel complesso, i risultati offrono quindi una solida base per sviluppare future strategie di riduzione del rischio di incendi boschivi. L'uso di variabili topografiche derivate da dati LiDAR ad alta risoluzione ha migliorato la precisione dei predittori legati al terreno, pur restando le variabili antropiche quelle predominanti. Le due analisi si completano a vicenda, offrendo prospettive differenti ma integrate per comprendere e gestire in modo più efficace il rischio di incendi nell'area carsica. Questo studio apre la strada ad ulteriori analisi che potrebbero includere la valutazione dell'esposizione al rischio di incendi boschivi, includendo così nelle analisi le aree sensibili dal punto di vista ambientale e socioeconomico.

4 RIFERIMENTI

Blitch, W., Sovie, A., & Tobin, B. (2023). Predictive modeling of cave entrance locations: Relationships between surface and subsurface morphology. *International Journal of Speleology*, *52*(2), 101–108. https://doi.org/10.5038/1827-806X.52.2.2455

Brown, J. L. (2014). SDMtoolbox: A python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. *Methods in Ecology and Evolution*, *5*(7), 694–700. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12200

Brun, P., Zimmermann, N. E., Hari, C., Pellissier, L., & Karger, D. N. (2022). *CHELSA-BIOCLIM+ A novel set of global climate-related predictors at kilometre-resolution* (Versione 1.0) [Geotiff,PDF]. EnviDat. https://doi.org/10.16904/ENVIDAT.332

Djabri, A. D., Bouhata, R., Guellouh, S., & Bensekhria, A. (2024). Wildfire Vulnerability Assessment and Mapping Using Remote Sensing, GIS and Weighted Overlay Method in the Eastern Aures in Khenchela, Algeria. *Geoadria*, *28*(2), 191–210. https://doi.org/10.15291/geoadria.4218

Dupuy, J., Fargeon, H., Martin-StPaul, N., Pimont, F., Ruffault, J., Guijarro, M., Hernando, C., Madrigal, J., & Fernandes, P. (2020). Climate change impact on future wildfire danger and activity in southern Europe: A review. *Annals of Forest Science*, *77*(2), 35. https://doi.org/10.1007/s13595-020-00933-5

Evidenca gozdnih požarov. (2024). [Dataset]. Zavod za gozdove Slovenije. https://prostor.zgs.gov.si/pregledovalnik/

Gigović, & Jakovljević. (2018). GIS Multi-Criteria Analysis for Identifying and Mapping Forest Fire Hazard: Nevesinje, Bosnia and Herzegovina. *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette*, *25*(3). https://doi.org/10.17559/TV-20151230211722

Goleiji, E., Hosseini, S. M., Khorasani, N., & Monavari, S. M. (2017). Forest fire risk assessment-an integrated approach based on multicriteria evaluation. *Environmental Monitoring and Assessment*, *189*(12), 612. https://doi.org/10.1007/s10661-017-6225-7

Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, *4*(1), 170122. https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122

Kim, S. J., Lim, C.-H., Kim, G. S., Lee, J., Geiger, T., Rahmati, O., Son, Y., & Lee, W.-K. (2019). Multi-Temporal Analysis of Forest Fire Probability Using Socio-Economic and Environmental Variables. *Remote Sensing*, *11*(1), 86. https://doi.org/10.3390/rs11010086

Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, *20*(7), 703–726. https://doi.org/10.1080/13658810600661508

Maniatis, Y., Doganis, A., & Chatzigeorgiadis, M. (2022). Fire Risk Probability Mapping Using Machine Learning Tools and Multi-Criteria Decision Analysis in the GIS Environment: A Case Study in the National Park Forest Dadia-Lefkimi-Soufli, Greece. *Applied Sciences*, *12*(6), 2938. https://doi.org/10.3390/app12062938

Merow, C., Smith, M. J., & Silander, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, *36*(10), 1058–1069. https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x

Mishra, B., Panthi, S., Poudel, S., & Ghimire, B. R. (2023). Forest fire pattern and vulnerability mapping using deep learning in Nepal. *Fire Ecology*, *19*(1), 3. https://doi.org/10.1186/s42408-022-00162-3

Paudel, G., Pandey, K., Lamsal, P., Bhattarai, A., Bhattarai, A., & Tripathi, S. (2024). Geospatial forest fire risk assessment and zoning by integrating MaxEnt in Gorkha District, Nepal. *Heliyon*, *10*(11), e31305. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31305

Phillips, S. J. (2017). *A Brief Tutorial on Maxent* (p. 39). http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/

Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, *190*(3–4), 231–259. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026

Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, *31*(2), 161–175. https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x

Phillips, S. J., Dudík, M., Elith, J., Graham, C. H., Lehmann, A., Leathwick, J., & Ferrier, S. (2009). Sample selection bias and presence-only distribution models: Implications for

background and pseudo-absence data. *Ecological Applications*, *19*(1), 181–197. https://doi.org/10.1890/07-2153.1

RAFVG - DC production, trade, cooperation, agricultural and forest resources – Regional Forestry Corps Service. (2024). *Fire beginning point* [Dataset].

Saaty, T. l. (2002). *DECISION MAKING WITH THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS*. *9*(3), 215–229.

Sivrikaya, F., & Küçük, Ö. (2022). Modeling forest fire risk based on GIS-based analytical hierarchy process and statistical analysis in Mediterranean region. *Ecological Informatics*, *68*, 101537. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101537

Sušnik, A., Vlahović, Ž., Moderc, A., & Habič, B. (2023). *Prilagajanje podnebnim spremembam. [PP14] Kmetijske suše*. Agencija RS za okolje. https://kazalci.arso.gov.si/sl/content/kmetijske-suse-0

Vilar, L., Gómez, I., Martínez-Vega, J., Echavarría, P., Riaño, D., & Martín, M. P. (2016). Multitemporal Modelling of Socio-Economic Wildfire Drivers in Central Spain between the 1980s and the 2000s: Comparing Generalized Linear Models to Machine Learning Algorithms. *PLOS ONE*, *11*(8), e0161344. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161344

Yang, X., Jin, X., & Zhou, Y. (2021). Wildfire Risk Assessment and Zoning by Integrating Maxent and GIS in Hunan Province, China. *Forests*, *12*(10), 1299. https://doi.org/10.3390/f12101299

Interreg Italia-Slovenija
Karst Firewall 5.0

Cofinanziato dall'Unione europea
Sofinancira Evropska unija

COLOPHON/KOLOFON

Editore / Založnik:
Servizio/agenzia di traduzione / Prevajalska služba/agencija:
Redazione / Uredništvo:
Crediti fotografici / Avtorstvo fotografij:
Stampa / Tisk:
Dati dell'edizione / Podatki o izdaji:
Luogo e data di pubblicazione / kraj in datum izdaje:

La presente pubblicazione è reperibile in formato elettronico all'indirizzo: www... /
To objavo lahko najdete v elektronski obliki na naslovu: www...

Il contenuto della presente pubblicazione non rispecchia necessariamente le posizioni ufficiali dell'Unione europea. La responsabilità del contenuto della presente pubblicazione appartiene all'autore [inserire nome dell'autore] / Vsebina te publikacije ne odraža nujno uradnih stališč Evropske unije. Odgovornost za vsebino te publikacije pripada avtorju [vstaviti avtorjevo ime]

Il progetto Karst Firewall 5.0 è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Projekt Karst Firewall 5.0 sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.
www.ita-slo.eu/karst-firewall-50

Interreg Italia-Slovenija
Karst Firewall 5.0

Cofinanziato dall'Unione europea
Sofinancira Evropska unija

OCENA NEVARNOSTI IN RANLJIVOSTI ZARADI POŽAROV V NARAVI OB PODNEBNIH SPREMEMBAH NA KRAŠKEM OBMOČJU

KARST FIREWALL 5.0

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

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

Il progetto Karst Firewall 5.0 è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Projekt Karst Firewall 5.0 sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.
www.ita-slo.eu/karst-firewall-50

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-D112
Titolo del documento / Naslov dokumenta:	OCENA NEVARNOSTI IN RANLJIVOSTI ZARADI POŽAROV V NARAVI OB PODNEBNIH SPREMEMBAH NA KRAŠKEM OBMOČJU
Work Package:	1
Attività / Aktivnost:	1.2
Partner responsabili (autori) / Odgovorni partnerji (avtorji):	IUAV Università di Venezia (Granceri Bradaschia, Massimiliano; Morassutti, Giacomo; Pintarič, Domen; Longato, Davide; Maragno, Denis; Musco, Francesco); ZRC-SAZU (Čonč, Špela; Breg Valjavec, Mateja; Ciglič, Rok)
Citazione / Citiranje:	Granceri Bradaschia M., Čonč Š., Morassutti G., Breg M., Longato D., Pintarič D., Ciglič R., Maragno D., Musco F., 2025, "VALUTAZIONE DEL PERICOLO E DELLA VULNERABILITÀ AGLI INCENDI BOSCHIVI SUL CARSO E L'IMPATTO DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO / OCENA NEVARNOSTI IN RANLJIVOSTI ZARADI POŽAROV V NARAVI OB PODNEBNIH SPREMEMBAH NA KRAŠKEM OBMOČJU", Karst Firewall 5.0 project, EU Interreg Italia Slovenia, 10.5281/zenodo.18220789
Luogo e data di pubblicazione / Kraj in datum objave:	Trst, 10/10/2025

KAZALO

1 UVOD 4

1.1 Projekt Karst Firewall 5.0 4

2 PREUČEVANO OBMOČJE 7

3 MATERIALI IN METODE 8

3.1 Pojasnjevalne spremenljivke 8

3.2 Točke vžiga požarov v naravi 13

3.3 Analiza verjetnosti požarne nevarnosti z MaxEnt modeliranjem 14

3.4 MCDA/AHP pristop za analizo požarne ranljivosti 16

4 REZULTATI IN DISKUSIJA 22

4.2 Analiza požarne ranljivosti 30

4.3 Prostorske ugotovitve o točkih vžiga požarov v naravi in preverjanje točnosti zemljevidov nevarnosti in ranljivost 33

4.4 Poudarki in ugotovitve iz analiz nevarnosti in ranljivosti zaradi požarov v naravi 38

5 ZAKLJUČKI 40

6 VIRI 42

Il progetto Karst Firewall 5.0 è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Projekt Karst Firewall 5.0 sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.
www.ita-slo.eu/karst-firewall-50

1 UVOD

1.1 Projekt Karst Firewall 5.0

Podnebne spremembe vplivajo na požarni režim na Krasu. Zaradi globalnega segrevanja bodo požari v naravi verjetno postali pogostejši in hujši (Dupuy et al., 2020). Sedanje strategije gašenja in upravljanja požarov postajajo manj učinkovite, zato so potrebni novi prilagoditveni pristopi. Projekt Karst Firewall 5.0 obravnava dva izziva na programskem območju: požare v naravi in upravljanje požarov v naravi. Za njuno reševanje namerava razviti inovativne akcijske načrte za ohranitev zdravega čezmejnega območja Krasa/Carso in povečanje njegove odpornosti z mislijo na prihodnost. Glede na čezmejne značilnosti študijskega območja v kraški pokrajini med Italijo in Slovenijo je ključno spodbujati čezmejno sodelovanje med obema državama, da bi obravnavali nujno potrebo po zmanjšanju tveganja požarov v naravi in razvoju strategij pravočasnega odzivanja, kar se je pokazalo ob velikem požaru poleti leta 2022.

Namen projekta je pripraviti podlago za boljši dialog in sodelovanje ne le med akterji, ki so neposredno vključeni v upravljanje in izvajanje strategij odzivanja na požare v naravi na obeh straneh meje, temveč tudi med akterji iz različnih sektorjev in širšo skupnostjo, ki so na nek način prizadeti zaradi posledic požarov v naravi. Na ta način bi lahko bil projekt Karst Firewall 5.0 resnično koristen pri razvoju učinkovitega čezmejnega mehanizma za preprečevanje in obvladovanje požarov v naravi, saj imajo vsi vključeni akterji, od posameznih državljanov in uporabnikov zemljišč do odločevalcev na visoki ravni, pri tem cilju zelo pomembno in dopolnilno vlogo.

Delovni sklop 1, ki se imenuje »Kako narediti Kras manj vnetljiv: konceptualni okvir za zmanjšanje tveganja čezmejnih kraških požarov«, je namenjen razvoju konceptualnega okvira za spodbujanje zmanjšanja tveganja požarov v naravi z vzpostavitvijo čezmejnega sodelovanja za učinkovito in prilagodljivo upravljanje požarov v naravi na kraških območjih. To vključuje izdelavo zemljevidov verjetnosti nevarnosti in ranljivosti zaradi požarov v naravi na projektnem območju. Cilj je osredotočiti se na vpliv prihodnjih podnebnih napovedi na režime požarov v naravi na čezmejnem območju Krasa/Carso. V ta namen sta bila izbrana dva skupna pristopa, in sicer **modeliranje na podlagi maksimalne entropije (MaxEnt) za analizo verjetnosti nevarnosti požarov v naravi** in **analiza večkriterijskih odločitev (MCDA, AHP) za analizo ranljivosti požarov v naravi**.

Modeliranje na podlagi Maxenta je zaradi svoje relativne preprostosti postalo zelo priljubljeno in se pogosto uporablja, zlasti na področjih ekologije in biogeografije (Phillips et al., 2006). Uporaba metod ekološkega modeliranja, kot so MaxEnt, posplošeni linearni modeli (ang. *Generalised linear models*; GLM) ali posplošeni aditivni modeli (ang. *Generalised additive* models; GAM), se je že izkazala za uspešno tudi na drugih znanstvenih področjih (npr. naravne nesreče, geografija) za napovedovanje prostorske porazdelitve naravnih pojavov in razumevanje prostorskih vzorcev naravnih procesov. Modeliranje MaxEnt je bilo npr. uporabljeno za napovedovanje prostorske razporeditve jam, kar lahko pomaga pri določanju območij v pokrajini, ki so kritična za pretok v kraškem sistemu podzemne vode (Blitch et al., 2023). V zadnjih letih je bil MaxEnt uspešno uporabljen tudi za oceno požarne ogroženosti, tveganja in verjetnosti v različnih okoljih in je v primerjalnih študijah presegel metode naključnega gozda (ang. *Random forest*) in modeliranje na podlagi GLM (Kim et al., 2019; Mishra et al., 2023; Paudel et al., 2024; Vilar et al., 2016; Yang et al., 2021).

Izdelava karte požarne ogroženosti zahteva oceno številnih različnih dejavnikov. Ker so dejavniki heterogeni in ima vsak določeno stopnjo relativne pomembnosti in se merijo svoj relativni pomen in mersko enoto, je bil za opredelitev območij z večjo/manjšo ranljivostjo izbran prostorsko-eksplicitni GIS-ovski pristop večkriterijske analize odločanja (MCDA) (Malczewski, 2006). V okviru izvedene MCDA je bila za dodelitev uteži, ki prikazujejo relativno pomembnost med izbranimi dejavniki, uporabljena metoda analitičnega hierarhičnega procesa (AHP), ki je ena najpogosteje uporabljenih metod za oceno relativne pomembnosti vseh analiziranih dejavnikov (Gigović in Jakovljević, 2018; Goleiji et al., 2017; Maniatis et al., 2022; Sivrikaya in Küçük, 2022). AHP je prvi teoretično utemeljil Saaty (2002) za primerjavo meril v MCDA in zagotavljanje matematično utemeljene metode za količinsko opredelitev subjektivnih ocen relativne pomembnosti.

2 PREUČEVANO OBMOČJE

Območje raziskave zajema zgodovinsko-geografsko območje planote Kras/Carso (Carso v Italiji in Kras v Sloveniji) in njene meje, ki segajo do severnega Jadranskega morja. Razteza se na približno 1000 km^2, pri čemer 30 % ozemlja spada pod Italijo, 70 % pa pod Slovenijo. Območje, na katerem poteka študija, se razteza med 13,47 zemljepisne dolžine in 45,55 zemljepisne širine ter 14,05 zemljepisne dolžine in 45,96 zemljepisne širine (EPSG:4326-WGS84). Za območje je značilno tako zgornje sredozemsko podnebje na obali kot bolj celinsko fitoklimatsko območje v notranjosti. Kras/Carso je klasičen primer kraške planote z apnenčasto podlago, ki se od obale hitro dviga do 350 m nadmorske višine, s hribovitimi grebeni, ki segajo od 400 do 700 m nadmorske višine. Vegetacija se spreminja od obalnih zaplat hrasta črnike (*Quercus ilex*), do združb črnega gabra (*Ostry carpinfolioa*), jesena (*Fraxinus ornus*) in puhastega hrasta (*Quercus pubescens*), ki vse bolj prekriva opuščene suhe kraške pašnike in travnike (Oriolo et al., 2021). Pogoste so zaplate tujerodnih gozdov črnega bora (*Pinus nigra*), ki izvirajo iz prizadevanj za pogozdovanje v 19. stoletju.

Slika 1 Preučevano območje – Italija (levo), Slovenija (desno).

3 MATERIALI IN METODE

Za oceno in kartiranje **verjetnosti nevarnosti požarov v naravi** (ang. *wildfire hazard probability*; v nadaljevanju »požarna nevarnost«) smo uporabili modeliranje z MaxEntom, **za ranljivost zaradi požarov** (ang. *wildfire vulnerability*; v nadaljevanju »požarna ranljivost«) pa večkriterijsko analizo odločanja (MCDA) z uporabo analitičnega hierarhičnega procesa (AHP). Pred izvedbo analiz so bile na podlagi razpoložljivih (in primerljivih) čezmejnih podatkov izbrane pojasnjevalne spremenljivke, ki lahko predstavljajo dejavnike, ki prispevajo k nastanku in širjenju požarov v naravi.

3.1 Pojasnjevalne spremenljivke

Na podlagi pregleda literature (Gigović & Sekulović, 2018; Maniatis et al., 2022; Mishra et al., 2023; Nuthammachot & Stratoulias, 2021; Sivrikaya & Küçük, 2022; Trucchia et al., 2022, 2023; Yang et al., 2021) smo kot potencialne dejavnike, ki vplivajo na požarna nevarnost in ranljivost, izbrali **11 pojasnjevalnih spremenljivk** ter jih uporabili za modeliranje in analize. To je zajemalo spremenljivke, ki odražajo različne **antropogene** (oddaljenost od železnic, cest (glavne ceste, gozdne ceste in pohodniške poti) in naselij), **okoljske** (pokrovnost/raba tal), **klimatske** (padavine in temperatura) in **topografske značilnosti** (ekspozicija, nadmorska višina, naklon, topografski pozicijski indeks (ang. *Topographic Position Index*, TPI), indeks topografske vlažnosti (ang. *Topographic Wetness Index*, TWI). Seznam spremenljivk skupaj z njihovim razponom in viri podatkov je v preglednici 1. Za izračun in obdelavo vseh spremenljivk sta bila uporabljena programa ESRI ArcGIS Pro 3.4.0 (ESRI, Redlands, CA, ZDA) in QGIS 3.40.4 (QGIS Development Team, 2025).

Zaradi čezmejne narave študijskega območja je bilo pri zbiranju in standardizaciji vhodnih podatkov nekaj izzivov. Da bi dosegli čim boljšo prostorsko ločljivost podatkov, smo poskušali čim več podatkov pridobiti od državnih ali regionalnih uradnih služb (preglednica 1). Podatke, ki odražajo antropogene značilnosti smo pridobili od Geodetske uprave Republike Slovenije (GURS) in Infrastrukture za okoljske in prostorske podatke (IRDAT) Avtonomne dežele Furlanije-Julijske krajine (RAFVG). Poleg tega je bil ob spoznanju, da ima Openstreetmap (OSM) popolnejši prikaz pohodniških poti tako v Italiji kot v Sloveniji, cestni sloj integriran z elementi, prenesenimi s strežnika OSM. Antropogene sloje, ki so bili za obe strani na voljo v vektorski obliki, smo najprej združili v en sam sloj za vsako spremenljivko posebej in jih nato rasterizirali. Za izdelavo slojev razdalj smo uporabili orodje za izračun evklidske razdalje..

Za izdelavo sloja pokrovnosti/rabe tal so bili uporabljeni nacionalni in regionalni sloji pokrovnosti/rabe tal, ki so imeli bistveno večjo ločljivost kot evropski podatki Corine Land Cover (CLC). Slednji je bil kljub temu uporabljen za izdelavo enotne opredelitve posameznih tipov pokrovnosti/rabe tal za italijanski in slovenski sloj. Tako je bilo ob združitvi obeh slojev mogoče dodeliti ustrezno kategorijo pokrovnosti/rabe tal iz klasifikacije CLC. Poleg tega so bila s poudarkom na spremenljivki gozdni sestoj iz sloja odstranjena območja, ki spadajo v kategorijo gozdnega pokrova, in nadomeščena s satelitsko pridobljenimi podatki Copernicus tip gozda (ang. *Forest Type*) visoke ločljivosti, ki natančno opredeljuje do majhnih zaplat gozda in jih ločuje na listnate ali iglavce.

Zaradi različnih prostorsko-časovnih značilnosti državnih/regionalnih podnebnih podatkov za Italijo in Slovenijo, smo se odločili, da uporabimo podnebne podatke za trenutno (1981–2010) in bližnje prihodnje stanje (2011–2040), ki so na voljo na podatkovnem portalu CHELSA Climate (Brun et al., 2022; Karger et al., 2017). Ker so bili podnebni podatki na voljo v ločljivosti 1 km × 1 km, smo jih pretvorili celično ločljivost 3 m × 3 m. Za izračun topografskih značilnosti smo uporabili digitalni model reliefa (DMR) z ločljivostjo celice 1 m × 1 m, ki smo ga pridobili od Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) in IRDAT FVG (preglednica 1). Vsi sloji spremenljivke so bili nato prostorsko obrezani na enak obseg preučevanega območja in pretvorjeni na enako ločljivost celic (tj. 3 m × 3 m). Za izvoz rastrskih slojev v MaxEntu berljivo obliko smo pretvorili rastrske sloje iz formata *.geotiff* v format *.ascii*..

Pred modeliranjem in analizo smo z dvema različnima testoma v programu ArcGIS Pro preverili korelacijo med spremenljivkami. Za izdelavo korelacijske matrike je bilo uporabljeno orodje »Band collection statistics«, za pridobitev informacij o faktorju inflacije variance (ang. *variance inflation factor*, VIF) pa orodje »Ordinary Least Squares (OLS)«. Ker sta oba testa kolinearnosti pokazala, da sta dve spremenljivki korelirani (nadmorska višina in temperatura, preglednici 2 in 3), smo se odločili, da iz analiz izločimo spremenljivko nadmorska višina in ohranimo spremenljivko temperatura.

Preglednica 1: Seznam pojasnjevalnih spremenljivk z virom podatkov.

	Spremenljivka	Vir podatkov SLO	Vir podatkov ITA
Antropogene	Oddaljenost od glavnih cest, gozdne cest in pohodniških poti	Podatki Geodetske uprave Republike Slovenije (GURS), Openstreetmap	RAFVG, ISPRA, Insiel S.p.a., Openstreetmap
	Oddaljenost od železnic		
	Oddaljenost od naselij		
Okoljske	Pokrovnost/raba tal	Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (MKGP), Corine Land Cover (CLC)	RAFVG, Corine Land Cover (CLC)
Klimatske	Letna količina padavin (1981–2010)	CHELSA Climate (Brun et al., 2022; Karger et al., 2017)	
	Povprečna letna temperatura zraka (1981–2010)		
	Letna količina padavin (2011–2040)		
	Povprečna letna temperatura zraka (2011–2040)		
Topografske	Ekspozicija	Podatki LiDAR (ločljivost celice 1 m × 1 m), Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO)	Podatki LiDAR (ločljivost celice 1 m × 1 m), RAFVG
	Naklon		
	Topografski pozicijski indeks (TPI)		
	Indeks topografske vlažnosti (TW)		

Preglednica 2: Korelacijska matrika za pojasnjevalne spremenljivke. 1 – Ekspozicija, 2 – Nadmorska višina, 3 – Raba tal, 4 – Padavine, 5 – Oddaljenost od železnic, 6 – Oddaljenost od cest, 7 – Naklon, 8 – Oddaljenost od naselij, 9 – Temperatura, 10 – TPI, 11 – TWI

Spremenljivka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	-0,02	-0,05	-0,06	-0,01	-0,02	-0,01	-0,05	0,03	0,01	-0,00
2	-0,02	1	0,31	0,25	0,32	0,09	0,11	0,44	**-0,94**	0,10	-0,03
3	-0,05	0,31	1	0,19	0,17	0,09	0,25	0,39	-0,29	0,02	-0,08
4	-0,06	0,25	0,19	1	0,07	0,15	0,06	0,16	-0,41	0,01	-0,05
5	-0,01	0,32	0,17	0,07	1	0,12	0,10	0,22	-0,40	0,02	-0,01
6	-0,02	0,09	0,09	0,15	0,12	1	-0,02	0,18	-0,15	0,02	0,01
7	-0,01	0,11	0,25	0,06	0,10	-0,02	1	0,06	-0,14	-0,12	-0,37
8	-0,05	0,44	0,39	0,16	0,21	0,18	0,06	1	-0,41	0,04	-0,00
9	0,03	**-0,94**	-0,29	-0,41	-0,40	-0,15	-0,14	-0,41	1	-0,04	0,02
10	0,01	0,10	0,02	0,01	0,02	0,02	-0,12	0,04	-0,04	1	-0,27
11	-0,00	-0,03	-0,08	-0,05	-0,01	0,01	-0,37	-0,00	0,02	-0,27	1

Preglednica 3: VIF vrednosti za pojasnjevalne spremenljivke.

Spremenljivka	VIF vrednost
Ekspozicija	1,02
Nadmorska višina	**18,43**
Raba tal	1,07
Padavine	2,36
Oddaljenost od železnic	1,15
Oddaljenost od cest	1,10
Naklon	1,22
Oddaljenost od naselij	1,24
Temperatura	**22,87**
TPI	1,25
TWI	1,26

3.2 Točke vžiga požarov v naravi

Za modeliranje požarne nevarnosti in validacijo požarne ranljivosti smo uporabili točke vžiga požarov v naravi (v nadaljevanju »požari«), ki smo jih pridobili od Zavoda za gozdove Slovenije in IRDAT FVG. Nabor podatkov je skupaj vseboval 2367 točk, od katerih je bilo 724 točk zbranih v obdobju 1994–2024 za slovenski del in 1643 točk v obdobju 1990–2024 za italijanski del preučevanega območja.

Ker se požari na določenih območjih pojavljajo pogosteje (v gručah), smo nabor podatkov prostorsko filtrirali, da bi se izognili pristranskosti modela na določenih lokacijah zaradi prostorske avtokorelacije. Nabor podatkov smo filtrirali na podlagi orodja »Spatially rarefy occurrence data tool« iz zbirke orodij »SDM« za ArcGIS Pro (Brown, 2014), ki omogoča, da se lokacije prisotnosti zmanjšajo na eno točko v okviru določene evklidske razdalje (Brown, 2014). Uporabili smo tri različne pragove razdalj (100, 250 in 500 m) in ocenili prag 250 m kot najprimernejši. Na razdalji 100 m so bile gruče še vedno prisotne, na razdalji 500 m pa so bili podatki preveč redki (preglednica 4). Za modeliranje požarne nevarnosti v programu MaxEnt so bile filtrirane točke požarov (prag 250 m) izvožene kot datoteka *.csv* s tremi zahtevanimi stolpci: vrsta (v našem primeru »požar«), zemljepisna dolžina in zemljepisna širina. Za validacijo rezultatov požarne ranljivosti (MCDA/AHP) in vizualni pregled požarne nevarnosti (Maxent) smo izvedli prostorsko povezavo med vsemi požari in zemljevidi ranljivosti/nevarnosti. Vsak razred ranljivosti/nevarnosti smo primerjali s številom požarov.

Preglednica 4: Število odstranjenih podvojitev, prostorsko avtokoreliranih odstranjenih točk in točk v končnem naboru podatkov za tri različne pragove razdalje (100, 250 in 500 m) z orodjem »Spatially rarefy occurrence data tool«.

	Št. odstranjenih podvojitev	Št. prostorsko avtokoreliranih odstranjenih točk	Št. točk v končnem naboru podatkov
100 m prag	9	583	1775
250 m prag	9	1152	1206
500 m prag	9	1614	744

3.3 Analiza verjetnosti požarne nevarnosti z MaxEnt modeliranjem

MaxEnt je široko namensko programsko orodje za strojno učenje, ki je bilo razvito predvsem za modeliranje porazdelitve vrst. Na splošno MaxEnt ocenjuje verjetnost prisotnosti pojava (npr. ciljne vrste) na podlagi znanih lokacij prisotnosti in pojasnjevalnih spremenljivk z uporabo pristopa največje entropije (Phillips, 2017; Phillips et al., 2006; Phillips & Dudík, 2008). Modeliranje MaxEnt ima številne prednosti: programska oprema omogoča enostavno uporabo, dopušča uporabo podatkov samo o prisotnosti (ne pa tudi odsotnosti) in omogoča delo z majhnimi vzorci podatkov, podpira uporabo zveznih in kategoričnih spremenljivk, neposredno izdela prostorsko eksplicitno karto primernosti, pomembnost posameznih spremenljivk za model pa je mogoče enostavno oceniti z vgrajenim testom "Jackknife" (Phillips, 2017; Phillips et al., 2006; Phillips & Dudík, 2008). Poleg številnih prednosti so bile pri modeliranju z MaxEntom ugotovljene tudi nekatere pomanjkljivosti, vključno s pretiranim prilagajanjem, pristranskimi podatki o prisotnosti, nekoliko vprašljive pa so tudi metode za ocenjevanje uspešnosti modela (Phillips et al., 2009; Phillips & Dudík, 2008).

Za modeliranje napovedi sta potrebni dve vrsti podatkov. Prva je znana prisotnost/razširjenost pojava, ki ga je treba napovedati (v našem primeru vzorčne točke vžiga požarov v naravi na preučevanem območju, vsaka opredeljena z zemljepisno širino in dolžino), druga pa so podatki o spremenljivkah, ki opisujejo značilnosti preučevanega območja (npr. okoljske, topografske, antropogene) znotraj območja razširjenosti preučevanega pojava (Merow et al., 2013; Phillips et al., 2006). Pri modeliranju obseg rastrskih celic določa območje, na katerem bo Maxent določil verjetnost prisotnosti oz. porazdelitve. Točke prisotnosti so pripisane rastrskim celicam, ki predstavljajo vzorčne točke. Na podlagi obsega preučevanega območja orodje ustvari točke ozadja, ki predstavljajo lokacije, razporejene po preučevanem območju, kjer je prisotnost možna, vendar neznana. Točke ozadja se uporabljajo za modeliranje značilnosti območja na neznanih lokacijah in njihovo primerjavo z značilnostmi območja na znanih lokacijah prisotnosti (Merow et al., 2013; Phillips et al., 2006). Model zahteva, da so podatki o spremenljivkah v enakem obsegu in ločljivosti za vsako celico (Phillips, 2017).

Za modeliranje z Maxentom je bilo uporabljeno samostojno odprtokodno orodje Java Maxent (ver. 3.4.4) (Phillips et al., 2017). V orodju smo izbrali ustvarjanje odzivnih krivulj (ang. *Response curves*), test »Jackknife« in slike napovedi. Kot format izhodnih podatkov smo izbrali privzeti cloglog, ki daje oceno verjetnosti prisotnosti med 0 in 1 in je najlažji za razlago (Phillips, 2017). V osnovnih nastavitvah smo koeficientu regularizacije (ang. *regulariaztion multiplier*) nastavili vrednost 1,5, da bi se izognili pretiranemu prilagajanju in dobili bolj razpršene, manj lokalizirane napovedi. Za oceno uspešnosti modela smo uporabili metodo *k*-kratnega navzkrižnega preverjanja (ang. *k-fold cross-validation*), pri kateri se podatki o prisotnosti naključno razdelijo v več enako velikih skupin (tj. podvzorcev) za učenje in testiranje. Model nato izmenično izloča posamezen vzorec iz kreiranja modela in ga v nadaljevanju uporabi za validacijo rezultatov (Phillips, 2017). Izbrali smo pet ponovitev (k = 5) navzkrižnega preverjanja. Druge nastavitve so bile privzete.

Za oceno prihodnje požarne nevarnosti v spreminjajočih se podnebnih razmerah smo za poenostavljeno napoved podnebnih sprememb uporabili nastavitev »Projection«. Nastavitev »Projection layers directory« smo nastavili na mapo, ki vsebuje enake pojasnjevalne spremenljivke kot za splošno Maxent modeliranje (mapa »Layers«), vendar sta spremenljivki padavin in temperature vsebovali vrednosti za prihodnje podnebne scenarije (2011–2040).

3.4 MCDA/AHP pristop za analizo požarne ranljivosti

Za oceno ranljivosti na podlagi MCDA so bile v prvem koraku izbrane spremenljivke razvrščene v pet razredov (glede na razpone vrednosti ali kategorije), katerim so bili dodeljeni ustrezni razredi ranljivosti s povezanimi ocenami (preglednica 5). Ta postopek je temeljil na pregledu obstoječe literature s podobnimi razvrstitvami spremenljivk v razrede ranljivosti požarov v naravi (npr. Djabri et al., 2024; Gigović et al., 2018; Maniatis et al., 2022; Sivrikaya & Küçük, 2022), vendar je bila naša razvrstitev prilagojena značilnostim preučevanega območja (preglednica 6).

Preglednica 5: Stopnje ranljivosti.

1	Nizka ranljivost

2	Zmerna ranljivost
3	Visoka ranljivost
4	Znatno visoka ranljivost
5	Izjemno visoka ranljivost

V drugem koraku je bila za študijsko območje izdelana georeferencirana rastrska mreža z ločljivostjo 3 m × 3 m. Da bi lahko primerjali različna merila, je bila za vsako določeno spremenljivko vsakemu pikslu rastra dodeljena vrednost od 1 do 5, ki ustreza relativni stopnji požarne ranljivosti, kot je prikazano v preglednici 5. Za pridobitev končnega zemljevida ranljivosti je bilo 10 rastrskih slojev posameznih spremenljivk, razvrščenih po ocenah ranljivosti, prostorsko združenih z metodo tehtanega seštevka v skladu z naslednjo enačbo, kjer so m, n, p in q uteženi koeficienti, ki so dodeljeni glede na relativno pomembnost po metodi AHP:

požarna ranljivost = m × antropogeni faktorji + n × klimatski faktorji + p × topografski faktorji + q × okoljski faktorji

Preglednica 6: Seznam spremenljivk, razvrščenih po razredih, z razponom in razredi ranljivosti.

	Spremenljivka	**Razpon (min–max)**	**Razredi***	**Stopnje ranljivost (1, nizka - 5, visoka)***
Antropogene	Oddaljenost od glavnih cest, gozdne cest in pohodniških poti	0–1266,43 m	0–200 m	5
			400–600 m	4
			600–800 m	3
			800–1000 m	2
			> 1000 m	1
	Oddaljenost od železnic	0–11.389,14 m	0–100 m	5

			100–200 m	4
			200–500 m	3
			500–1000 m	2
			> 1000 m	1
	Oddaljenost od naselij	0–2509,65 m	0–500 m	5
			500–1000 m	4
			1000–1500 m	3
			1500–2000 m	2
			> 2000 m	1
Okoljske	Pokrovnost/raba tal	/	1: umetne površine	1
			2: kmetijske površine	2
			2: polnaravne površine, kmetijsko zemljišče v zaraščanju, prehodno grmičevje	3
			3: listnati gozd	4
			4: iglasti gozd	5
			5: druge naravne površine (skalovje, močvirje, ...)	2
			6: voda	0/N/A
	Letna količina padavin (1981–2010)	1344,8 - 2365,83 mm	0–1500 mm	5
			1500–1700 mm	4
			1700–1900 mm	3
			1900–2100 mm	2
			> 2100 mm	1
	Povprečna letna temperatura zraka (1981–2010)	9.5–14,6 °C	9.5–10.5 °C	1
			10.5–11.5 °C	2
			11.5–12.5 °C	3
			12.5–13.5 °C	4
			> 13.5 °C	5
	Letna količina padavin (2011–2040)	1423,8–2520,3 mm	0–1500 mm	5
			1500–1700 mm	4
			1700–1900 mm	3
			1900–2100 mm	2

Topografske			> 2100 mm	1
	Povprečna letna temperatura zraka (2011–2040)	11,1–16,2°C	9.5–10.5 °C	1
			10.5–11.5 °C	2
			11.5–12.5 °C	3
			12.5–13.5 °C	4
			> 13.5 °C	5
	Ekspozicija	0–360°	337.5 – 67.5°	1
			67.5 – 112.5°, 292.5 – 337.5°	2
			112.5 – 157.5°	3
			247.5 – 292.5°	4
			157.5 – 247.5°	5
	Nadmorska višina	0–740,30 m	0–150 m	5
			150–300 m	4
			300–450 m	3
			450–600 m	2
			> 600 m	1
	Naklon	0–83,17°	<5%	1
			5 - 15%	2
			15 - 25%	3
			25 – 35%	4
			>35%	5
	Topografski pozicijski indeks (TPI)	-339,54–48,54	1: < -1 = dolina/depresija	1
			2: -1– -0.5 = ravnina/spodnje pobočje	2
			3: -0.5–0.5 = srednje pobočje	3
			4: 0.5–1 = zgornje pobočje	4
			5: > 1 = greben	5
	Indeks topografske vlažnosti (TWI)	-2,39–25,48	< 5	5
			5–6.5	4
			6.5–8.5	3
			8.5–12	2
			> 12	1

	Točke vžiga gozdnih požarov	/	/	/

V AHP se utež vsakega merila izračuna na podlagi parne primerjalne matrike, kjer se vsako merilo primerja med seboj z dodelitvijo relativne vrednosti pomembnosti od 1 (enako pomembno) do 9 (veliko pomembnejše), kot je prikazano v preglednici 7. Vmesne vrednosti 2, 4, 6 in 8 se uporabljajo za označevanje vmesnih situacij. Nasprotno se za opis relativno nižjega pomembnostnega gradienta uporablja ista lestvica z obratnimi vrednostmi (od 1 do 1/9).

Preglednica 7: Vrednosti relativne pomembnosti za parno primerjavo spremenljivk v AHP.

Pomembnost	**Definicija**
1	*Enak pomen*
3	*Zmeren pomen*
5	*Velik pomen*
7	*Zelo velik pomen*
9	*Absolutna pomembnost*

Parna primerjava za AHP je bila izvedena v dveh korakih, najprej je bila izvedena primerjava

spremenljivk znotraj vsake kategorije posebej, nato pa še skupna parna primerjava med štirimi kategorijami (slika 2).

Slika 2 Skupine značilnosti (antropogene, okoljske/klimatske, topografske) za MCDA/AHP.

Kot rezultat so bile izdelane štiri matrike za parno primerjavo:
- Parna primerjava antropogenih spremenljivk
- Parna primerjava topografskih spremenljivk
- Parna primerjava podnebnih spremenljivk
- Parna primerjava makrodejavnikov.

Teža vsake posamezne spremenljivke v končni enačbi je zmnožek uteži, dobljene v njeni podmatrici, in uteži njene kategorije. Edina izjema je bila spremenljivka pokrovnost/raba tal, ki je samostojna v kategoriji okoljskih spremenljivk. Določitev vrednosti relativne pomembnosti v matrikah parnih primerjav je temeljila na pregledu literature in/ali dogovoru med raziskovalci, ki so sodelovali v tej analizi. Skladnost med vsemi ocenami je bila merjena tudi z indeksom skladnosti, ki se šteje za sprejemljivega, če je manjši od 0,01 (Saaty, 2002), da se oceni, ali so dodeljene vrednosti skladne.

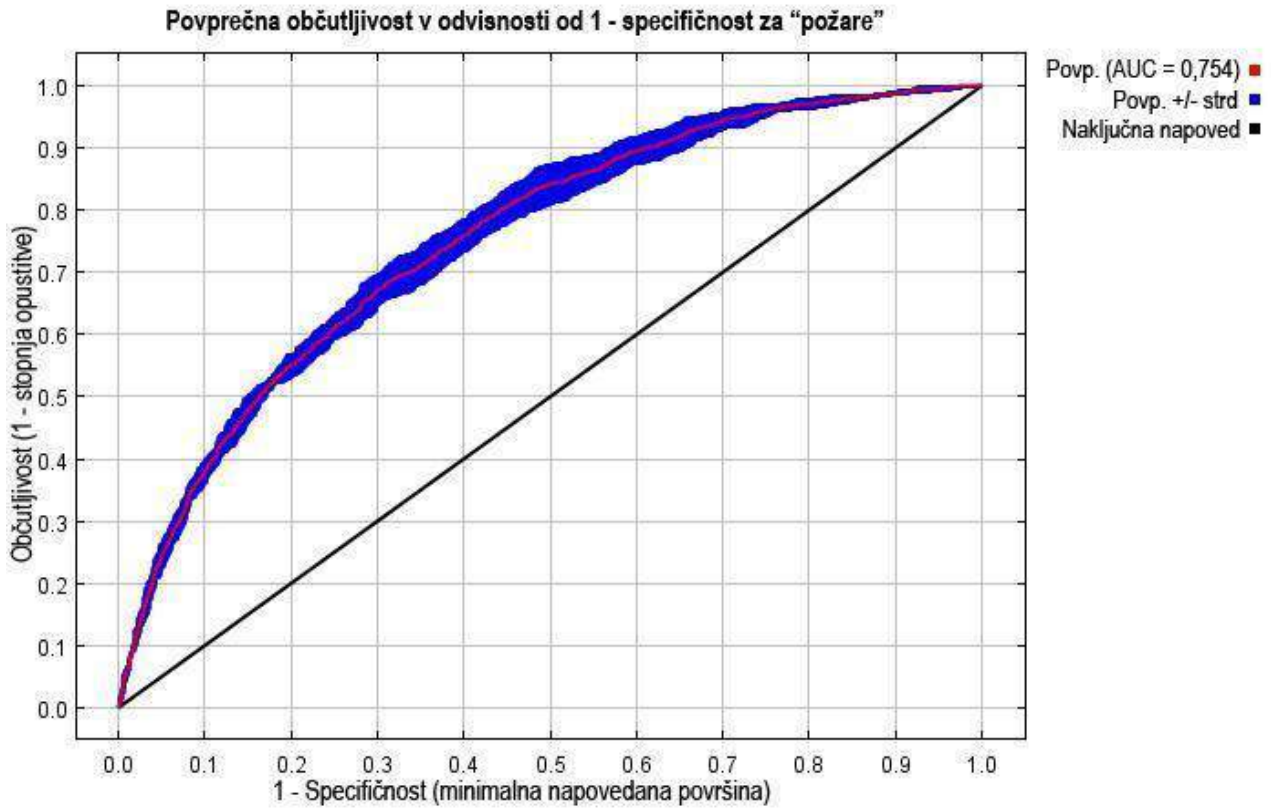
Po izračunu uteži in preverjanju skladnosti, so bile z uporabo GIS orodij vse spremenljivke prostorsko združene z zgoraj navedeno enačbo, s čimer je bil ustvarjen rastrski zemljevid ranljivosti z razponom vrednostmi med 0 in 5. Raster je bil nato razvrščen v 5 končnih razredov ranljivosti:

- 0-1 = nizka ranljivost
- 1-2 = zmerna ranljivost
- 2-3 = visoka ranljivost
- 3-4 = znatno visoka ranljivost
- 4-5 = izjemno visoka ranljivost

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

4.1 Analiza verjetnosti požarne nevarnosti

Uspešnost celotnega modela smo vrednotili na podlagi vrednosti AUC (območje pod krivuljo ROC, ang. *area under the receiver operating characteristic curve - ROC curve*). Povprečna vrednost AUC petih iteracij modela je bila 0,754 s standardnim odklonom ± 0,014 (slika 3). Glede na to, da je vrednost AUC presegla 0,75, lahko rezultate modeliranja napovedi požarov štejemo za statistično uspešne (Phillips & Dudík, 2008). Vrednosti AUC petih iteracij modela so predstavljene v preglednici 8.



Slika 3 Krivulja ROC s povprečno vrednostjo AUC petih modelov. Rdeča črta prikazuje povprečno vrednost AUC petih iteracij modela za učne podatke, modra črta pa povprečne vrednosti ± standardni odklon testnih podatkov. Črna črta predstavlja uspešnost naključne napovedi.

Preglednica 8: Vrednosti AUC za učne in testne podatke za pet iteracij modela.

Model	1	2	3	4	5
Učni podatki	0,762	0,768	0,764	0,761	0,766
Testni podatki	0,766	0,735	0,760	0,768	0,740

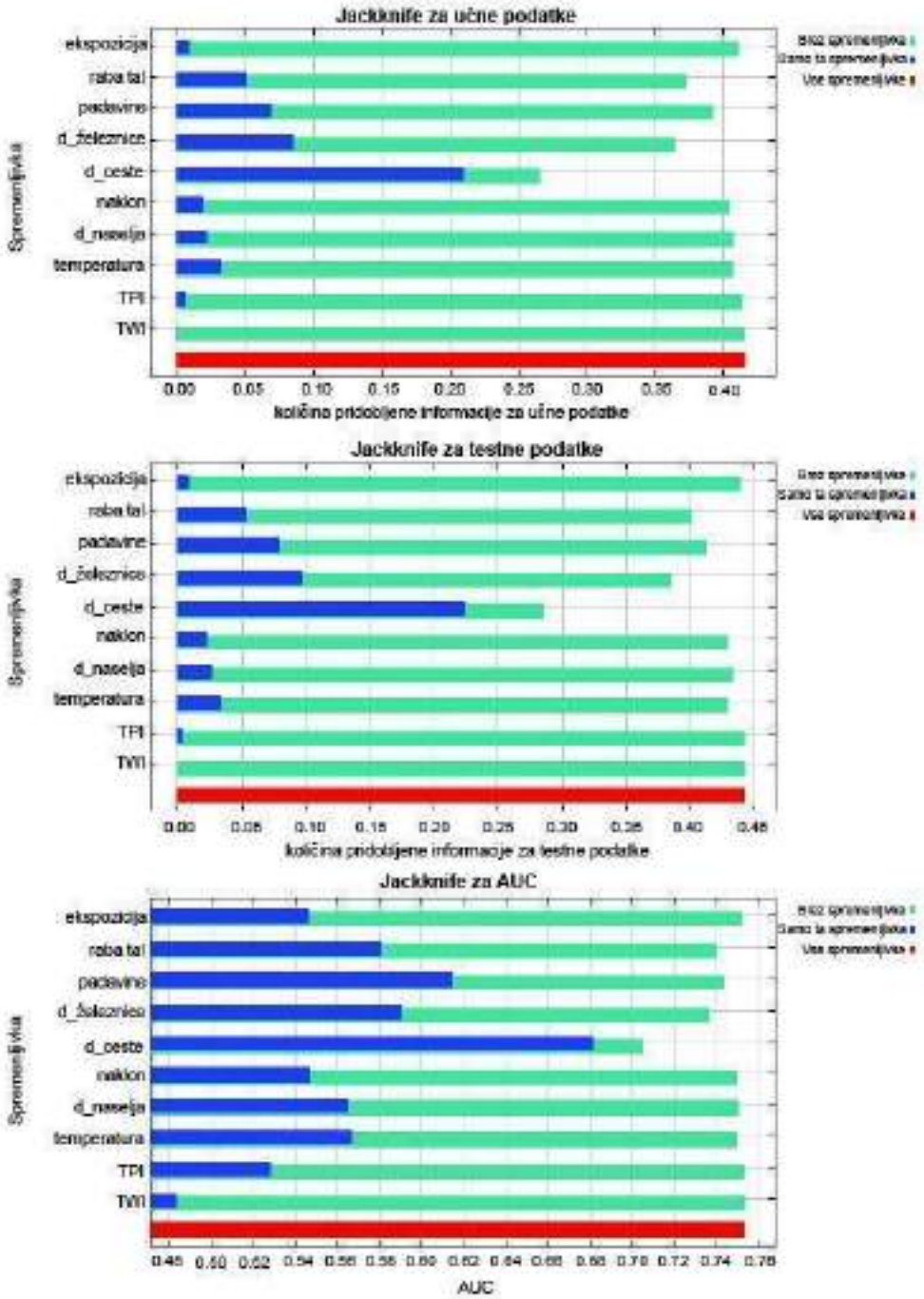
Za oceno vpliva vsake spremenljivke na model so bili upoštevani naslednji kazalniki: prispevek vsake spremenljivke (%) h končni napovedi modela, pomembnost spremenljivk glede na test »Jackknife« in možnost izdelave odzivnih krivulj. Največji prispevek je bil pripisan spremenljivkam iz skupine antropogenih in okoljskih spremenljivk, tj. oddaljenosti od cest (50,6 %), rabi tal (16,3 %) in oddaljenosti od železnic (16,1 %) (preglednica 8). Topografske značilnosti (ekspozicija, TPI in TWI) so imele najmanjši prispevek k modelu (preglednica 9).

Preglednica 9: Prispevek in pomembnost spremenljivk k požarni nevarnosti pri Maxent modeliranju.

Spremenljivka	Prispevek (%)	Pomembnost permutacije (%)
Oddaljenost od cest	**50,6**	**44,9**
Raba tal	**16,3**	**16,2**
Oddaljenost od železnic	**16,1**	**12,7**
Padavine	7,0	11,6
Temperatura	2,8	4,5
Naklon	2,8	3,5
Oddaljenosti od naselij	2,7	4,0
Ekspozicija	0,9	1,8
TPI	0,7	0,6
TWI	0,1	0,2

Rezultati testa Jackknife prikazujejo pomembnost spremenljivk za model (slika 4). Pri testu »Jackknife« za učenje, testiranje in AUC je spremenljivka z največjo vrednostjo informacijskega prispevka (ang. *gain*), če se uporablja samostojno, razdalja do cest. Torej se kaže, da ima ta spremenljivka sama po sebi najbolj uporabne informacije. Podobno je bilo napovedovanje modela najmanj uspešno ob odsotnosti iste spremenljivke, kar pomeni, da ta spremenljivka vsebuje informacije, ki jih druge nimajo. Rdeča črta označuje uspešnost modela ob upoštevanju vseh spremenljivk. Če primerjamo grafa za učne in testne podatke,

vidimo, da je splošna uspešnost testnih podatkov nekoliko višja. Pomembnost posameznih spremenljivk v obeh grafih je zelo podobna (slika 4).



Slika 4 Rezultati testa »Jackknife« za spremenljivke pri učenju, testiranju in AUC.

MaxEnt za vsako spremenljivko, uporabljeno pri modeliranju, izdela odzivne krivulje v obliki grafa. Na krivuljah prikaže kako se napovedana verjetnost prisotnosti spreminja s spreminjanjem vsake spremenljivke, pri čemer vse druge spremenljivke ostanejo na povprečni vrednosti vzorca. (Phillips, 2017). Na podlagi odzivnih krivulj, predstavljenih na sliki 5, lahko vidimo, da je predvidena verjetnost požarne nevarnosti največja na ekspozicijah z vrednostmi 150–250^0. To pomeni, da je največja verjetnost požarne nevarnosti na območjih usmerjenih proti jugu in jugozahodu, medtem ko je verjetnost požarne nevarnosti najmanjša na območjih usmerjenih proti severu (okoli 0 oziroma 360^0).

Požarna nevarnost je največja (> 60 %) v kategorijah rabe tal 3, 5 in 6, ki predstavljajo polnaravna in zaraščena območja, iglaste gozdove in druga naravna območja. Požarna nevarnost je po drugi strani najmanjša (< 30 %) v kategoriji rabe tal 1 (umetne površine).

Odzivna krivulja kaže, da je verjetnost požarne nevarnosti največja pri nizkih količinah padavin, z naraščanjem padavin se zmanjšuje, nato pa se ponovno poveča pri zelo visokih količinah padavin (2200 mm). Zadnje povečanje je lahko posledica topografskih vplivov na pojavljanje požarne nevarnosti (npr. veliko število požarov v preteklosti na višjih legah, ki prejmejo več padavin).

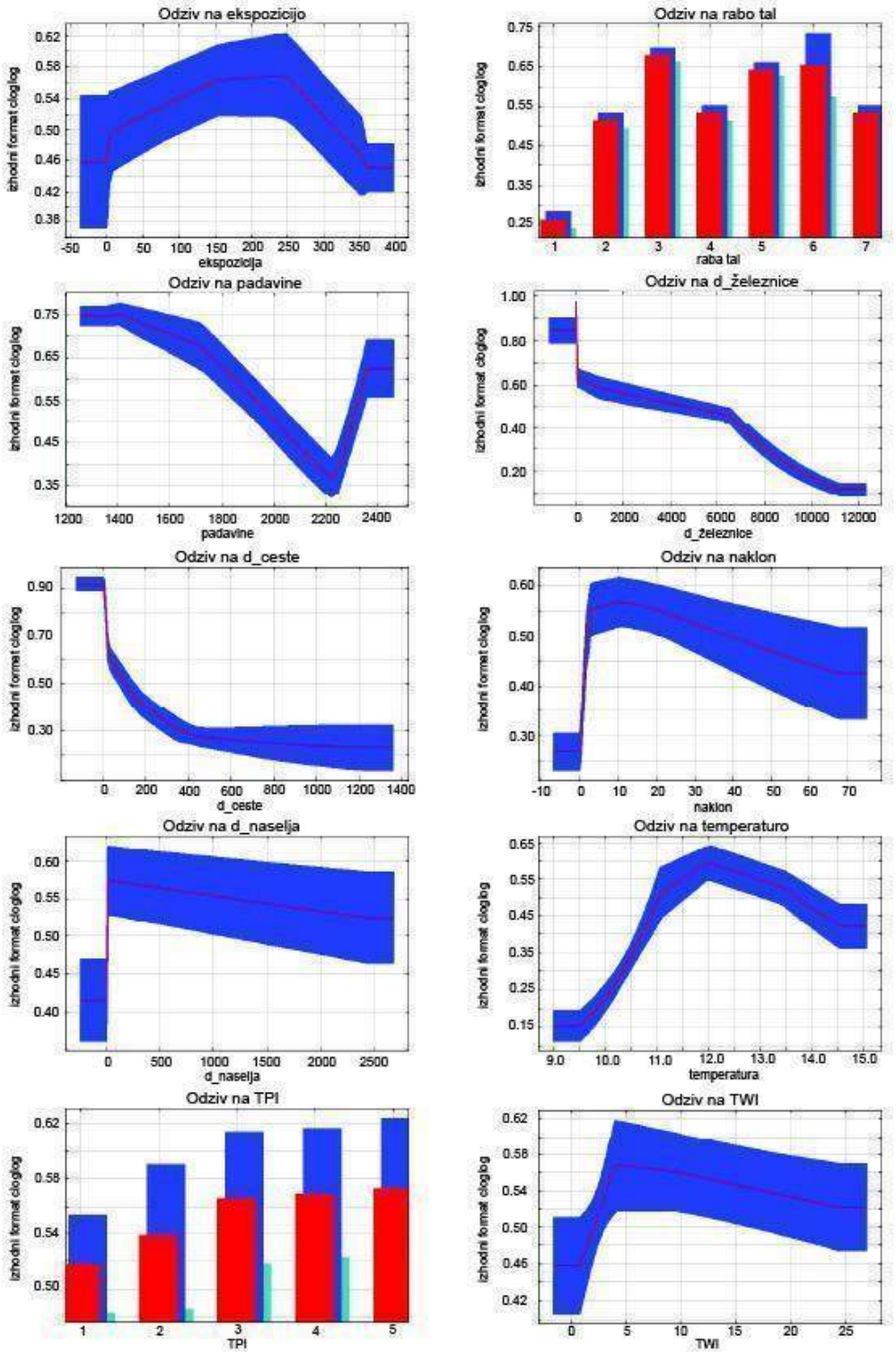
MaxEnt kaže na močno negativno korelacijo med oddaljenostjo od železnic in cest ter verjetnostjo požarne nevarnosti, kar pomeni, da bližina prometne infrastrukture močno vpliva na požarno nevarnost. Podobno se napovedana verjetnost zmanjšuje z oddaljenostjo od naselij.

Krivulja odziva kaže, da je verjetnost požarne nevarnosti najmanjša na ravnem terenu, hitro narašča na blagih pobočjih (0–10°), nato pa se postopoma zmanjšuje na strmejših pobočjih. To kaže, da je požarna nevarnost bolj verjetna na območjih z zmernimi nakloni.

Verjetnost požarne nevarnosti narašča s temperaturo, najvišjo vrednost doseže pri 11,5–12 °C, nato pa se pri višjih temperaturah postopoma zmanjšuje. Zmerne temperature so torej najbolj ugodne za nastanek požara. To je morda zaradi optimalnih pogojev pri katerih prihaja do izsuševanja vegetacije, medtem ko so nižje in višje temperature zaradi zadrževanja oz. pomanjkanja vlage morda manj ugodne za nastanek požara.

Odzivna krivulja za TWI je podobna krivulji za temperature in kaže, da se verjetnost požarne nevarnosti poveča pri zmerni vlažnosti, doseže vrh pri vmesnih vrednostih in nato upade, ko se vlažnost še poveča. Ta vzorec verjetno odraža ravnovesje med razpoložljivostjo goriva in vlage: na zmerno vlažnih območjih je lahko več vegetacije, kar zagotavlja dovolj goriva za požare, medtem ko na zelo suhih območjih primanjkuje biomase, na zelo mokrih območjih pa se zadržuje preveč vlage, da bi se požar lahko širil.

Verjetnost požarne nevarnosti se povečuje z višjimi vrednostmi TPI, kar pomeni, da je večja verjetnost nastanka požara na dvignjenem terenu, kot so grebeni in zgornja pobočja. Ta vzorec je verjetno posledica večje izpostavljenosti vetru, boljše drenaže, ki zmanjšuje zadrževanje vlage, in večjega sončnega sevanja, ki ustvarja bolj suhe razmere, medtem ko nižje vrednosti TPI (ravna/nižja pobočja in doline/depresije) zadržujejo več vlage, zato so manj dovzetne za požare.

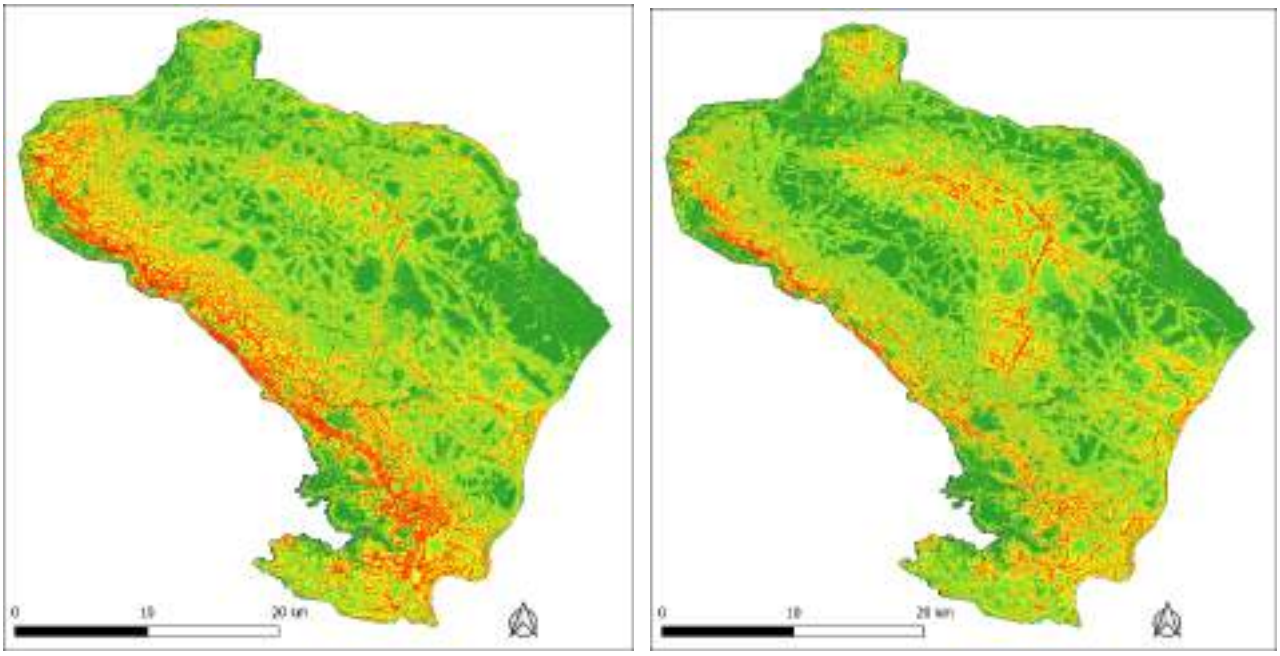


Slika 5 Odzivne krivulje, ki prikazujejo, kako posamezna spremenljivka vpliva na napoved Maxenta. Krivulje prikazujejo povprečni odziv petih ponovljenih modelov (rdeča barva) in ± standardni odklon (modra barva; dva odtenka za kategorične spremenljivke).

Končni sloji trenutne in prihodnje požarne nevarnosti so bili klasificirani v pet stopenj požarne ogroženosti (tj. nizka, zmerna, visoka, znatno visoka in izjemno visoka) na podlagi opredeljenega intervala z velikostjo intervala 0,20 (slika 6). Pet razredov z različnimi stopnjami klasificirane požarne nevarnosti je obsegalo 22,71 %, 38,20 %, 23,00 %, 10,30 % in 5,78 % preučevanega območja (preglednica 10). Največji delež preučevanega območja pokrivajo območja, ki so razvrščena kot območja z zmerno požarno nevarnostjo, in sicer 38,20 % celotnega območja. Sledila so jim območja z visoko (23,00 %) in nizko (22,71 %) požarno ogroženostjo. Območja z znatno visoko in izjemno visoko požarno nevarnostjo so obsegala 10,30 % oz. 5,78 % (preglednica 10). Očitno je, da območja, ki so uvrščena med območja z znatno visoko in izjemno visoko požarno nevarnostjo, predstavljajo razmeroma majhen delež (16,08 %) preučevanega območja.

V scenariju prihodnje požarne nevarnosti je pet stopenj predstavljalo 26,83 %, 40,16 %, 21,25 %, 8,24 % in 3,51 % preučevanega območja (preglednica 10). Podobno kot pri trenutni požarni nevarnosti je največji delež preučevanega območja ostal v kategoriji zmerne požarne nevarnosti, ki je zajemala 40,16 % celotnega območja. Površina kategorije nizka požarna nevarnost se je povečala za 4,12 % na 26,83 %, medtem ko se je kategorija visoka požarna nevarnost nekoliko zmanjšala (na 21,25 %). Delež površin, ki so razvrščene v kategorijo znatno visoke in izjemno visoke požarne nevarnosti, se je zmanjšal za 2,06 % in 2,27 % na 8,24 % oziroma 3,51 % (preglednica 10). To kaže na premik k nižji požarni nevarnosti v prihodnosti, pri čemer bo manj površin z znatno visoko ali izjemno visoko požarno nevarnostjo.

Pri pregledu vzorcev prostorske porazdelitve je razvidna precejšnja geografska raznolikost požarne nevarnosti na preučevanem območju. Območja z visoko, znatno visoko in izjemno visoko požarno nevarnostjo so večinoma razporejena ob obali in okoli večjih naselij, kjer je gostota cest in železnic največja. Projekcije kažejo, da se bo požarna nevarnost na obalnih območjih zmanjšala, medtem ko se bo na v notranjosti skladno s prihodnjimi podnebnimi scenariji povečala (slika 6).



Slika 6 Trenutna (levo) in prihodnja (desno) požarna nevarnost na podlagi MaxEnta.

Preglednica 10: Površina (km^2) in delež (%) razredov požarne nevarnosti za trenutno in prihodnjo požarno nevarnost ter razlika na podlagi modeliranja z MaxEntom.

	Trenutna požarna ogroženost		Prihodnja požarna ogroženost		Razlika	
	Površina	Delež	Površina	Delež	Površina	Delež
Nizka	228,36	22,71	269,78	26,83	41,42	4,12
Zmerna	384,10	38,20	403,83	40,16	19,73	1,96
Visoka	231,28	23,00	213,67	21,25	-17,61	-1,75
Znatno visoka	103,60	10,30	82,88	8,24	-20,72	-2,06
Izjemno visoka	58,12	5,78	35,30	3,51	22,82	-2,27
Skupaj	1005,46	100	1005,46	100	/	/

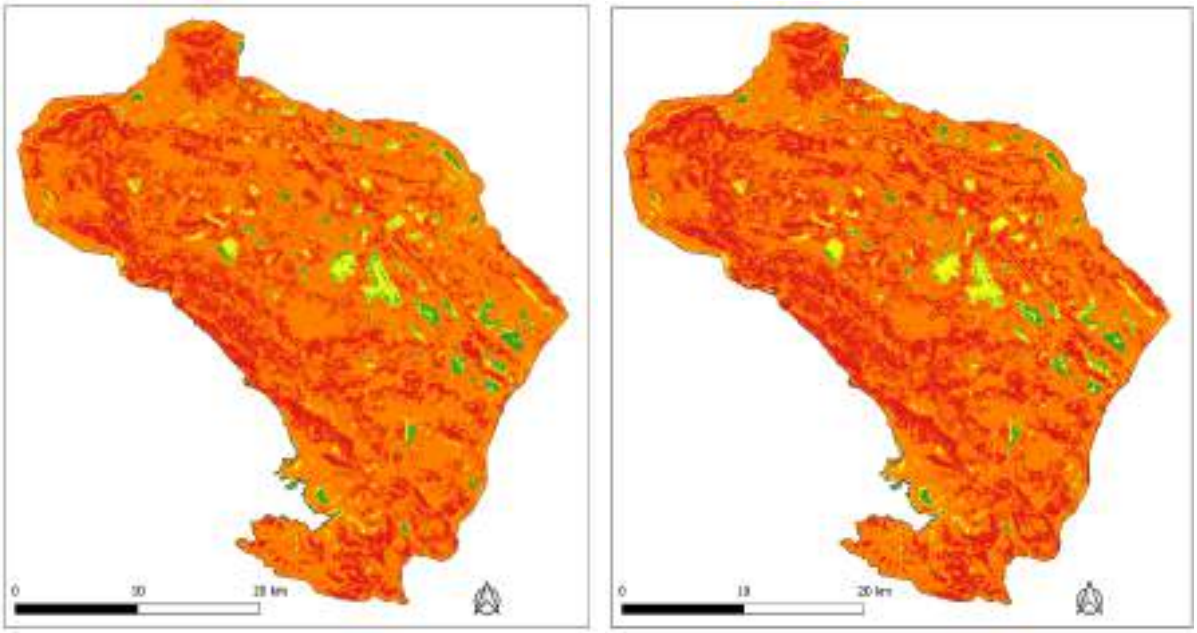
4.2 Analiza požarne ranljivosti

Postopek parne primerjave AHP je bil uspešno izveden, pri čemer so bili indeksi skladnosti precej pod pragom 0,01. Uteži vsake spremenljivke in njihovih kategorij, ki izhajajo iz AHP, so prikazane v preglednici 11. Najpomembnejša skupina makrodejavnikov so antropogeni dejavniki, kar na splošno dokazuje tudi literatura (Djabri et al., 2024; Gigović in Jakovljević, 2018; Sivrikaya in Küçük, 2022), s skupno utežjo 51 %. Med antropogenimi spremenljivkami je najpomembnejša spremenljivka oddaljenost od cest (37 %), sledita ji oddaljenost od naselij (9 %) in železnice (5 %). Na drugem mestu je okoljska spremenljivka, ki jo predstavlja pokrovnost tal z utežjo 31,5 %. Sledijo topografske spremenljivke z 11,6 % in podnebne spremenljivke s 5,8 %.

Preglednica 11: Rezultati primerjave po parih za spremenljivke in njihove kategorije. V zadnjem stolpcu je prikazana končna utež, ki obsega oba koraka hierarhičnega procesa.

	podutež	**makroutež**	**končna utež**
Oddaljenost od cest	0,72	0,511	0,3679
Oddaljenost od železnic	0,1		0,0511
Oddaljenost od naselij	0,18		0,092
Naklon	0,42	0,116	0,0486
Ekspozicija	0,42		0,0493
TWI	0,09		0,0101
TPI	0,07		0,0084
Temperatura	0,75	0,058	0,0432
Padavine	0,25		0,0144
Raba tal	-	0,315	0,31

Končne karte ranljivosti (slika 7) kažejo, da v sedanjih podnebnih razmerah pade večina preučevanega območja v razred zelo velike ranljivosti (67 %), sledijo pa mu območja izjemne ranljivosti (25 %; preglednica 12). S prihodnjimi napovedmi se bodo območja izjemne ranljivosti povečala do 30 % na račun območij zelo visoke ranljivosti (62 %; preglednica 12).



Slika 7 Zemljevid ranljivosti s sedanjimi podnebnimi razmerami (levo) in prihodnjimi napovedmi (desno).

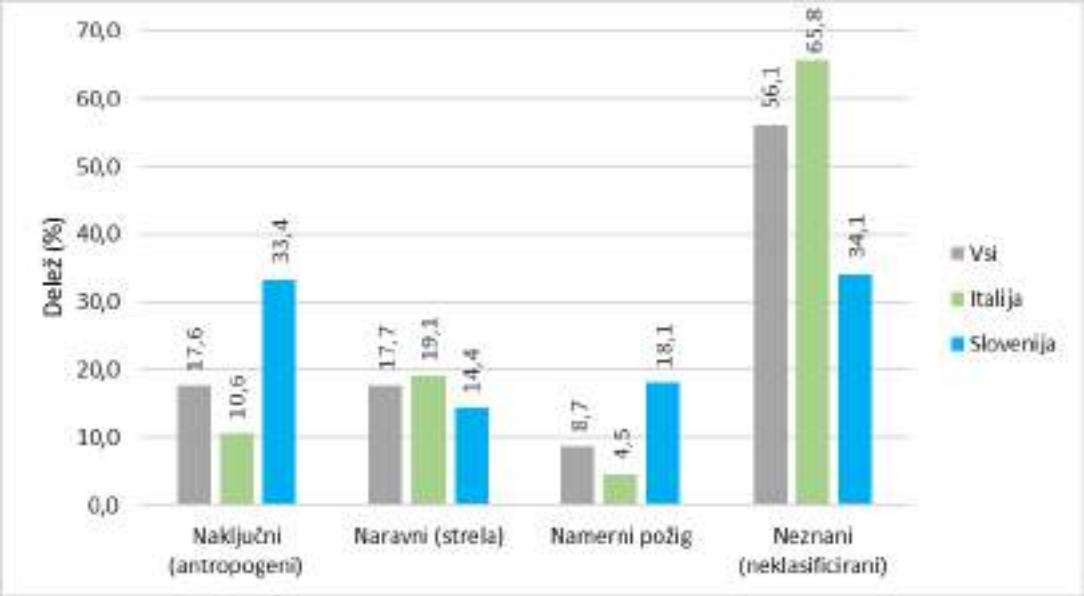
Preglednica 12: Površina (km^2) in delež (%) razredov požarne ranljivosti za trenutno in prihodnjo požarno ranljivost ter razlika.

	Trenutna ranljivost		Prihodnja ranljivost		Razlika	
	Površina	Delež	Površina	Delež	Površina	Delež
Nizka	0,04	0,004	0,02	0,002	-0,02	-0,001
Zmerna	25,1	2,49	21,2	2,11	-3,86	-0,38
Visoka	44,8	4,46	43,3	4,31	-1,52	-0,15
Znatno visoka	679,4	67,58	630,4	62,70	-49,04	-4,87
Izjemno visoka	256,1	25,47	310,4	30,87	54,32	5,40
Skupaj	1005,5	100	1005,5	100	-	-

Kot je razvidno iz analize AHP, so se podnebne spremenljivke v našem scenariju izkazale za najmanj vplivne na ranljivost zaradi gozdnih požarov. Morda zato, ker je ta spremenljivka precej homogena na celotnem preučevanem območju, za katerega so značilne pomembne letne padavine (od 1300 do 2400 mm/leto, preglednica 1). Pomanjkanje podatkov o porazdelitvi padavin med letom in nizka ločljivost podatkov (1 km × 1 km) ne omogočata razlikovanja lokalnih vremenskih vzorcev, ki bi lahko poudarili prisotnost trajnih suhih vremenskih razmer. Poleg tega je zaradi velikega števila spremenljivk težje napovedati količino in porazdelitev padavin po letnih časih, ki so za najbližjo prihodnost večinoma nepomembne (Bertalanič et al., 2018).

4.3 Prostorske ugotovitve o točkih vžiga požarov v naravi in preverjanje točnosti zemljevidov nevarnosti in ranljivost

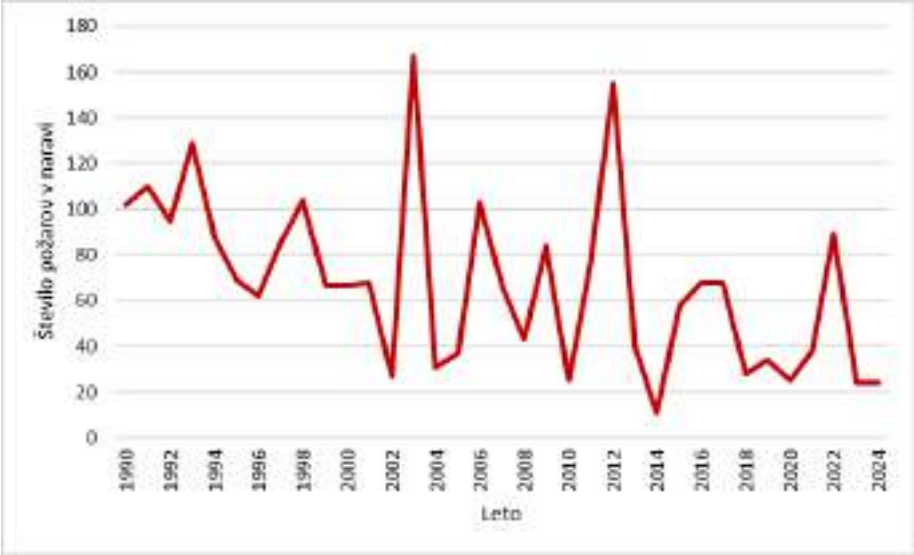
Požari v naravi lahko nastanejo na različne načine, tako zaradi naravnih kot človeških vzrokov. V stolpčnem diagramu (slika 8) je prikazan delež vzrokov požarov na območju Carso/Kras, pri čemer so splošni statistični podatki (siva barva) primerjani s podatki iz Italije (zelena barva) in Slovenije (modra barva). Največjo kategorijo predstavljajo neznani vzroki (neklasificirani), ki predstavljajo več kot polovico vseh primerov, pri čemer je delež v Italiji (65,8 %) večji kot v Sloveniji (34,1 %). Naključni (antropogeni) požari so pogostejši v Sloveniji (33,4 %) kot v Italiji (10,6 %), kar kaže na večji pojav požarov, ki jih povzroči človek, v tem delu regije. Nasprotno pa se naravni (strela) požari v obeh državah pojavljajo podobno pogosto, približno 17-19 %. Namerni požigi so sicer na splošno manj pogosti, vendar so v Sloveniji (18,1 %) v primerjavi z Italijo (4,5 %) izrazito pogostejši. Te razlike poudarjajo regionalne razlike v vzrokih za nastanek požara, na katere lahko vplivajo raba tal, ukrepi za preprečevanje požarov, družbeno-gospodarski dejavniki ter način evidentiranja podatkov o požarih. V Sloveniji so vzroki požarov razdeljeni v devet kategorij (*Evidenca Gozdnih Požarov*, 2024), medtem ko so v Italiji razdeljeni v štiri kategorije (RAFVG, 2024). Za lažjo primerjavo smo uporabili italijansko kategorizacijo vzrokov in v kategorijo »naključni (antropogeni)« združili naslednje kategorije za požare v Sloveniji: drugo (vojska, ipd.), gozdarska opravila, industrijska dejavnost, kmetijska opravila, komunikacije (vlaki, el. Vodi, ipd.) in obiskovalci gozda (turisti, otroci, ipd.).



Slika 8 Delež vzrokov požarov v naravi na preučevanem območju; primerjava splošnih statističnih podatkov (siva) s podatki iz Italije (zelena) in Slovenije (modra).

Graf časovnih nizov (slika 9) prikazuje število požarov v naravi na preučevanem območju od leta 1990 do leta 2024. Podatki kažejo na precejšnjo medletno spremenljivost, z izrazitimi viški števila požarov v naravi okoli let 1993, 1998, 2003, 2006 in 2013, ko je število incidentov preseglo 100. Ti viški večinoma ustrezajo ekstremnim vremenskim razmeram (tj. sušam in vročinskim valovom), ki so se v istih obdobjih pojavile na preučevanem območju (Sušnik et al., 2023).

Po letu 2014 je opazen splošen trend upadanja števila požarov v naravi, čeprav še vedno prihaja do nihanj. Majhno število dogodkov v zadnjih letih bi lahko pripisali boljšemu upravljanju požarov, strategijam preprečevanja ali podnebnim spremembam, ki zmanjšujejo požarno ugodne razmere. Vendar pa povečanje leta 2022 kaže, da tveganje za požare v naravi ostaja ciklično ter odvisno od okoljskih in antropogenih dejavnikov. Razumevanje teh nihanj je bistvenega pomena za prihodnje zmanjševanje tveganja požarov v naravi v regiji.

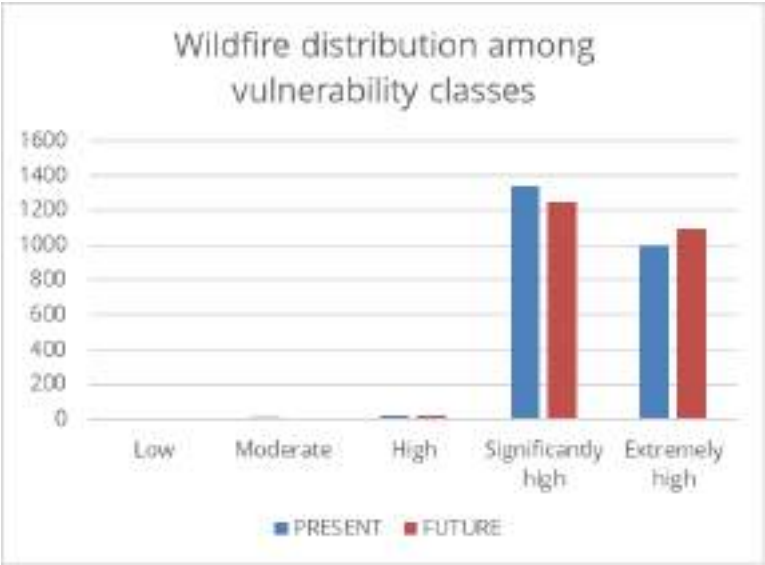


Slika 9 Število požarov v naravi na leto na preučevanem območju.

Analiza požarov v naravi (n = 2367) v povezavi z infrastrukturo in rabo zemljišč zagotavlja pomemben vpogled v vzorce pojavljanja požarov na preučevanem območju. Bližina infrastrukture ima pomembno vlogo pri nastanku požarov, pri čemer so najbolj kritični dejavnik ceste, gozdne ceste in pohodniške poti. V njihovi neposredni bližini (50-metrski pas) je nastalo 67,4 % (n = 1595) požarov. V povprečju je do požarov prišlo 52,52 m od cest. To kaže na tesno povezavo med požari in prometnim omrežjem. Ceste so lahko vir vžiga zaradi človekove dejavnosti (npr. odvržene cigaretni ogorki, iskre iz vozil). Poleg tega je 14,1 % požarov (n = 334) nastalo v 50-metrskem pasu od železnic, kar kaže na to, da imajo železnice, čeprav manjši vpliv kot ceste, še vedno pomembno vlogo pri nastanku požarov, najverjetneje zaradi iskrenja, ki ga povzročajo vlaki. Povprečna razdalja od železnic je bila veliko večja, 1 598,5 m, kar je posledica manj goste železniške mreže na preučevanem območju. Bližina naselij prav tako prispeva k nastanku požarov, saj je 16,2 % (n = 383) požarov nastalo v njihovem 50-metrskem pasu. Povprečna razdalja od naselij je bila 403,3 m.

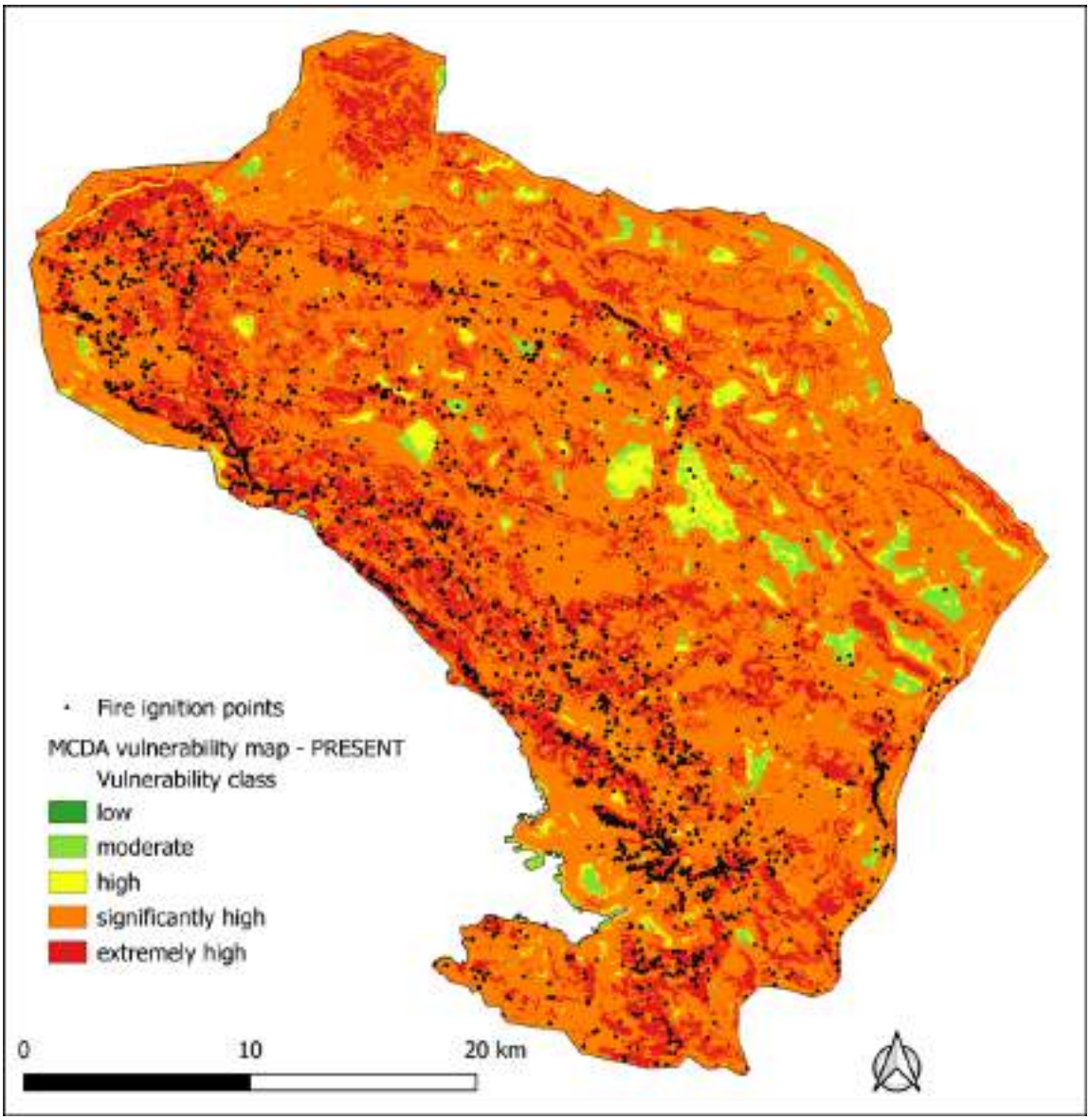
Požari so prevladovali v kategorijah rabe tal polnaravna in zaraščena območja (39,8 %) in listnati gozdovi (36,9 %). Sledile so jim kmetijske površine (9,4 %) in iglasti gozdovi (8,9 %). Na umetnih površinah (4,4 %) in drugih naravnih površinah (0,6 %) je bilo število požarov manjše, kar kaže na to, da so bili požari manj pogosti na urbaniziranih ali nevegetacijskih območjih. Na vodnih telesih (0,0 %) ni bilo požarov. Ocenili smo tudi natančnost verjetnosti požarne nevarnosti, tako da smo primerjali požare s kategorijami požarne nevarnosti. 41,3 % požarov je v kategoriji "izjemno visoka" požarna nevarnost, sledita ji kategoriji znatno visoka (21,7 %) in visoka (21,3 %). To potrjuje, da se zabeleženi pojavi požarov v naravi ujemajo z območji z največjo nevarnostjo, ki jih predvideva model.

Da bi potrdili MCDA, smo pridobljeno karto ranljivosti primerjali s točkami vžigov (slika 10). 41,3 % točk vžiga preteklih požarov pade v območja opredeljena z izjemno visoko ranljivostjo, sledijo območja znatno visoko (21,7 %) in visoko ranljivostjo (21,3 %), kar kaže, da je metoda MCDA pravilno določila območja, ki so bolj izpostavljena požarom v naravi. V sedanjih podnebnih razmerah se na območjih z znatno in izjemno visoko ranljivostjo nahaja 98,6 % preteklih požarov, v predvidenih prihodnjih podnebnih razmerah pa se ta delež poveča na 98,9 % (slika 10).



Slika 10 Razporeditev požarov v naravi med razredi ranljivosti za trenutno in prihodnje stanje.

Zemljevid ranljivosti smo primerjali s preteklimi požari (slika 11). Primerjava kaže, da se je 42 % preteklih lokacij vžiga nahajalo na območjih, ki so bila opredeljena kot izjemno ranljiva, 56 % pa na območjih, ki so bila opredeljena kot znatno ranljiva. Ta ugotovitev kaže, da je analiza ranljivosti natančno opredelila območja, ki so bolj izpostavljena požarom v naravi.



Slika 11 Zemljevid sedanje požarne ranljivosti v primerjavi s točkami vžiga preteklih požarov.

4.4 Poudarki in ugotovitve iz analiz nevarnosti in ranljivosti zaradi požarov v naravi

Zemljevidi verjetnosti nevarnosti in ranljivosti zaradi požarov v naravi se močno razlikujejo. Analiza ranljivosti je opredelila, da 93 % preučevanega območja spada v razreda znatno visoke in izjemno visoke ranljivosti. Medtem ko ta dva razreda predstavljata le 16 % celotnega preučevanega območja na karti verjetnosti nevarnosti. To je verjetno posledica porazdelitve preteklih požarov v naravi, uporabljenih za analizo MaxEnt, ki so zgoščeni v vidnih gručah. Posledično je bil nabor podatkov o preteklih požarih prečiščen z namenom zmanjšanja pristranskosti modela (z 2367 na 1206 lokacij). Zato se zdi, da je analiza MaxEnt primernejša za kartiranje nevarnosti, pri čemer se ugotavlja verjetnost pojava požarov v naravi. Po drugi strani pa MCDA enakomerno porazdeli območja velikega tveganja po celotnem preučevanem območju, pri čemer ugotavlja statično ranljivost območja za požare v naravi in nakazuje možna območja širjenja požarov v naravi.

Poleg tega je ena od glavnih razlik med obema metodama v prihodnji projekciji verjetnosti požarne ogroženosti in požarne ranljivosti. V analizi ranljivosti naj bi se območja z izjemno visoko ranljivostjo povečala s 25 % na 30 % celotnega območja, medtem ko je analiza verjetnosti nevarnosti pokazala splošno zmanjšanje verjetnosti požarov v naravi v skladu s prihodnjim podnebnim scenarijem. To je verjetno posledica dejstva, da sta spremenljivki temperatura in padavine po AHP imeli težo 4,32 % in 1,44 %, pri čemer je temperatura trikrat bolj vplivala na končno ranljivost, medtem ko je analiza nevarnosti na podlagi MaxEnta pripisala temperaturi in padavinam prispevek 2,8 % in 7,0 %. Obe spremenljivki naj bi se v prihodnjih projekcijah povečali, vendar imata vsaka nasprotni učinek na ranljivost. Glede na to, katera od teh dveh spremenljivk prevladuje v posameznem pristopu modeliranja, bodo rezultati nasprotujoči.

Ta razlika kaže na to, da sta oba pristopa učinkovita orodja za kartiranje verjetnosti in ranljivosti požarov v naravi, vendar se osredotočata na različne značilnosti. Njuno uporabo za analizo požarov v naravi bi zato lahko kar najbolj povečali z dopolnjevanjem rezultatov in ne s primerjanjem enega z drugim.

Modeliranje Maxent je z odzivnimi krivuljami omogočilo pomemben vpogled, ki je pokazal, da je verjetnost požarne nevarnosti največja na južnih in jugozahodnih pobočjih, na polnaravnih in iglastih gozdnih območjih ter na območjih z zmernimi padavinami in nakloni. Verjetnost požarne nevarnosti je bila tudi močno negativno povezana z oddaljenostjo od cest, železnic in naselij, kar poudarja ključno vlogo infrastrukture pri vžigu požarov v naravi.

5 ZAKLJUČKI

Model požarne nevarnosti se je izkazal za uspešnega s povprečno vrednostjo AUC 0,754 (± 0,014), kar presega prag 0,75 za statistično uspešnost. Model je kot najbolj vplivno napovedno spremenljivko opredelil oddaljenost od cest, sledita raba tal in oddaljenost od železnic, kar poudarja pomembno vlogo antropogenih dejavnikov pri verjetnosti nevarnosti požarov v naravi. Topografske spremenljivke, kot so ekspozicija, TPI in TWI, so k modelu prispevale najmanj. Modeliranje nevarnosti požarov v naravi je omogočilo obdelavo in podrobno analizo podatkov o pojavu, ki so na voljo le v obliki prisotnosti. Poleg tega pa je omogočilo tudi izdelavo odzivnih krivulj za vsako spremenljivko, kar je še posebej pomembno za razumevanje vplivov na nevarnost zaradi požarov v naravi. Primerjava z opazovanimi podatki o preteklih požarih je potrdila usklajenost z območji z največjo nevarnostjo, kar potrjuje zanesljivost modela.

Podobno je analiza ranljivosti omogočila pravilno opredelitev območij z znatno visoko in izjemno visoko ranljivostjo, ki skupaj predstavljajo 98,6 % vseh preteklih požarov v naravi. Najbolj vplivni dejavnik je bila ponovno oddaljenost od cest, sledila pa je pokritost tal.

Prostorska analiza na podlagi MaxEnta je pokazala, da območja z veliko požarno nevarnostjo prevladujejo v obalnem delu in v bližini večjih naselij, kjer je mreža antropogene infrastrukture največja. Velik delež požarov (67,4 %) je izbruhnil v oddaljenosti manj kot 50 metrov od cest, 14,1 % v bližini železnic in 16,2 % v bližini naselij. Požari so bili najpogostejši na polnaravnih in zaraščenih območjih (39,8 %) ter v listnatih gozdovih (36,9 %), kar poudarja pomen razpoložljivosti goriva.

Kljub temu, da sta bili analizi izvedeni z enakimi vhodnimi spremenljivkami, sta se znatno razlikovali v razporeditvi območij visokih vrednostnih razredov:

- Analiza ranljivosti je 93 % obravnavanega območja opredelila kot območja z znatno in izredno visoko ranljivostjo.

- Nasprotno pa ta dva razredi na zemljevidu verjetnosti nevarnosti predstavljata le 16 % celotnega obravnavanega območja.

Analiza nevarnosti se bolj osredotoča na verjetnost nastanka požara v naravi, ki je povezana s točkami pojavljanja požarov v preteklosti, medtem ko analiza ranljivosti enakomerno razporeja razrede visokega tveganja po celotni regiji na podlagi statičnih spremenljivk, ki vplivajo na požarno ranljivost.

Poleg tega pa naj bi se v skladu s klimatskimi projekcijami za obdobje 2011-2040:

- Območja z izredno visoko ranljivostjo povečala za 5 % celotne površine,

- medtem ko je modeliranje verjetnosti nevarnosti napovedalo, da se bo splošna nevarnost požarov zmanjšala.

To je verjetno posledica različnih uteži, ki jih imajo spremenljivke temperature in padavin. Dejstvo je, da klimatske spremenljivke, uporabljene v tej študiji, upoštevajo letno povprečje temperature in kumulativno letno količino padavin. Ta vidik je šibka točka študije, saj ne omogoča prepoznavanja razlik med letnimi časi.

Na splošno rezultati zagotavljajo trdno podlago za oblikovanje prihodnjih strategij za zmanjševanje tveganja za požare v naravi. Uporaba topografskih spremenljivk, pridobljenih na podlagi LiDAR podatkov, je izboljšala natančnost napovednih dejavnikov, povezanih s terenom, čeprav so antropogeni dejavniki ostali prevladujoči. Obe analizi se dopolnjujeta in ponujata različne poglede na dejavnike, povezane s tveganjem za požare v naravi na preučevanem območju, ter možne vpoglede za učinkovito upravljanje. Nenazadnje je ta študija utrla pot za nadaljnje analize za oceno izpostavljenosti tveganja zaradi požarov v naravi, npr. vključno z okoljsko in družbeno-ekonomsko občutljivimi območji.

6 VIRI

Blitch, W., Sovie, A., & Tobin, B. (2023). Predictive modeling of cave entrance locations: Relationships between surface and subsurface morphology. *International Journal of Speleology*, *52*(2), 101–108. https://doi.org/10.5038/1827-806X.52.2.2455

Brown, J. L. (2014). SDMtoolbox: A python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. *Methods in Ecology and Evolution*, *5*(7), 694–700. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12200

Brun, P., Zimmermann, N. E., Hari, C., Pellissier, L., & Karger, D. N. (2022). *CHELSA-BIOCLIM+ A novel set of global climate-related predictors at kilometre-resolution* (Versione 1.0) [Geotiff,PDF]. EnviDat. https://doi.org/10.16904/ENVIDAT.332

Djabri, A. D., Bouhata, R., Guellouh, S., & Bensekhria, A. (2024). Wildfire Vulnerability Assessment and Mapping Using Remote Sensing, GIS and Weighted Overlay Method in the Eastern Aures in Khenchela, Algeria. *Geoadria*, *28*(2), 191–210. https://doi.org/10.15291/geoadria.4218

Dupuy, J., Fargeon, H., Martin-StPaul, N., Pimont, F., Ruffault, J., Guijarro, M., Hernando, C., Madrigal, J., & Fernandes, P. (2020). Climate change impact on future wildfire danger and activity in southern Europe: A review. *Annals of Forest Science*, *77*(2), 35. https://doi.org/10.1007/s13595-020-00933-5

Evidenca gozdnih požarov. (2024). [Dataset]. Zavod za gozdove Slovenije. https://prostor.zgs.gov.si/pregledovalnik/

Gigović, & Jakovljević. (2018). GIS Multi-Criteria Analysis for Identifying and Mapping Forest Fire Hazard: Nevesinje, Bosnia and Herzegovina. *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette*, *25*(3). https://doi.org/10.17559/TV-20151230211722

Goleiji, E., Hosseini, S. M., Khorasani, N., & Monavari, S. M. (2017). Forest fire risk assessment-an integrated approach based on multicriteria evaluation. *Environmental Monitoring and Assessment*, *189*(12), 612. https://doi.org/10.1007/s10661-017-6225-7

Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, *4*(1), 170122. https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122

Kim, S. J., Lim, C.-H., Kim, G. S., Lee, J., Geiger, T., Rahmati, O., Son, Y., & Lee, W.-K. (2019). Multi-Temporal Analysis of Forest Fire Probability Using Socio-Economic and Environmental Variables. *Remote Sensing*, *11*(1), 86. https://doi.org/10.3390/rs11010086

Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, *20*(7), 703–726. https://doi.org/10.1080/13658810600661508

Maniatis, Y., Doganis, A., & Chatzigeorgiadis, M. (2022). Fire Risk Probability Mapping Using Machine Learning Tools and Multi-Criteria Decision Analysis in the GIS Environment: A Case Study in the National Park Forest Dadia-Lefkimi-Soufli, Greece. *Applied Sciences*, *12*(6), 2938. https://doi.org/10.3390/app12062938

Merow, C., Smith, M. J., & Silander, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, *36*(10), 1058–1069. https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x

Mishra, B., Panthi, S., Poudel, S., & Ghimire, B. R. (2023). Forest fire pattern and vulnerability mapping using deep learning in Nepal. *Fire Ecology*, *19*(1), 3. https://doi.org/10.1186/s42408-022-00162-3

Paudel, G., Pandey, K., Lamsal, P., Bhattarai, A., Bhattarai, A., & Tripathi, S. (2024). Geospatial forest fire risk assessment and zoning by integrating MaxEnt in Gorkha District, Nepal. *Heliyon*, *10*(11), e31305. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31305

Phillips, S. J. (2017). *A Brief Tutorial on Maxent* (p. 39). http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/

Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, *190*(3–4), 231–259. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026

Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, *31*(2), 161–175. https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x

Phillips, S. J., Dudík, M., Elith, J., Graham, C. H., Lehmann, A., Leathwick, J., & Ferrier, S. (2009). Sample selection bias and presence-only distribution models: Implications for background and pseudo-absence data. *Ecological Applications*, *19*(1), 181–197. https://doi.org/10.1890/07-2153.1

RAFVG - DC production, trade, cooperation, agricultural and forest resources – Regional Forestry Corps Service. (2024). *Fire beginning point* [Dataset].

Saaty, T. l. (2002). *DECISION MAKING WITH THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS*. *9*(3), 215–229.

Sivrikaya, F., & Küçük, Ö. (2022). Modeling forest fire risk based on GIS-based analytical hierarchy process and statistical analysis in Mediterranean region. *Ecological Informatics*, *68*, 101537. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101537

Sušnik, A., Vlahović, Ž., Moderc, A., & Habič, B. (2023). *Prilagajanje podnebnim spremembam. [PP14] Kmetijske suše*. Agencija RS za okolje. https://kazalci.arso.gov.si/sl/content/kmetijske-suse-0

Vilar, L., Gómez, I., Martínez-Vega, J., Echavarría, P., Riaño, D., & Martín, M. P. (2016). Multitemporal Modelling of Socio-Economic Wildfire Drivers in Central Spain between the 1980s and the 2000s: Comparing Generalized Linear Models to Machine Learning Algorithms. *PLOS ONE*, *11*(8), e0161344. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161344

Yang, X., Jin, X., & Zhou, Y. (2021). Wildfire Risk Assessment and Zoning by Integrating Maxent and GIS in Hunan Province, China. *Forests*, *12*(10), 1299. https://doi.org/10.3390/f12101299

Interreg Italia-Slovenija
Karst Firewall 5.0

Cofinanziato dall'Unione europea
Sofinancira Evropska unija

COLOPHON / KOLOFON

Editore / Založnik:
Servizio/agenzia di traduzione / Prevajalska služba/agencija:
Redazione / Uredništvo:
Crediti fotografici / Avtorstvo fotografij:
Stampa / Tisk:
Dati dell'edizione / Podatki o izdaji:
Luogo e data di pubblicazione / kraj in datum izdaje:

La presente pubblicazione è reperibile in formato elettronico all'indirizzo: www... /
To objavo lahko najdete v elektronski obliki na naslovu: www...

Il contenuto della presente pubblicazione non rispecchia necessariamente le posizioni ufficiali dell'Unione europea. La responsabilità del contenuto della presente pubblicazione appartiene all'autore [inserire nome dell'autore] / Vsebina te publikacije ne odraža nujno uradnih stališč Evropske unije. Odgovornost za vsebino te publikacije pripada avtorju [vstaviti avtorjevo ime]

Il progetto Karst Firewall 5.0 è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Projekt Karst Firewall 5.0 sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.
www.ita-slo.eu/karst-firewall-50