

Allegato 11 - Metodologia di analisi del rischio

Nel presente elaborato tecnico viene descritta nel dettaglio l'analisi del rischio condotta che ha portato ai risultati illustrati all'interno della Relazione del presente Piano. Prima di procedere nella descrizione delle analisi si ritiene opportuno riproporre lo schema dell'impianto metodologico per la determinazione del rischio (Figura 1) e delle definizioni sintetiche relative alle sue componenti. Il rischio di incendio boschivo è determinato dalla combinazione del rischio di interfaccia, che rappresenta la minaccia del fenomeno degli incendi boschivi sulle attività antropiche, e il rischio funzionale, che esprime l'impatto potenziale del fuoco sul funzionamento degli elementi territoriali di tipo ecologico e culturale. A loro volta, il rischio di interfaccia e il rischio funzionale sono definiti dalla combinazione di pericolosità e danno potenziale. La pericolosità è definita univocamente e rappresenta la probabilità che un evento di una certa intensità si manifesti in un dato punto del territorio. Il danno è definito in maniera differente per la componente di interfaccia e funzionale, in entrambi i casi tramite la combinazione delle informazioni di esposizione (se presente o non presente un elemento vulnerabile) e vulnerabilità (livello di danno potenziale dell'elemento esposto).

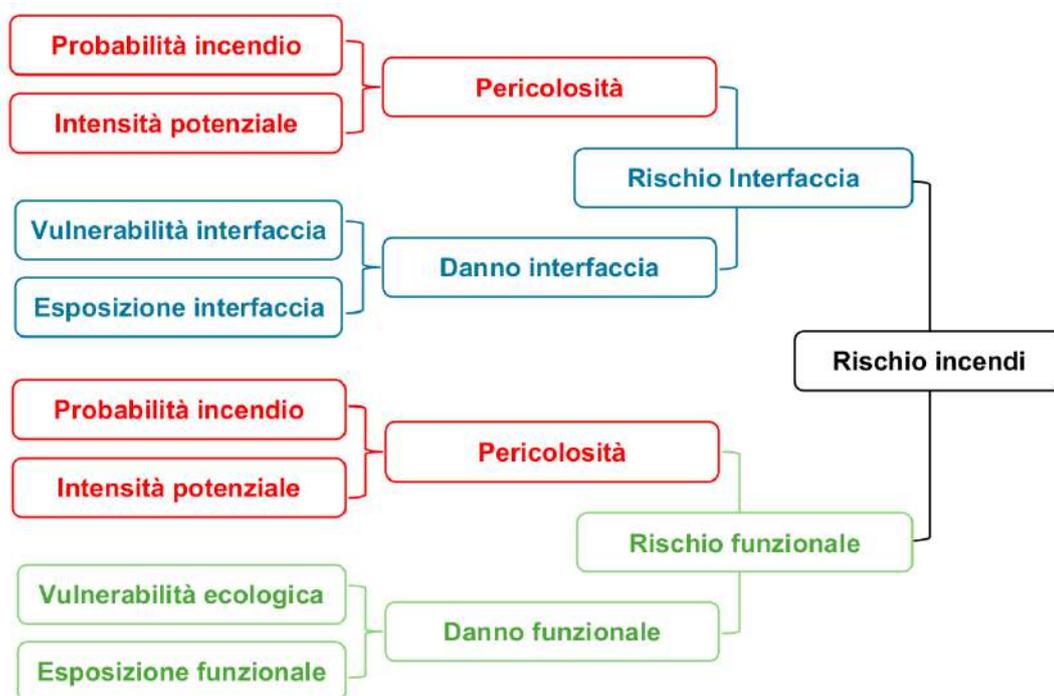


Figura 1 - Schema di impianto metodologico per la definizione del rischio di incendio.

Analisi della pericolosità

1. DEFINIZIONE DI PERICOLOSITÀ

La carta della pericolosità serve a spazializzare per l'intero territorio regionale la probabilità che si verifichi un incendio intenso con il potenziale di causare un impatto sulle zone di interfaccia e sulle funzioni e servizi ecosistemici degli ambienti caratterizzati da presenza di vegetazione (praterie, arbusteti e foreste). Al fine di ottenere una mappatura efficace e comprensibile, la pericolosità viene espressa in 5 classi (Molto bassa, Bassa, Media, Alta, Molto Alta), definite tramite la combinazione di altrettante classi di probabilità di incendio e di intensità potenziale raggiungibile dal fronte di fiamma tramite un'apposita matrice di combinazione (Tabella 1).

Tabella 1 - Matrice di combinazione della classe di pericolosità, come combinazione della probabilità di incendio e della intensità potenziale.

		PROBABILITÀ DI INCENDIO					
		PERICOLOSITÀ	Molto alta	Alta	Media	Bassa	Molto bassa
INTE NSIT À POTE NZIA LE	Molto alta	Molto alta	Molto alta	Alta	Alta	Bassa	Bassa
	Alta	Molto alta	Alta	Alta	Media	Bassa	Bassa
	Media	Alta	Alta	Media	Bassa	Bassa	Bassa
	Bassa	Alta	Media	Media	Bassa	Molto bassa	Molto bassa
	Molto bassa	Media	Media	Bassa	Bassa	Molto bassa	Molto bassa

La valutazione del comportamento del fuoco si realizza attraverso l'utilizzo di appositi modelli di simulazione del comportamento potenziale degli incendi a partire da dati di input che descrivono i fattori determinanti la propagazione del fuoco. Per stimare le due componenti della pericolosità è stato utilizzato il software *FlamMap 6.2*, sviluppato dal Forest Service dell'USDA (*United States Department of Agriculture*) (Finney 2004)¹. Questo software consente di simulare, mappare e analizzare le caratteristiche del comportamento potenziale degli incendi in un ambiente bidimensionale sfruttando il modello semi-empirico sviluppato da Rothermel (1972)² ed un modello di propagazione geometrica in due dimensioni che prende il nome di Minimum Travel Time (MTT). Questa combinazione di modelli ha consentito di simulare il comportamento potenziale degli incendi di superficie - la tipologia di incendio più frequente sul territorio regionale - nonché degli incendi di chioma, eventi di minor frequenza, ma particolarmente significativi nelle formazioni a pino silvestre, ampiamente diffuse nell'ambito regionale. Il modello di propagazione di superficie fornisce i dati di input per un modello empirico di propagazione del fronte di fiamma in chioma (Finney 2004)¹, anch'esso compreso nel sistema di modelli disponibile nell'applicativo *FlamMap*. Pertanto, fornendo

i parametri di input opzionali richiesti, è possibile simulare anche il comportamento degli incendi che interessano la componente di chioma.

L'ambiente di simulazione prevede 5 raster sovrapposti (*landscape file*) che spazializzano gli input di base del modello:

- topografia, descritta tramite le carte delle quote [m s.l.m.], delle pendenze [°] e delle esposizioni[°N];
- grado di copertura delle chiome [%];
- infiammabilità dei combustibili, descritta tramite la carta dei modelli di combustibile [codice Scott & Burgan, 2005³].

A questi strati informativi di base, per simulare l'attività degli incendi di chioma potenziali, sono stati forniti come input 3 raster opzionali, al fine di spazializzare le informazioni relative ai combustibili di chioma in termini di:

- Altezza degli alberi [m] (*Canopy Height Model – CH*);
- Altezza di inserzione di chioma [m] (*Canopy Base Height – CBH*)
- Densità di chioma [kg/m³] (*Canopy Bulk Density - CBD*)

Una volta generato il *landscape file*, sono state analizzate:

- le caratteristiche meteorologiche, descritte dall'umidità dei combustibili [scenari Scott & Burgan, 2005³] e dagli scenari di vento (direzione e velocità);
- la probabilità di innesco, data dalla distribuzione dei punti di innesco sul territorio infiammabile in funzione di diversi criteri.

Infine, si è scelta la tipologia di simulazione in base agli output desiderati tramite apposite finestre di interfaccia (FB – *Fire Behavior Options*, MTT – *Minimum Travel Time*). Le analisi realizzate sono la probabilità di incendio (nell'applicativo *FlamMap: Burn Probability*) e intensità potenziale (nell'applicativo *FlamMap: Fireline Intensity*).

2. PREDISPOSIZIONE DEI DATI DI INPUT

2.1. Topografia

I dati di input relativi alla quota (*Elevation*), pendenza (*Slope*) ed esposizione (*Aspect*) sono stati ottenuti a partire dal DEM (*Digital Elevation Model*), con risoluzione 10 m (Tinitaly⁴) (Figura 2). A partire dal DEM, rappresentativo delle quote, sono stati calcolati i valori di pendenza ed esposizione, tramite elaborazioni spaziali utilizzando il software opensource QGIS 3.34.

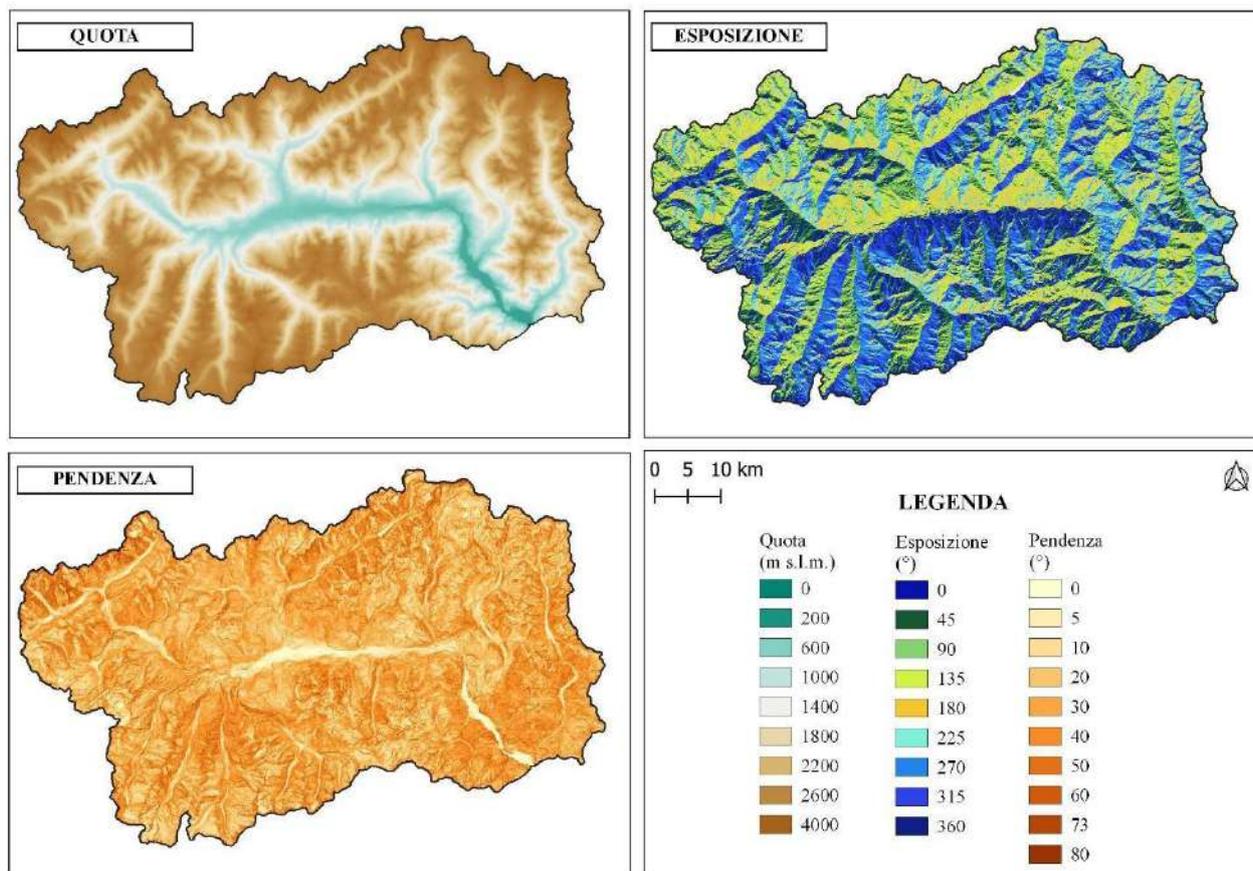


Figura 2 – Dati di input del software FlamMap descrittivi le caratteristiche topografiche determinanti il comportamento degli incendi.

2.2. Copertura delle chiome

La copertura delle chiome dello strato arboreo è il layer informativo che serve ad attivare il modulo di comportamento dell'incendio di chioma e la continuità di chioma. Per il grado di copertura delle chiome (*Tree Canopy Cover*) è stato utilizzato il dato derivante da elaborazioni interne al Programma Forestale Regionale (Figura 3). Le formazioni di latifoglie presenti in Valle d'Aosta sono costituite da specie che tipicamente non sono in grado di sostenere un incendio di chioma, inoltre, nel periodo tardo invernale - stagione caratteristica del regime di incendio alpino- queste formazioni sono ancora prive della chioma. Pertanto, si è deciso di azzerare la copertura arborea in tutti quei tipi di combustibile che non sono in grado di sostenere attività di incendio di chioma, mantenendola di conseguenza per le sole formazioni di conifere.

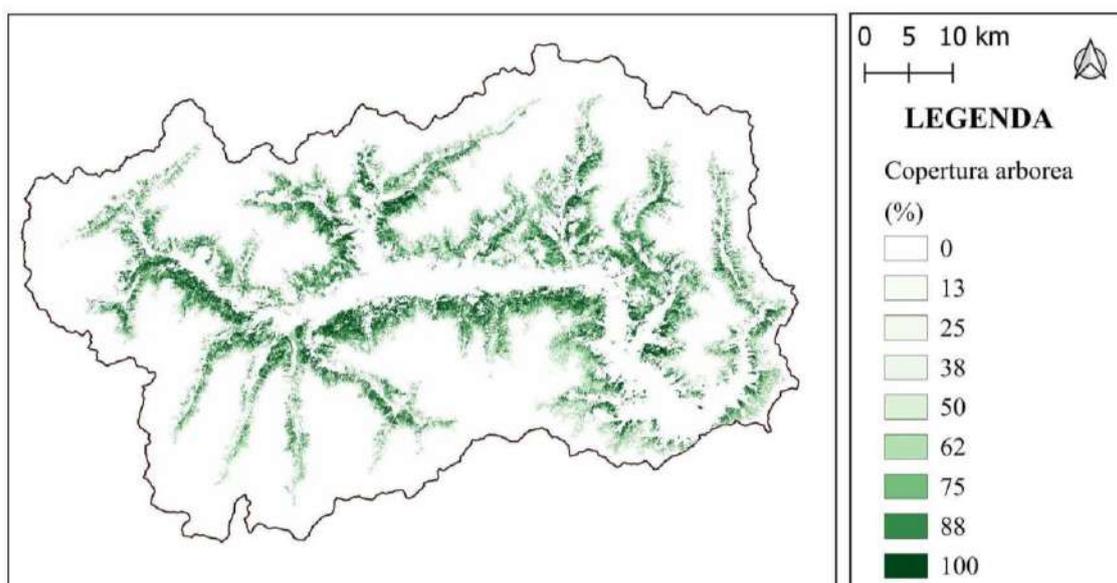


Figura 3 - Dato di input del software FlamMap descrittivo del grado di copertura delle chiome.

2.3. Caratteristiche dei combustibili

Le caratteristiche dei combustibili di superficie sono descritte in modo quantitativo dalla carta dei modelli di combustibile. Il processo di realizzazione della carta dei modelli di combustibile si è articolato nelle seguenti fasi:

- i) redazione della Carta di Uso del suolo complessivo;
- ii) analisi preliminare della selettività a bruciare dei tipi forestali e altri usi del suolo;
- iii) individuazione dei tipi di combustibile presenti in Valle d'Aosta;
- iv) attribuzione dei tipi forestali e degli altri usi del suolo ai tipi di combustibile;
- v) associazione dei modelli di combustibile ai tipi di combustibile.

Fase i: per poter mappare i tipi di combustibile, per l'intero territorio regionale, è stato necessario redigere una carta di Uso del suolo complessivo (fase iv), tramite l'unione delle seguenti cartografie:

- Carte dei Tipi Forestali della Valle d'Aosta, per dettagliare il tipo forestale delle zone boscate (Geoportale Regione Valle d'Aosta⁵);
- Carta di Uso del Suolo, aggiornata al 2020, per dettagliare gli altri usi del suolo (Geoportale Regione Valle d'Aosta⁵).

Fase ii: l'analisi della selettività ha l'obiettivo di indagare la propensione a bruciare dei diversi tipi forestali e usi del suolo, in base a quanto espresso storicamente dal territorio, al fine di integrare questa informazione nella definizione e mappatura dei tipi e modelli di combustibile. Per ciascun tipo forestale sono state calcolate la superficie totale e la superficie bruciata nel periodo 1996-2023, secondo i perimetri incendi (scaricabili al Geoportale Regione Valle d'Aosta⁵). I tipi forestali sono stati successivamente raggruppati nelle rispettive categorie Del Favero (secondo quanto predisposto dalle associazioni per la Carta Forestale Italiana che riporta questa informazione rendendo le classificazioni regionali armonizzabili per l'intero territorio nazionale). Successivamente, all'interno di ciascuna Categoria del Favero i tipi sono stati riordinati in un senso decrescente di selettività a bruciare definita come il rapporto percentuale fra superficie percorsa dal fuoco e superficie totale del

tipo, al fine di integrare questa informazione in fase di attribuzione al tipo di combustibile maggiormente rappresentativo in termini di infiammabilità. L'analisi della selettività ha riguardato anche gli usi del suolo non forestali.

Fase iii: sono stati individuati i tipi di combustibile potenzialmente presenti in Valle d'Aosta e attribuibili ai tipi forestali regionali e agli altri usi del suolo. In totale, sono stati individuati 23 tipi di combustibile definiti sulla base di una classificazione nazionale in fase di redazione come attributo della Carta Forestale Nazionale. Fra questi sono stati compresi sia quelli rappresentativi dei tipi forestali sia quelli rappresentativi degli altri usi del suolo non forestali, come definiti dalla carta di uso del suolo.

Fase iv: una volta individuati i 23 tipi di combustibile regionali è stato possibile attribuire a ciascun tipo forestale e agli altri usi del suolo il tipo di combustibile più rappresentativo in termini di caratteristiche fisionomiche e di infiammabilità, così come riportato all'Allegato 10. La Carta di Uso del Suolo Complessivo, generata durante la prima fase è stata decodificata e le informazioni contenute sono state analizzate per attribuire ad ogni poligono un tipo di combustibile tra i 23 tipi di combustibile della regione Valle d'Aosta, come da Allegato 10 (Figura 4).

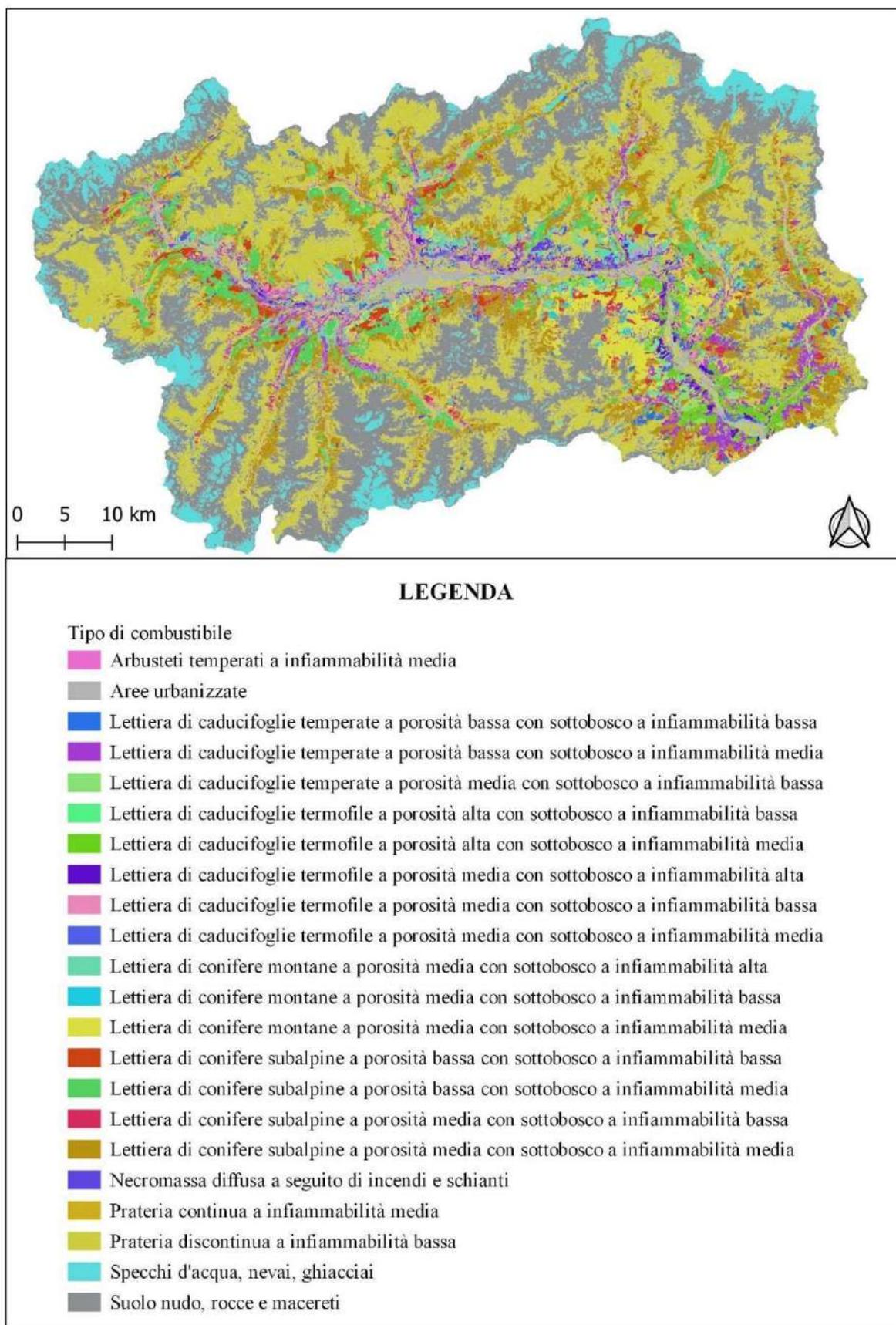


Figura 4 – Carta dei Tipi di combustibile.

Fase v: a ciascuno dei 23 tipi di combustibile della classificazione valdostana è stato associato un modello di combustibile (fase v), a partire dai 40 modelli di combustibile di Scott & Burgan (2005²), per poter esprimere in maniera quantitativa la loro suscettività a bruciare. Per l'associazione fra tipi e modelli di combustibile è stata utilizzata come riferimento l'associazione dei tipi con i modelli di combustibile in corso di realizzazione al livello nazionale, in modo da ottenere un prodotto armonizzato con le future cartografie regionali limitrofe (es. Piemonte) e nazionali. In conclusione, il processo di attribuzione e associazione per ciascun uso del suolo e tipo forestale (**Allegato xx**), ha portato alla produzione della Carta dei Modelli di Combustibile (Figura 5).

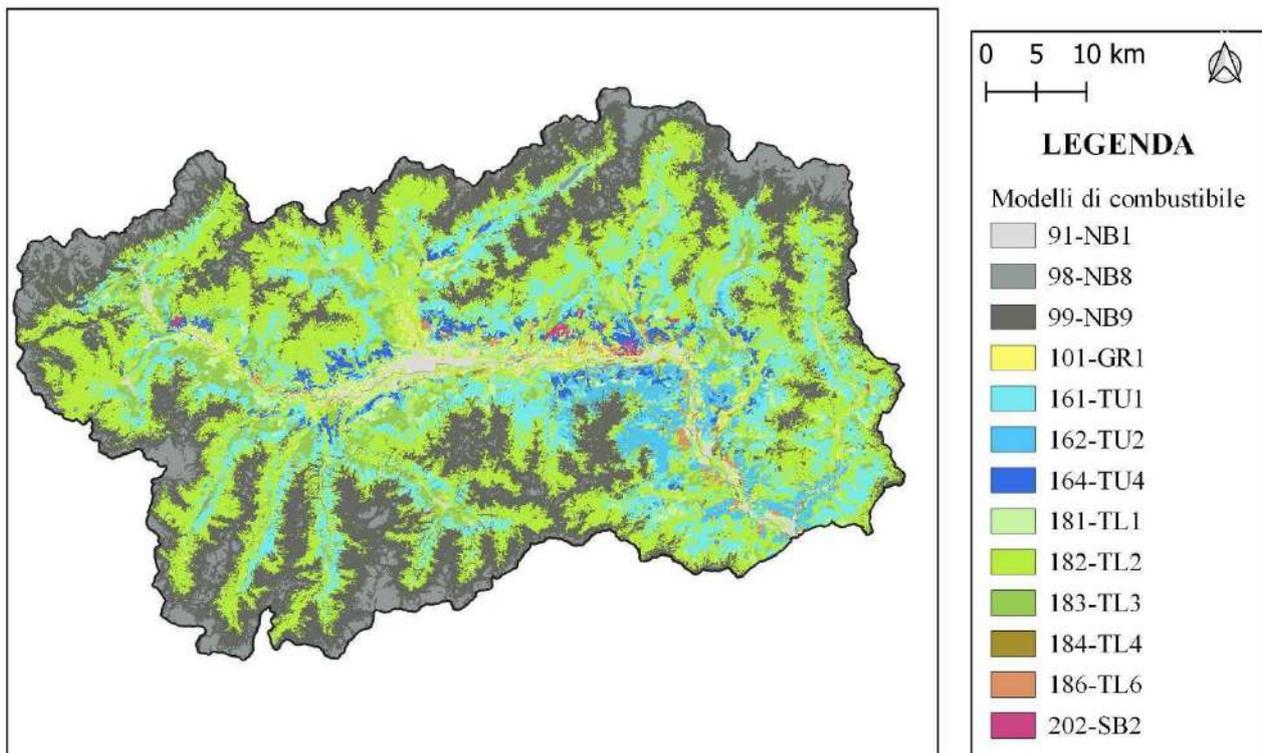


Figura 5 – Carta dei Modelli di combustibile, dato di input del software FlamMap.

2.4. Caratteristiche dei combustibili di chioma

I tre strati informativi opzionali relativi ai combustibili di chioma sono stati generati seguendo lo stesso principio adottato per il raster di copertura delle chiome. Poichè un'attività di incendio di chioma in Valle d'Aosta è attesa in boschi a prevalenza di conifere, solo a queste formazioni sono stati attribuiti i tre valori descrittivi di chioma, attribuendo valore zero al territorio restante.

Per quanto riguarda lo strato informativo delle altezze degli alberi, questo è stato calcolato come differenza fra il DSM (Digital Surface Model) e il DTM (Digital Terrain Model), distribuiti da Tinitaly. Al raster risultante è stata sovrapposta una maschera per mantenere i valori solo in corrispondenza delle conifere. Il risultato dell'elaborazione è riportato nella Figura 6.

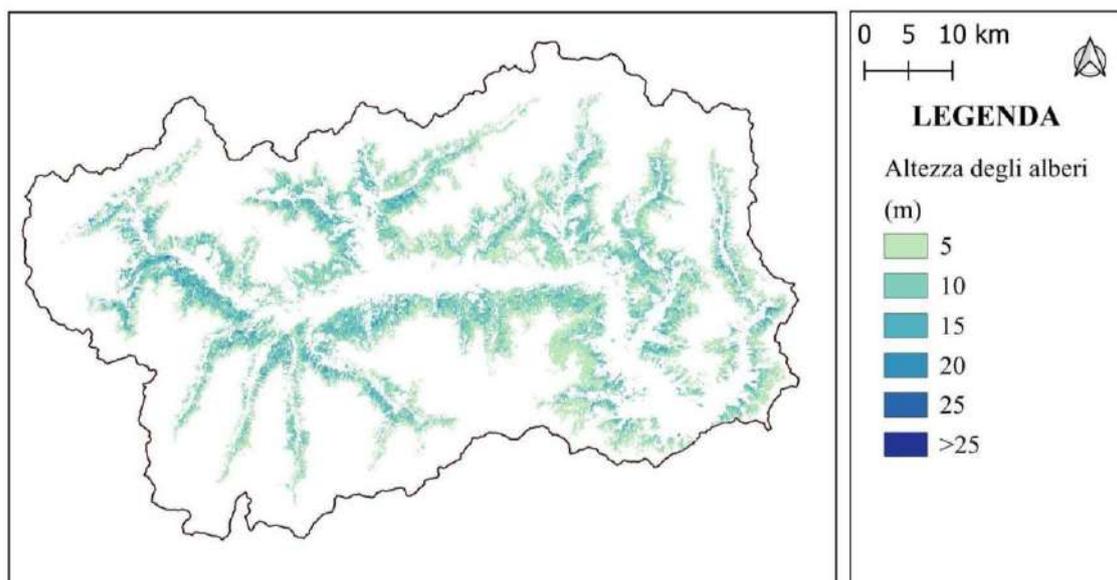


Figura 6 – Carta delle altezze degli alberi delle formazioni di conifere, dato di input del software FlamMap.

L'altezza di inserzione di chioma è stata definita, in maniera omogenea per tutte le specie di conifere, pari al 60% dell'altezza delle piante, sulla base dei dati di letteratura. Pertanto, a partire dall'altezza totale delle piante calcolata come al punto precedente, è stato applicato un coefficiente di 0,6 per ottenere l'altezza di inserzione rappresentata in Figura 7. In questo caso, utilizzando come dato di partenza l'altezza delle piante, non è stato necessario applicare la maschera delle conifere.

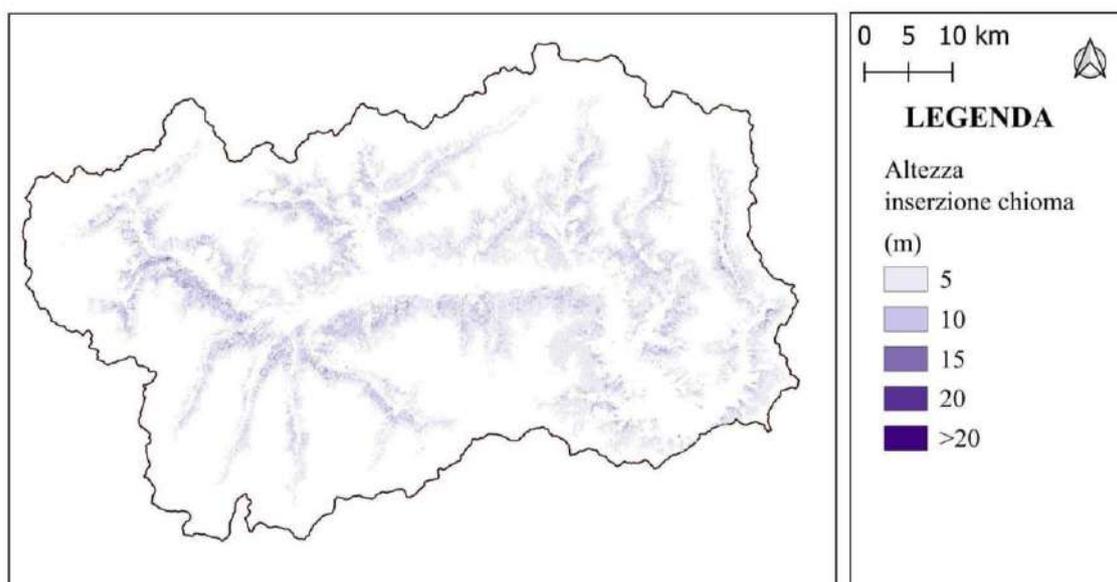


Figura 7 – Carta delle altezze di inserzione di chioma delle formazioni di conifere, dato di input del software FlamMap.

L'ultimo strato di input relativo ai combustibili di chioma è quello relativo alle densità delle chiome (CBD), che anche in questo caso è stato definito sulla base di ricerche bibliografiche. Poiché l'attività

di chioma è prevista solo per le conifere, le ricerche sono state condotte per le seguenti specie: *Pinus sylvestris*, *Larix decidua*, *Picea abies* e *Abies alba*. Per i dati relativi al pino silvestre è stato utilizzato il valore di densità pari a 0,56 kg/m³, secondo quanto indicato da Riano et al. (2004). Per le altre specie, per mancanza di dati relativi alle specie europee, è stato necessario fare riferimento a quanto disponibile per le conifere del Nord America (Brown 1978), definendo le opportune corrispondenze sulla base delle caratteristiche fisionomiche delle chiome. I valori individuati sono riportati in Tabella 2. Il raster di densità è stato generato sulla base dei dati di uso del suolo riportanti formazioni di conifere, attribuendo densità pari a zero a tutti gli altri usi del suolo.

Tabella 2 – Valori di densità delle chiome (CBD - Crown Bulk Density) attribuiti alle specie presenti in Valle d'Aosta sulla base delle associazioni con i valori delle specie disponibili in letteratura.

Specie locale	Specie di confronto	CBD - Densità di chioma (kg/m ³)
<i>Abies alba</i>	<i>Abies grandis</i>	0,769
<i>Larix decidua</i>	<i>Larix occidentalis</i>	0,401
<i>Picea abies</i>	<i>Picea engelmannii</i>	0,962
<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	0,56

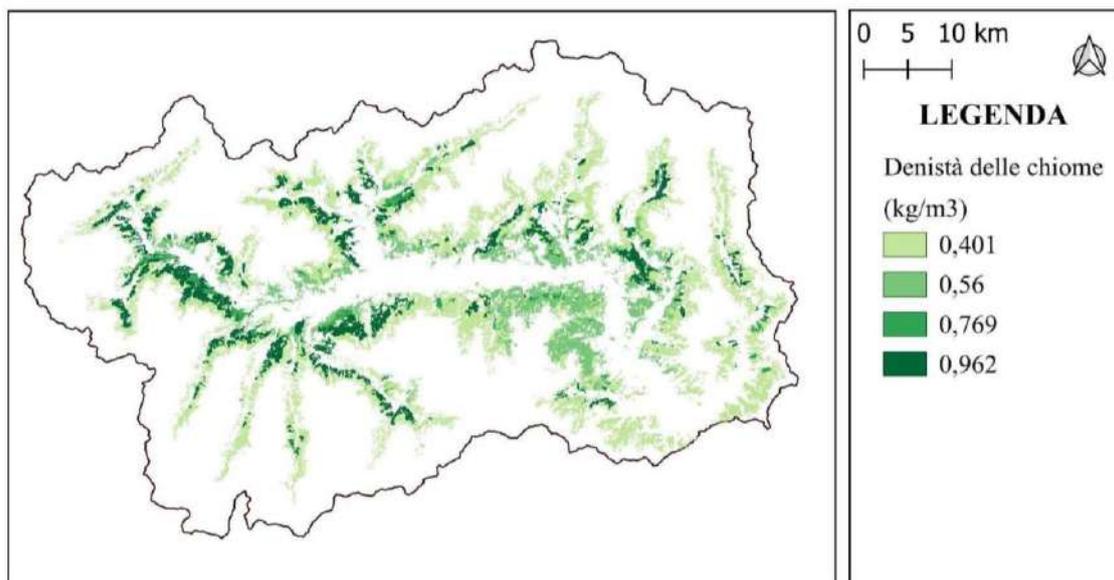


Figura 8 – Carta delle densità di chioma in kg/m³ delle formazioni di conifere, dato di input del software FlamMap.

2.5. Caratteristiche meteorologiche

2.5.1. Umidità

Le condizioni di umidità dei combustibili in grado di influenzare gli incendi sono state descritte all'interno dell'ambiente di simulazione tramite l'utilizzo degli scenari di umidità standard proposti da Scott & Burgan (2005)³. Al fine di tenere in considerazione l'esposizione dei versanti, aspetto di elevata significatività nel territorio della Valle d'Aosta, sono stati definiti due differenti scenari per le esposizioni nord-est e sud-ovest. Nel primo caso, per i versanti con valori di esposizione compresi tra 0° e 157°30' e tra 337°30' e 360°, è stato adottato uno scenario a maggior umidità, del tipo D3 (*Moderate*) per i combustibili morti e L2 (*Low*) per i combustibili vivi. Nel secondo caso, per i versanti con esposizione 157°30' e 337°30', è stato scelto uno scenario di maggior disidratazione corrispondente alla combinazione D2 (*Low*) per i combustibili morti e L1 (*Very Low*) per i combustibili vivi. I valori corrispondenti ai due scenari sono riportati in Tabella 3.

Tabella 3 – Valori di umidità dei combustibili morti (divisi in classi di combustibile secondo la classificazione di Pyne et al., 1996⁷) e vivi dei diversi scenari utilizzati a seconda dell'esposizione del versante (Scott & Burgan, 2005²).

Esposizione	SUD-OVEST					NORD-EST				
	D2 Low			L1 Fully cured Very low		D3 Moderate			L2 Two-thirds cured Low	
Stato	Combustibili Morti			Combustibili Vivi		Combustibili Morti			Combustibili Vivi	
Componente	1 h	10 h	100 h	Erbacea	Arbustiva	1 h	1 0 h	100 h	Erbacea	Arbustiva
Umidità (%)	6	7	8	30	60	9	1 0	11	60	90

2.5.2. Vento

Il vento condiziona fortemente il comportamento degli incendi, in particolar modo la sua intensità [km/h] e direzione prevalente [°]. Inoltre, il vento è un fenomeno che assume caratteristiche eterogenee sia nei diversi periodi dell'anno sia nel corso di una stessa giornata; pertanto, si è deciso di effettuare due simulazioni con scenari di vento differenti. È stato simulato il comportamento potenziale degli incendi utilizzando sia uno scenario di vento sinottico che uno scenario di vento topografico.

Nella simulazione con scenario di vento sinottico, rappresentativo delle condizioni di föhn, è stato necessario suddividere il territorio regionale in settori omogenei per velocità e direzione prevalente del vento. Nel complesso sono state individuate 7 zone di vento omogenee, rappresentate in Figura 9, sulla base della suddivisione utilizzata per la definizione del pericolo di incendio meteorologico, calcolato tramite l'indice canadese FWI (*Fire Weather Index*). Per ciascuna di queste zone sono stati impiegati i valori di velocità e direzione più rappresentativi riportati in Tabella 4.

Nella simulazione con scenario di vento topografico, per ciascuna zona di vento omogenea, è stato simulato un vento di velocità standard di 15 km/h, con direzione parallela alla massima pendenza, da valle verso monte. Infine, è stata effettuata la media dei risultati ottenuti dalle simulazioni con i due diversi scenari di vento.

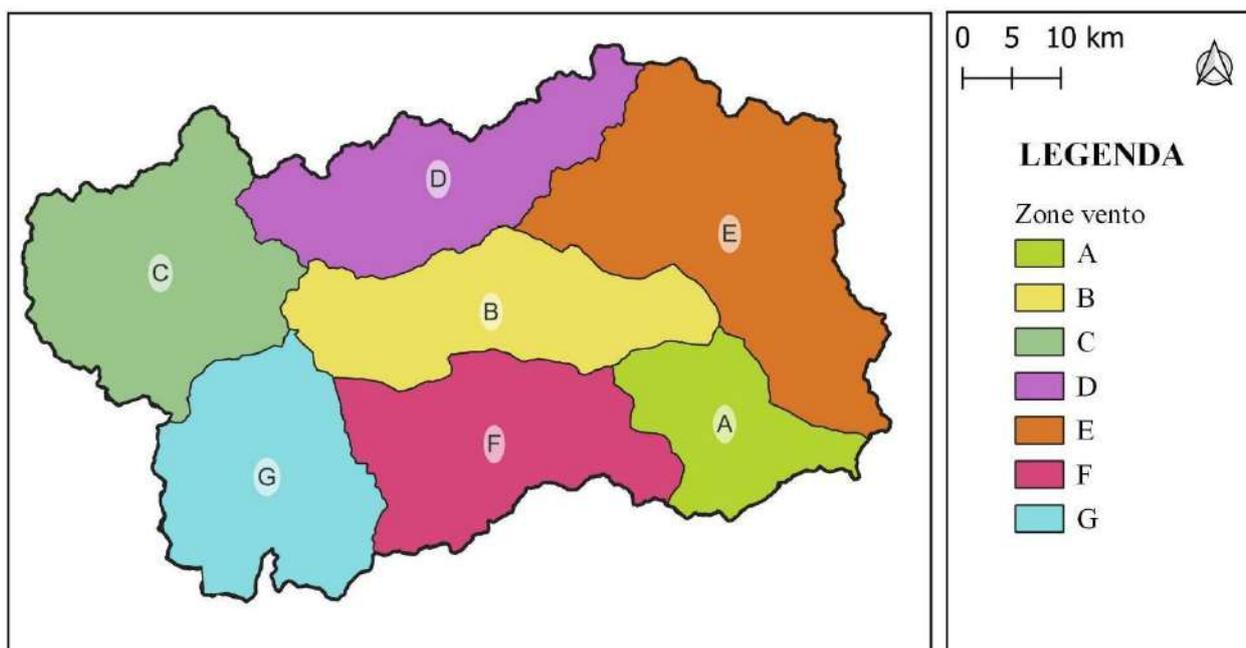


Figura 9 – Suddivisione della Regione Valle d’Aosta in zone omogenee per la simulazione con scenario di vento sinottico.

Tabella 4 – Parametri dello scenario di vento sinottico.

Zona omogenea di vento	Intensità vento	Velocità vento (km/h)	Direzione
A	elevata	25	NW
B	elevata	25	W-NW
C	media	20	W-NW
D	media	20	N-NW
E	media	20	N
F	bassa	15	N-NW
G	bassa	15	N

2.6. Probabilità di innesco

Per determinare la probabilità di innesco sono stati distribuiti 5.000 punti di innesco sull’intero territorio regionale infiammabile. I punti di innesco si dividono in tre tipologie in base al criterio di distribuzione:

- i. 250 punti (5%) distribuiti in maniera casuale;
- ii. 2500 punti (50%) distribuiti su una griglia regolare;
- iii. 2250 punti (45%) ripartiti fra i comuni proporzionalmente alla superficie percorsa dagli incendi storici e distribuiti in un buffer di 50 m dalle strade e dall’uso del suolo agricolo.

La combinazione di questi criteri consente di tenere conto delle componenti di probabilità legate agli incendi naturali da fulmine (punti casuali), al fattore antropico (buffer della viabilità e dall’agricolo) e alla componente storica (proporzionalità allo storico comunale), indicatrice della propensione al verificarsi di eventi di incendio manifestata nel passato dal territorio valdostano. Infine, sono stati distribuiti dei punti su una maglia regolare per esplorare l’intero territorio infiammabile per non sottostimare la probabilità di innesco.

3. IMPOSTAZIONE DEI PARAMETRI DI SIMULAZIONE

Una volta predisposti tutti i parametri (scenario meteorologico predisponente il passaggio degli incendi e probabilità d'innescio) e gli input necessari (descrittivi della topografia, delle caratteristiche vegetazionali e dei combustibili, corrispondenti ai 5 temi di base a formare il *landscape file*), è stato possibile procedere con le simulazioni tramite il software *FlamMap*.

Per svolgere le simulazioni è stata impiegata la funzionalità *New FlamMap/MTT/TOM Run*, l'interfaccia di questa funzione è costituita da un insieme di tabs, all'interno delle quali devono essere forniti tutti i parametri di input necessari al software per operare. Di seguito si riportano i metodi e le informazioni fornite al software in ciascuna tab della *Run*.

- i. *Input tab*: in questa tab vengono forniti i dati relativi all'umidità tramite la creazione del file nell'apposito formato *.fms; inoltre vengono specificati i parametri descrittivi del vento a seconda dello scenario da prevedere nella simulazione da eseguire. Infine, come Crown Fire Calculations Methods, è stato selezionato il metodo di Finney (2004) ed è stata assegnata una umidità dei combustibili di chioma pari a 100%.
- ii. *Fire Behaviour Option*: in questa tab è stato specificato il parametro di *Fireline Intensity* (intensità del fronte lineare di fiamma) come output che si desidera ottenere dalla simulazione. Il software *FlamMap* restituisce questo parametro come output in formato *raster*, in cui ogni pixel contiene un valore di intensità potenziale espresso come intensità lineare del fronte di fiamma (kW/m).
- iii. *Minimum Travel Time*: le funzionalità disponibili in questa tab consentono di modellizzare in due dimensioni la propagazione dell'incendio. A partire dai punti di innescio, determinati con il metodo precedentemente descritto e forniti come *Fire List File*, è possibile richiedere al software di simulare la propagazione dei 5.000 incendi a partire dal punto di innescio. Questa analisi consente di determinare la probabilità di incendio dell'intero territorio che si viene a creare dalla sovrapposizione dei perimetri dei 5.000 incendi simulati. Per poter ottenere queste informazioni è tuttavia necessario fornire ulteriori parametri di input relativi alla risoluzione di calcolo. Per il presente lavoro è stata specificata una risoluzione di calcolo (*Resolution of calculation*) pari a 40 m, ritenuta un buon compromesso fra velocità computazionale e precisione di calcolo. Come tempo massimo di simulazione, da prevedere per un singolo evento, è stato impostato un tempo di 24 ore (1440 minuti) che è il tempo in cui la maggior parte degli incendi in Valle d'Aosta esprime il suo potenziale di propagazione. Gli altri parametri sono stati mantenuti così come impostati dal software. Infine, all'interno di questa tab, alla voce *Outputs* è stato specificato il valore di *Burn Probability* (probabilità di incendio), come risultato desiderato. Il software *FlamMap* restituisce questo parametro come output in formato *raster*, in cui ogni pixel contiene un valore di *Burn Probability* compreso fra 0.0 e 1.0.

4. METODO DI SVOLGIMENTO DELLE SIMULAZIONI

Le simulazioni sono state effettuate separatamente per ciascuna zona di vento omogenea e ripetute per i due scenari di vento, sinottico e topografico. I 5 temi di base del *landscape file* sono stati ritagliati per ciascun settore mantenendo un buffer di 2 km, in modo da creare un ambiente di simulazione per ognuna delle 7 zone di vento. Per ciascuna zona sono state effettuate le simulazioni per lo scenario sinottico e per lo scenario topografico.

Gli output delle simulazioni (*Burn Probability* e *Fireline Intensity*) per ciascuno dei due scenari di vento (vento sinottico e vento topografico) in ciascuna zona omogenea sono stati uniti creando un file raster dell'intero territorio regionale. Nelle aree di buffer in sovrapposizione tra zone omogenee di vento limitrofe, è stato calcolato il valore medio degli output delle simulazioni delle zone omogenee adiacenti.

Successivamente è stata effettuata una media fra i files *raster* ad estensione regionale degli output delle simulazioni con i diversi scenari di vento, in modo tale da ottenere un unico file raster di *Burn Probability* e uno di *Fireline Intensity* per l'intero territorio valdostano.

5. ELABORAZIONE DEI DATI DI OUTPUT

5.1. Intensità potenziale del fronte di fiamma

Per quantificare l'intensità potenziale del fronte di fiamma si è utilizzato il parametro intensità lineare descrittivo del comportamento del fuoco. Per generare la carta pericolosità come combinazione di intensità potenziale e probabilità di incendio è stato necessario classificare i valori continui dei due strati informativi in 5 classi. La classificazione effettuata non è da intendersi in termini assoluti, bensì in termini di gradiente, in quanto l'obiettivo è quello di ottenere una classificazione del territorio funzionale dal punto di vista gestionale. Per quanto riguarda l'intensità sono stati utilizzati i valori soglia riportati in Tabella 5. Si ribadisce che questi valori vanno letti e interpretati come un gradiente di intensità potenziale e non come valori assoluti di intensità lineare compatibili con l'attacco diretto, né come effetti del passaggio del fuoco sulla vegetazione.

Tabella 5 – Classificazione dei valori di intensità lineare (*Fireline Intensity* – *FLI*).

FLI [kW/m]	Classe intensità lineare	Codice
< 25	Molto bassa	1
25-75	Bassa	2
75-150	Media	3
150-300	Alta	4
>300	Molto alta	5

5.2. Probabilità di incendio

La probabilità di incendio, o *Burn Probability* (BP), rappresenta la probabilità che un determinato punto nello spazio sia percorso dal fuoco. In ambiente *FlamMap* la *Burn Probability* (BP) viene stimata tramite la simulazione dei perimetri di un numero di incendi sufficientemente consistente e, a partire dai perimetri degli incendi, per ciascun pixel del territorio viene calcolato il rapporto tra il numero di volte che il pixel viene bruciato e il numero di incendi simulati. Per la definizione della

pericolosità è stato necessario classificare i valori assoluti continui in 5 classi di BP per l'interno territorio regionale tramite specifici valori soglia (Tabella 6).

Tabella 6 – Classificazione dei valori di probabilità di incendio (Burn Probability -BP).

BP	Classe probabilità di incendio	Codice
< 0.0010	Molto bassa	1
0.0010-0.0030	Bassa	2
0.0030-0.0080	Media	3
0.0080-0.0190	Alta	4
>0.0190	Molto alta	5

6. RISULTATI DELLA MAPPATURA DELLA PERICOLOSITÀ

La carta della pericolosità risultante dalle analisi condotte ha consentito di classificare il territorio regionale in 5 classi di pericolosità da Molto Bassa (1) a Molto Alta (5). Poiché i risultati così ottenuti non evidenziano sufficientemente la differenziazione fra versanti esposti a nord e versanti esposti a sud, si è ritenuto opportuno ridurre il valore di pericolosità di una classe per i versanti con esposizione nord. Dalla classificazione descritta è emerso che il territorio regionale infiammabile risulta essere distribuito nelle 5 classi con le seguenti proporzioni: 50% in classe 1; 25% in classe 2; 13% in classe 3; 8% in classe 4; 4% in classe 5.

7. VALIDAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ

La carta della pericolosità ricavata dalla matrice di combinazione di probabilità e intensità è stata validata tramite un'analisi dedicata. Sono stati distribuiti nell'area infiammabile 5000 punti in maniera casuale. Per questi punti è stato estratto il valore della classe di pericolosità del pixel corrispondente e sono stati confrontati i valori dei punti ricadenti all'interno dei perimetri degli incendi storici (in) con quelli ricadenti all'esterno (out). Il confronto dei valori estratti è avvenuto tramite il valore mediano:

- mediana punti dentro gli incendi (in) = 3 (ricavato da 89 punti)
- mediana punti fuori dagli incendi (out) = 1 (ricavato da 4911 punti)

Inoltre, è stata ricavata la distribuzione percentuale dei punti nelle classi di pericolosità, rappresentata graficamente in Figura 10.

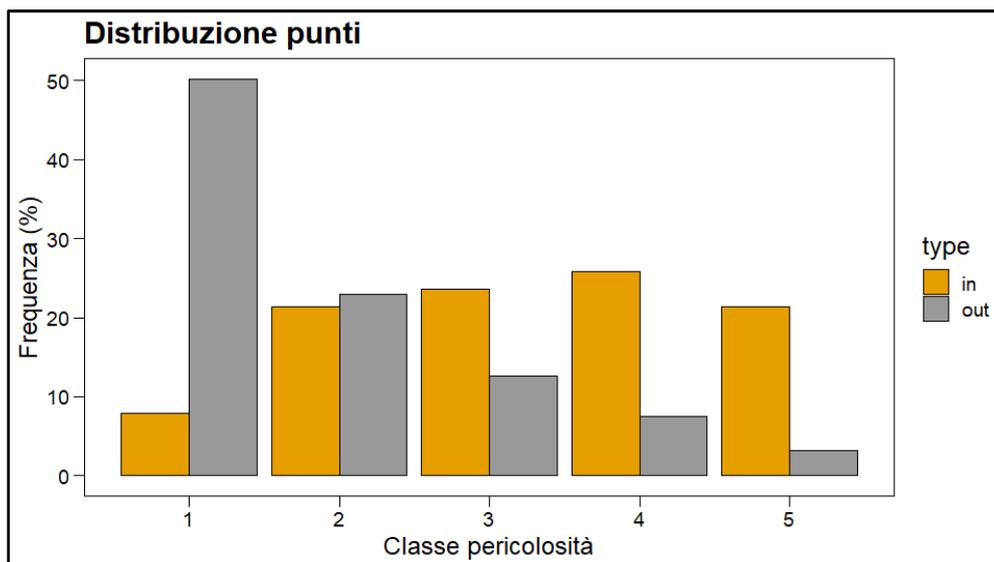


Figura 10 – Confronto della distribuzione percentuale dei punti di validazione ricadenti all'interno (in) e all'esterno(out) degli incendi storici.

La mediana e la distribuzione dei punti nelle classi fanno emergere come la mappatura della pericolosità sia in grado di far emergere le zone che storicamente sono state più suscettibili al fenomeno degli incendi boschivi.

Analisi del danno potenziale

1. DEFINIZIONE DEL DANNO POTENZIALE

Il Danno potenziale viene declinato in due tipi di danno:

- **Danno potenziale di interfaccia:** Il Danno potenziale d'interfaccia è calcolato tramite una matrice combinazione delle componenti di Vulnerabilità d'interfaccia e di Esposizione d'interfaccia, ed è espresso in 5 classi (Molto bassa, Bassa, Media, Alta, Molto alta) (Tabella 7, Figura 11).
- **Danno potenziale funzionale:** Il Danno potenziale funzionale è calcolato tramite una matrice di combinazione delle componenti di Vulnerabilità ecologica e di Esposizione funzionale, ed è espresso in 5 classi (Molto bassa, Bassa, Media, Alta, Molto alta) (Tabella 7, Figura 12). A ciascun pixel dell'intero territorio regionale è stato assegnato un valore, in assenza di elementi di Esposizione e Vulnerabilità è stata assegnata la classe Molto bassa.

Tabella 7 - Matrice di combinazione della classe del Danno potenziale, come combinazione della Vulnerabilità con l'Esposizione.

	Esposizione		
	Danno potenziale	Assenza	Presenza
Vulnerabilità	Molto bassa	Null	Molto bassa
	Bassa	Null	Bassa
	Media	Null	Media
	Alta	Null	Alta
	Molto alta	Null	Molto alta

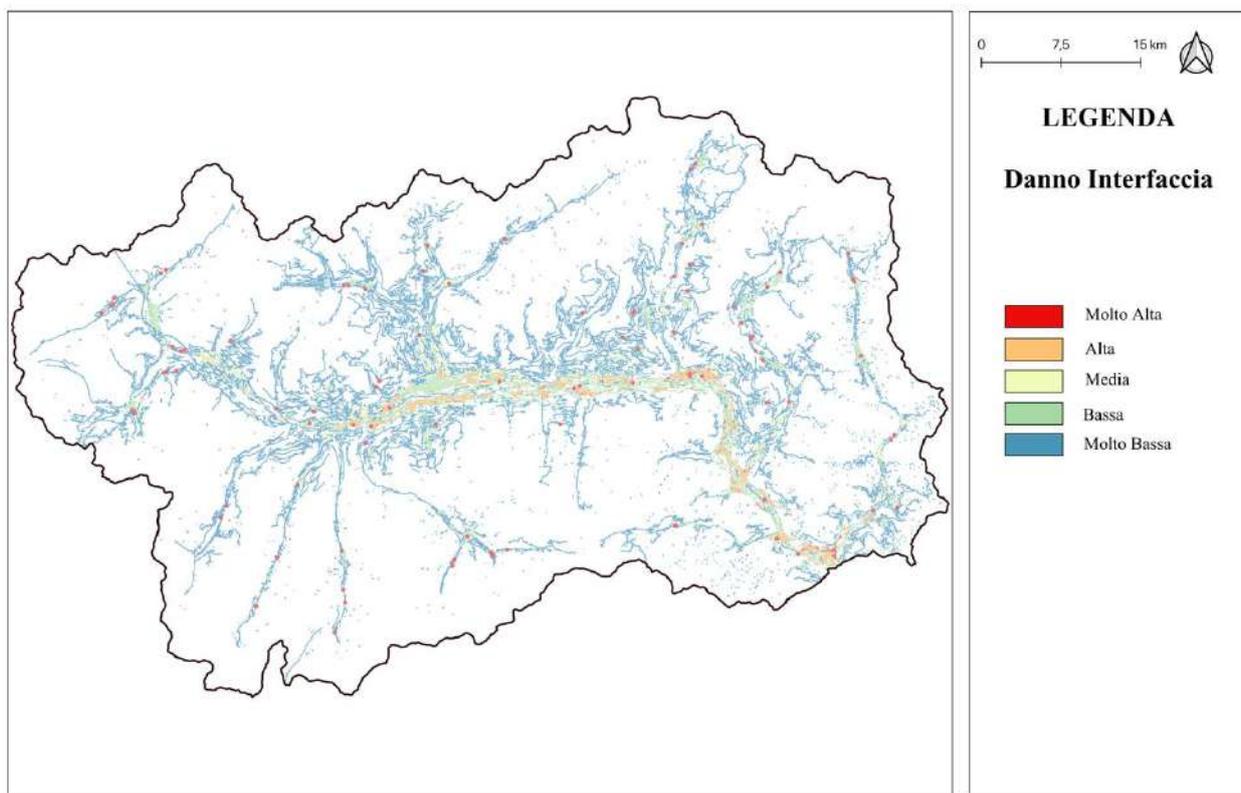


Figura 11 - Danno potenziale d'interfaccia.

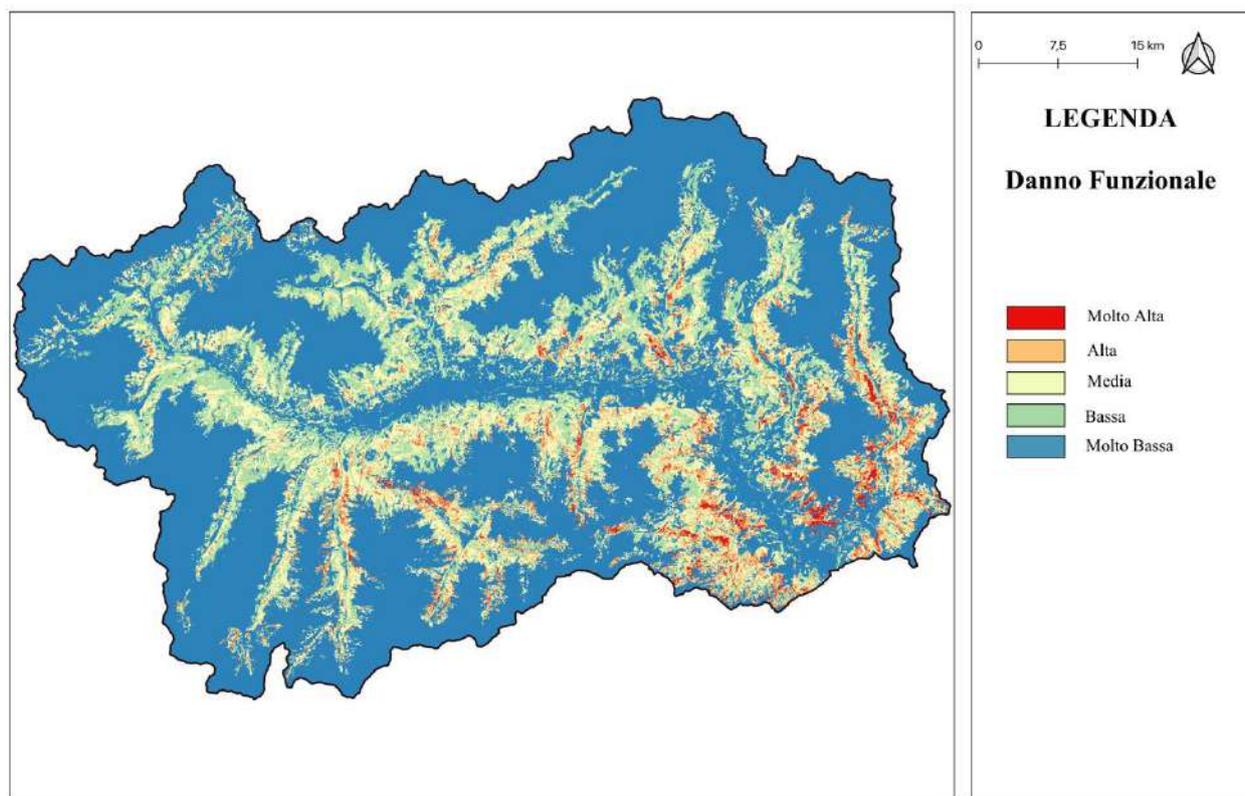


Figura 12 - Danno potenziale funzionale.

2. DANNO POTENZIALE DI INTERFACCIA

2.1. Esposizione d'interfaccia

L'esposizione d'interfaccia individua le aree dove le attività antropiche entrano in contatto con la vegetazione infiammabile e influenzano il fenomeno incendi modificando la frequenza e la numerosità degli inneschi. Tali aree vengono definite aree di interfaccia e comprendono l'interfaccia urbano-rurale e l'interfaccia viabilità-rurale. L'interfaccia viabilità-rurale è materializzata da un buffer di 100 m costruito intorno alla viabilità (50 m a valle e 50 m a monte delle infrastrutture viarie), mentre per l'interfaccia urbano-rurale è stato utilizzato come strato informativo la carta dell'interfaccia realizzata da D'Este et al. (2021)⁸, al quale sono state aggiunte le aree attrezzate e i campeggi presenti sul territorio valdostano tramite la realizzazione di un buffer di 200 m di raggio intorno al baricentro dell'area. L'esposizione d'interfaccia deriva dalla sovrapposizione delle due componenti (interfaccia urbano-rurale e interfaccia viabilità-rurale) ed è espressa in due classi (0-1), dove la classe 1 rappresenta la presenza delle aree d'interfaccia, mentre la classe 0 rappresenta l'assenza di tali zone (Figura 13).

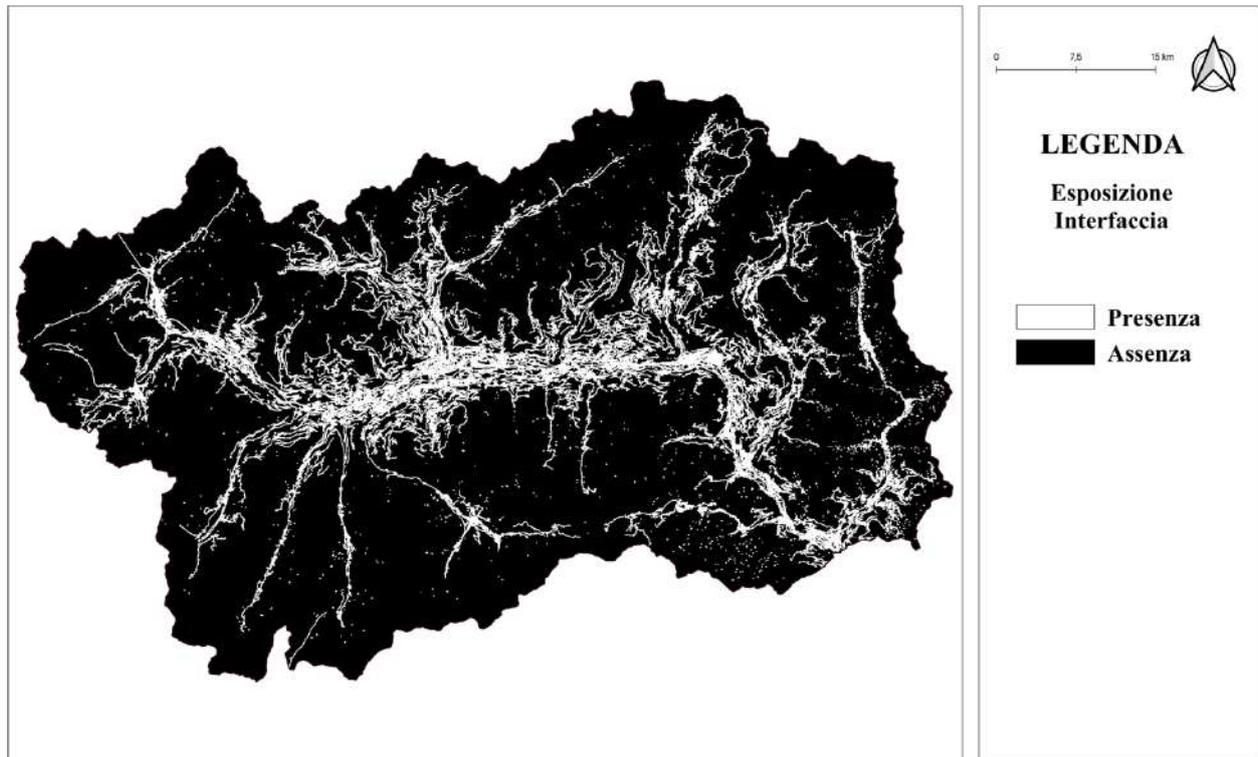


Figura 13- Esposizione d'interfaccia.

2.2. Vulnerabilità d'interfaccia

La vulnerabilità d'interfaccia è lo strato informativo che classifica l'esposizione d'interfaccia, realizzando un gradiente di vulnerabilità delle zone di interfaccia da 1 (Molto bassa) a 5 (Molto alta). La vulnerabilità d'interfaccia è espressa in 5 classi (Molto bassa, Bassa, Media, Alta, Molto alta; Figura 14), definite tramite la combinazione di altrettante classi d'interfaccia urbano-rurale (Figura 15) e d'interfaccia viabilità-rurale (Figura 16) tramite un'apposita matrice di combinazione (Tabella 8).

L'interfaccia urbano-rurale è stata classificata in 5 classi a partire dalle 9 classi di D'este et al. (2021)⁸ (Tabella 9), mentre alle aree attrezzate e i campeggi (aree circolari di raggio 200 m) è stata assegnata la classe di vulnerabilità Molto alta; l'interfaccia viabilità-rurale è stata classificata in 5 classi utilizzando i seguenti criteri:

- tipologia di strade: a ciascuna tipologia di strada è stato assegnata una classe di vulnerabilità in base alla frequentazione di tali infrastrutture (classe 1= piste forestali - poderali; classe 2=strade asfaltate; classe 3= autostrade - ferrovie)
- altitudine: la viabilità è stata suddivisa in 5 classi altitudinali. A ciascuna classe altitudinale è stata assegnata una classe di vulnerabilità: all'aumentare della quota è stato assegnata una classe di vulnerabilità decrescente, in quanto la frequenza del passaggio antropico sulla viabilità diminuisce proporzionalmente all'aumentare dell'altitudine (Tabella 10).
- prossimità agli incendi storici (i tratti di viabilità che rientrano in una distanza di 100 m dal perimetro degli incendi storici sono stati scalati ad una classe di vulnerabilità superiore).

Tabella 8 - Matrice di combinazione della classe di Vulnerabilità d'interfaccia, come combinazione dell'interfaccia urbano-rurale con l'interfaccia viabilità-rurale.

	Interfaccia viabilità-rurale						
	Vulnerabilità d'interfaccia	Nulla	Molto bassa	Bassa	Media	Alta	Molto alta
Interfaccia urbano-rurale	Nulla	Nulla	Molto bassa	Molto bassa	Bassa	Bassa	Media
	Molto bassa	Molto bassa	Molto bassa	Bassa	Bassa	Media	Media
	Bassa	Molto bassa	Bassa	Bassa	Media	Media	Alta
	Media	Bassa	Bassa	Media	Media	Alta	Alta
	Alta	Bassa	Media	Media	Alta	Alta	Molto alta
	Molto alta	Media	Media	Alta	Alta	Molto alta	Molto alta

Tabella 9 - Ripartizione delle 9 classi di interfaccia urbano-rurale di D'este et al. (2021)⁸ nelle 5 classi di vulnerabilità d'interfaccia urbano-rurale del PAIB.

Classificazione D'Este et al. (2021)	Classificazione PAIB
Isolated buildings and low tree canopy cover	Molto bassa
Isolated buildings and medium tree canopy cover	Bassa
Isolated buildings and high tree canopy cover	
Scattered buildings and low tree canopy cover	
Scattered buildings and medium tree canopy cover	Media
Scattered buildings and high tree canopy cover	
Clustered buildings and low tree canopy cover	Alta
Clustered buildings and medium tree canopy cover	Molto alta
Clustered buildings and high tree canopy cover	

Tabella 10 - Classificazione altitudinale della viabilità e assegnazione di una classe di vulnerabilità a ciascuna classe di quota.

Classi altitudinali	Classi di vulnerabilità
Classe 5 (>1600 m)	Molto bassa
Classe 4 (1200 - 1600 m)	Bassa
Classe 3 (1000 - 1200 m)	Media
Classe 2 (700 - 1000 m)	Alta
Classe 1 (< 700 m)	Molto alta

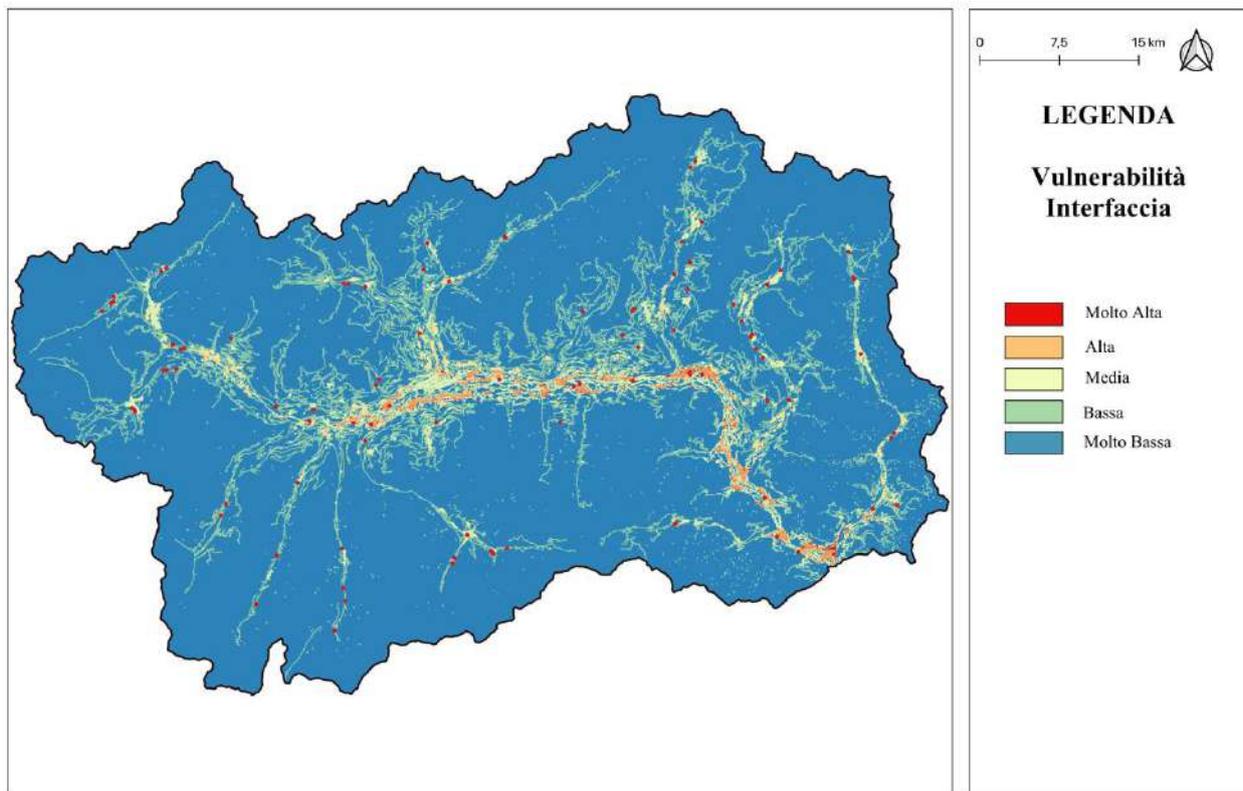


Figura 14 - Vulnerabilità d'interfaccia.

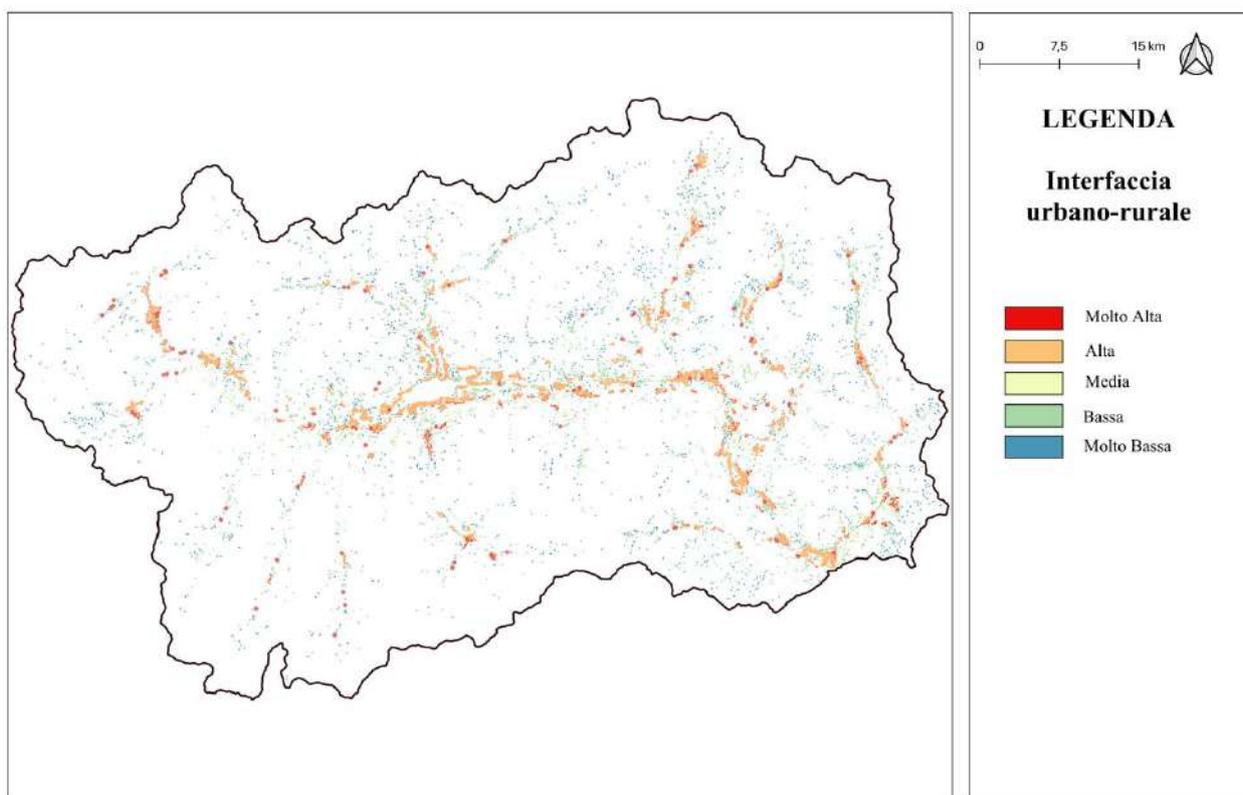


Figura 15 – Interfaccia urbano-rurale.

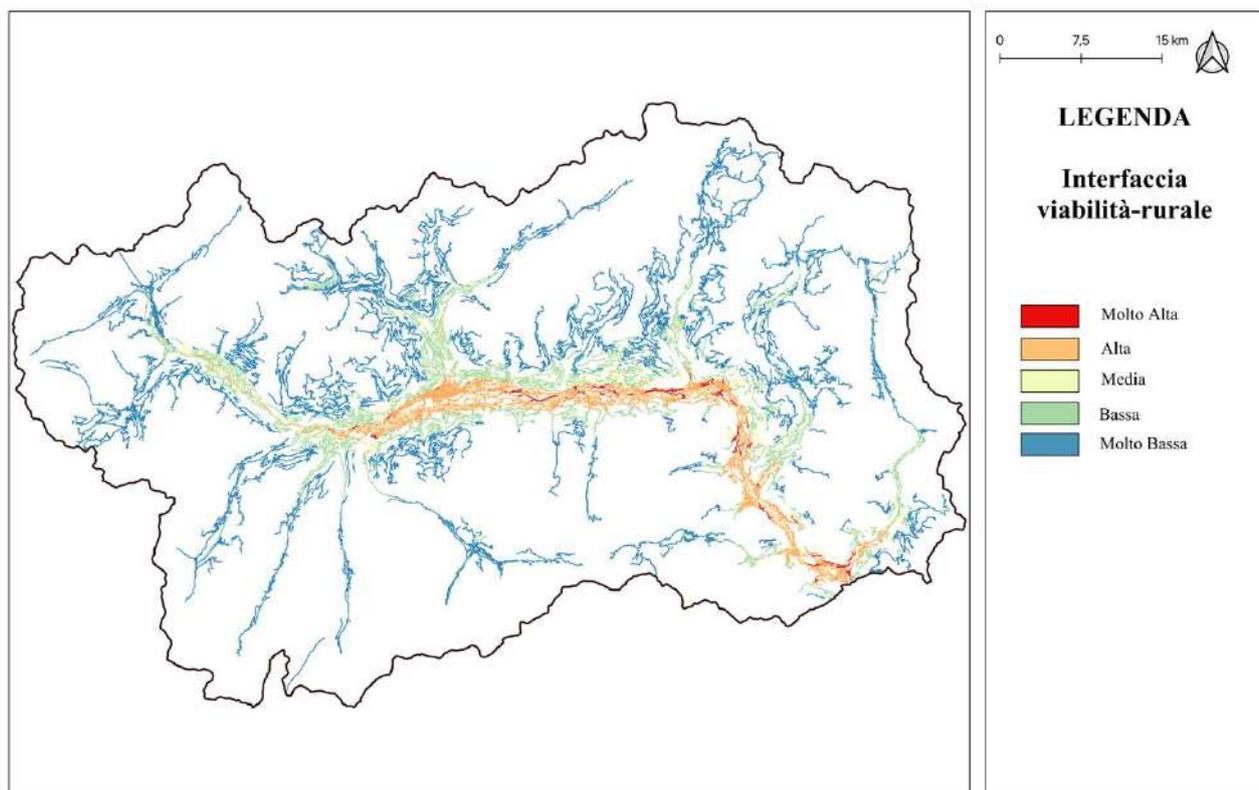


Figura 16 - Interfaccia viabilità-rurale.

3. DANNO POTENZIALE FUNZIONALE

3.1. Esposizione funzionale

L'esposizione funzionale individua gli elementi naturali ed antropici vulnerabili al passaggio degli incendi presenti all'interno del territorio regionale. In Tabella 11 sono elencati gli elementi vulnerabili che vanno a comporre l'esposizione funzionale; per ciascun elemento vulnerabile è stato generato un raster binario (0-1) dove: 1 rappresenta la presenza dell'elemento di vulnerabilità o, nel caso della funzione di carbon stock, del superamento della soglia che individua il 20% della superficie infiammabile e, quindi, di un possibile conflitto con il verificarsi di un incendio; 0 rappresenta l'assenza di questo elemento, con la conseguente mancanza di conflitto con l'eventuale passaggio del fuoco. L'esposizione funzionale deriva dalla sovrapposizione dei diversi raster degli elementi vulnerabili e viene espressa in due classi (0-1), dove la classe 1 rappresenta la presenza degli elementi vulnerabili, mentre la classe 0 rappresenta l'assenza di tali elementi (Figura 17).

Tabella 11 - Elementi dell'esposizione funzionale.

Componenti dell'Esposizione funzionale	Strati cartografici utilizzati
Funzione naturalistica	Carta dei parchi naturali (comprendente Riserve regionali e nazionali, Parchi regionali e nazionali)
	Habitat della Rete Natura 2000
	Categorie forestali di classe 4-5 di High Natural Values (Tabella 6)
Funzione di protezione diretta	Carta delle foreste di protezione diretta
Funzione carbon stock	Carta biomassa ² . Soglia utilizzata: 140 t/ha
Percorrenza	Aree percorse da incendio almeno una volta negli ultimi 15 anni
Problemi fitosanitari	Aree attaccate da bostrico e processionaria pino (censimento 2023)

Tabella 12 - Classi di High Natural Value (HNV) assegnate a ciascuna categoria forestale in funzione del loro valore di biodiversità.

Categorie forestali	Classi HNV
Abetina	4
Acero-tiglio-frassineto	4
Alneto di ontano nero e bianco	5
Alneto di ontano verde	3
Arbusteto	3
Bosco di neoformazione	2
Castagneto	2
Faggeta	4
Lariceto, Larice-cembra	4
Orno-ostrieto	3
Pecceta	4
Pineta di pino silvestre	3
Pineta di pino uncinato	5
Querceto di rovere	4
Querceto di roverella	3
Rimboschimento	1
Robinieto	1
Saliceto, pioppeto ripario	5

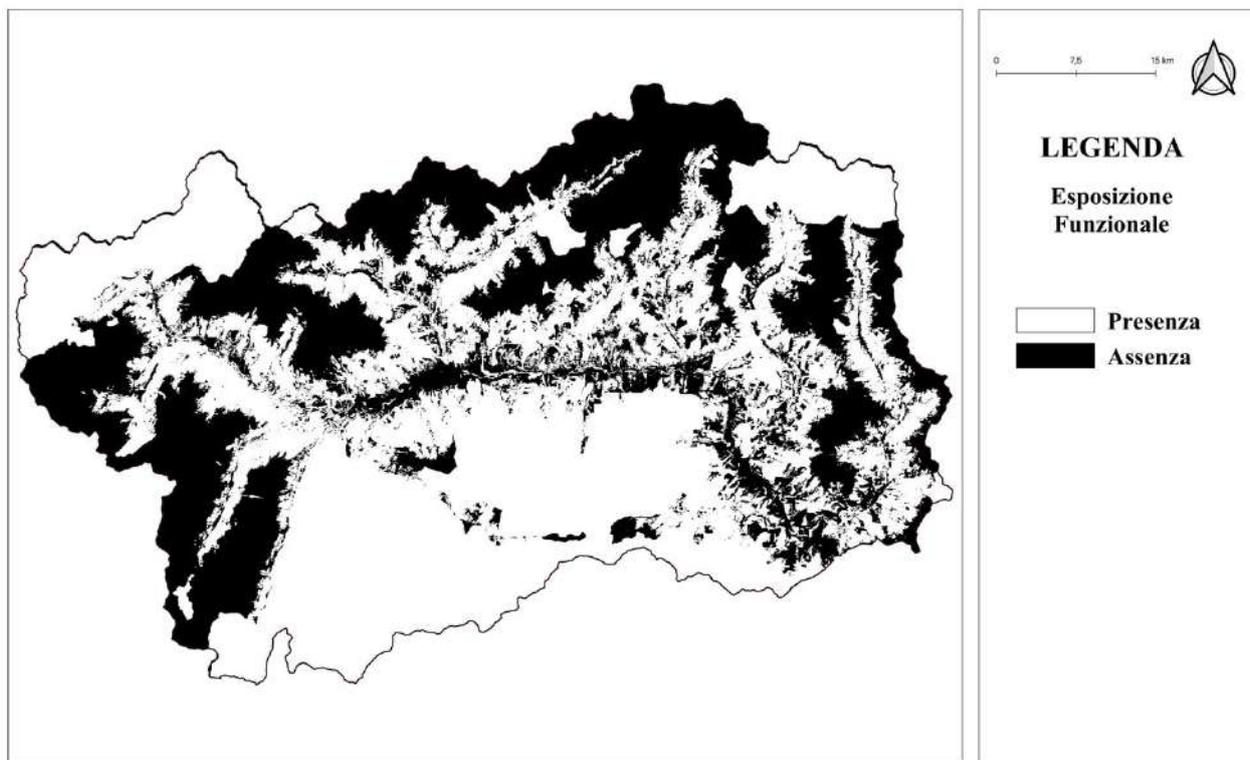


Figura 17 - Esposizione funzionale.

3.2. Vulnerabilità ecologica

La vulnerabilità ecologica è lo strato informativo che classifica l'esposizione funzionale, realizzando un gradiente di vulnerabilità degli elementi di vulnerabilità da 1 (Molto bassa) a 5 (Molto alta). La vulnerabilità ecologica rappresenta la sensibilità dell'ecosistema forestale e delle sue funzioni al disturbo da fuoco, ed è definita come la capacità di resistenza e resilienza in seguito al passaggio del fuoco. La vulnerabilità ecologica è espressa in 5 classi (Molto bassa, Bassa, Media, Alta, Molto alta; Figura 8), definite tramite la combinazione di altrettante classi di stabilità (Figura 9) e del degrado (Figura 10) tramite un'apposita matrice di combinazione (Tabella 7).

La stabilità rappresenta la resistenza e resilienza degli ecosistemi al passaggio del fuoco; alle categorie forestali e agli altri usi del suolo è stata assegnata una classe di stabilità da 1 (molto stabile) a 5 (poco stabile) in base alle caratteristiche di resistenza al passaggio di un incendio e alla capacità di rinnovazione/ripristino post-incendio (Tabella 8). Il degrado è rappresentato dall'erosione del suolo dopo il passaggio di un incendio; l'erosione del suolo viene quantificata tramite il calcolo della Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) proposta da Renard et al. (1997)³ ipotizzando il passaggio del fuoco su tutto il territorio regionale:

$$A = R \times K \times LS \times C$$

dove:

A: suolo asportato dall'erosione idrica ($t \cdot ha^{-1} \cdot anno^{-1}$);

R: fattore di erosività delle precipitazioni ($MJ \cdot mm \cdot h^{-1} \cdot ha^{-1} \cdot anno^{-1}$) (JRC^4);

K: fattore di erodibilità del suolo, che è la perdita di suolo per unità di R ($t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$);

LS: fattore di lunghezza e pendenza del versante (adimensionale);

C: fattore di copertura del suolo, pari a 0.3^5 per simulare il passaggio di un incendio su tutta la superficie regionale.

Il degrado è stato classificato in 5 classi utilizzando le soglie in Tabella 9.

Tabella 13 - Matrice di combinazione della classe di Vulnerabilità ecologica, come combinazione della stabilità con il degrado.

	Degrado					
	Vulnerabilità ecologica	Molto bassa	Bassa	Media	Alta	Molto alta
Stabilità	Molto bassa	Alta	Molto alta	Molto alta	Molto alta	Molto alta
	Bassa	Media	Alta	Molto alta	Molto alta	Molto alta
	Media	Bassa	Media	Alta	Alta	Molto alta
	Alta	Molto bassa	Bassa	Media	Media	Alta
	Molto alta	Molto bassa	Molto bassa	Bassa	Bassa	Media

Tabella 14 - Classi della componente di stabilità assegnate a categorie forestali e altri usi del suolo.

Categorie forestali/uso del suolo	Classe di stabilità
Lariceti e cembrete	3
Peccete	2
Pinete di pino silvestre	2
Acero-tiglio-frassineti	3
Castagneti	5
Querceti di roverella	5
Saliceti e pioppeti ripari	3
Alneti planiziali e montani	4
Arbusteti subalpini	5
Robinieti	4
Boscaglie pioniere e d'invasione	4
Querceti di rovere	5
Faggete	3
Abetine	2
Pinete di pino uncinato	2
Rimboschimenti	2
Arbusteti	5
Aree urbanizzate e antropiche	0
Colture legnose	1
Corpi d'acqua	0
Corsi d'acqua	0
Ghiacciai e nevai	0
Praterie naturali e pascoli alpini	4
Prato-pascoli	4
Roccia affiorante	0
Vegetazione erbacea discontinua di medio bassa quota	1
Vegetazione erbacea sparsa di alta quota	1
Zone umide alpine	5

Tabella 15 - Classi della componente del degrado.

Classi di degrado	Soglie (t/ha/anno)
Molto bassa	0-100
Bassa	100-200
Media	200-300
Alta	300-400
Molto alta	>400

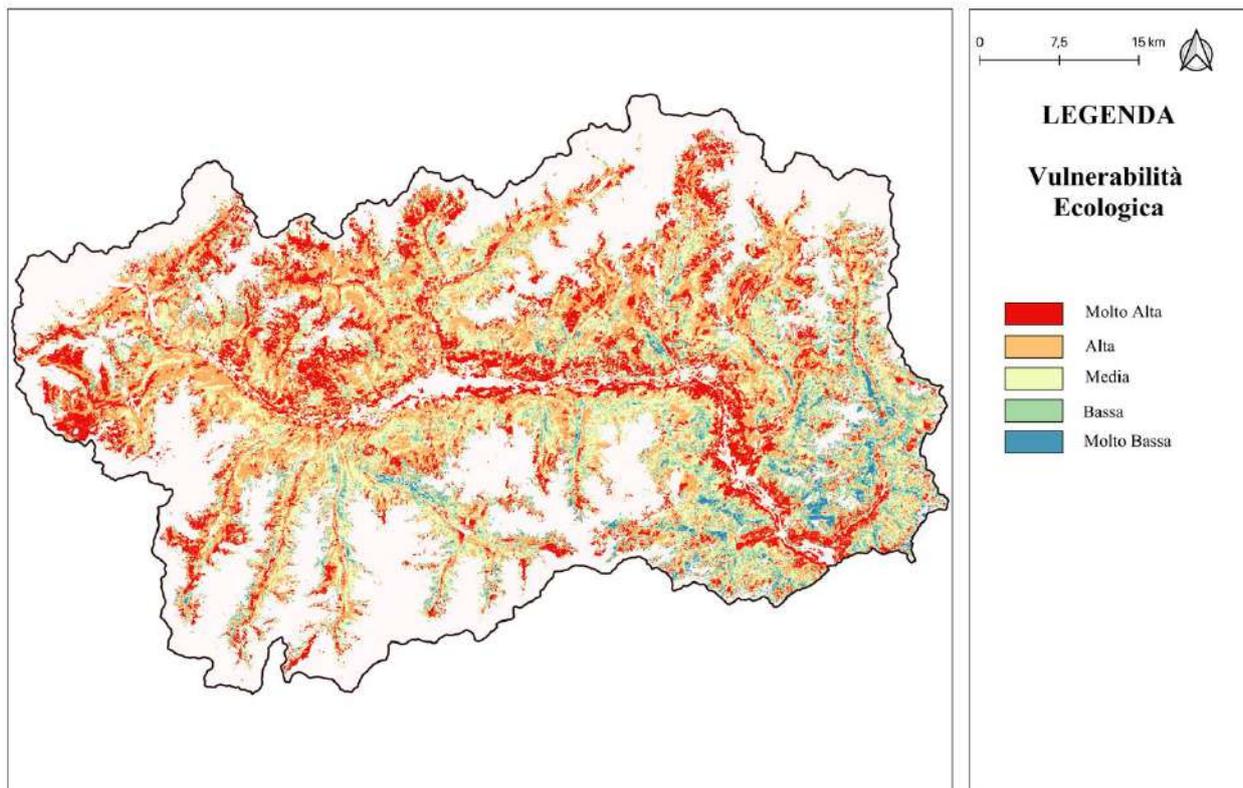


Figura 18 - Vulnerabilità ecologica.

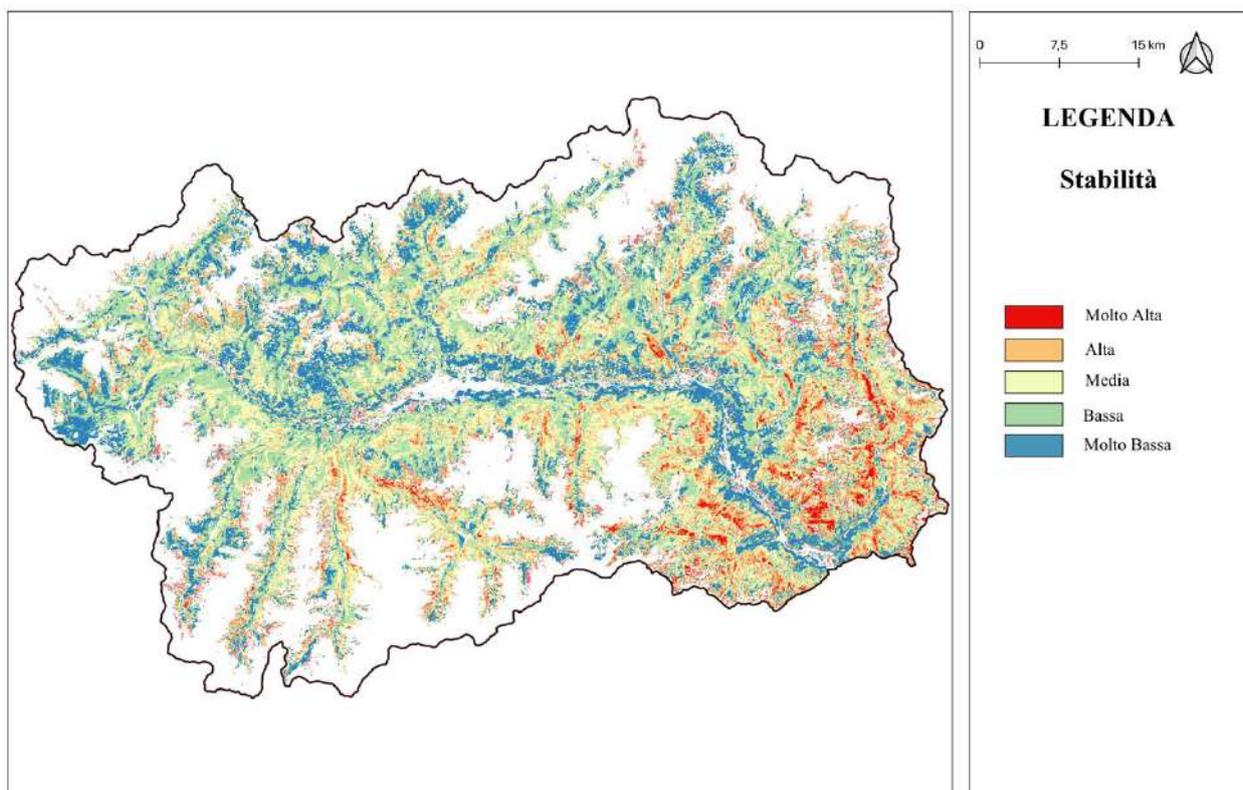


Figura 19 - Stabilità.

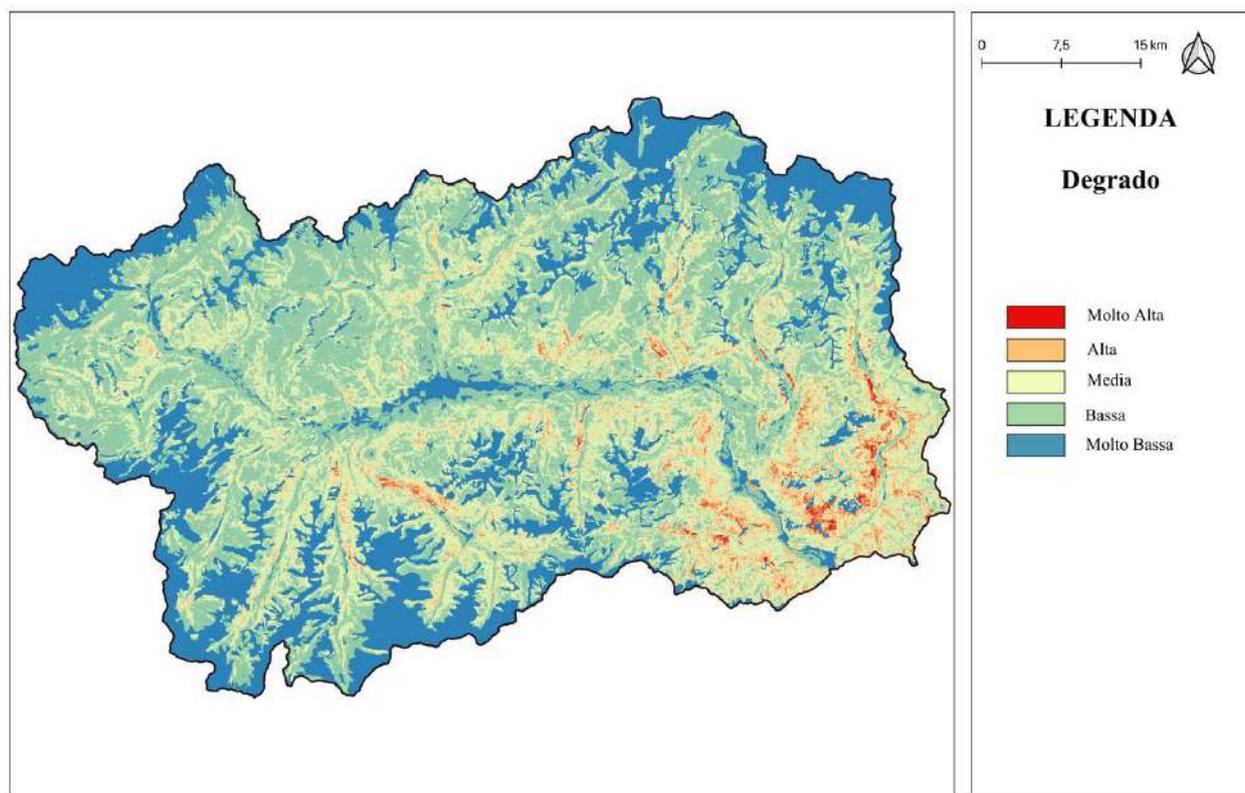


Figura 20 - Degrado.

4. RISULTATI DELLA MAPPATURA DEL DANNO POTENZIALE

Le carte del danno potenziale d'interfaccia e del danno potenziale funzionale risultanti dalle analisi condotte hanno consentito di classificare il territorio regionale in 5 classi, da Molto Bassa a Molto Alta. E' emerso che il territorio regionale risulta essere distribuito nelle 5 classi di danno potenziale d'interfaccia e di danno potenziale funzionale, rispettivamente:

- danno potenziale d'interfaccia: 11.1% in classe Molto bassa; 2.7% in classe Bassa; 0.8% in classe Media; 0.6% in classe Alta; 0.5% in classe Molto alta;
- danno potenziale funzionale: 64.5% in classe Molto bassa; 13.5% in classe Bassa; 15.2% in classe Media; 5.1% in classe Alta; 1.7% in classe Molto alta.

COMPONENTI DEL DANNO POTENZIALE

Elenco delle componenti del Danno potenziale d'interfaccia e relativi strati cartografici di partenza e metodo e criteri di classificazione.

Componente Danno potenziale d'interfaccia	Strati cartografici	Classificazione e criteri utilizzati
ESPOSIZIONE DI INTERFACCIA	Carta dell'interfaccia (D'Este et al., 2021) ⁸ ; buffer di 200 m di raggio intorno alle aree attrezzate e campeggi; buffer di 100 m intorno alla viabilità.	Classificazione binaria 0 – 1 del territorio in base a presenza o assenza dell'elemento di interfaccia.
VULNERABILITÀ DI INTERFACCIA	Carta dell'interfaccia (D'Este et al., 2021) ⁸ ; buffer di 200 m di raggio intorno alle aree attrezzate e campeggi; buffer di 100 m intorno alla viabilità.	Classificazione in 5 classi : interfaccia urbano-rurale a partire dalle 9 classi di D' D'Este et al. (2021) ⁸ , con assegnazione della classe Molto alta ad aree attrezzate e campeggi; classificazione interfaccia viabilità-urbano utilizzando i criteri: i. tipologia di strada, ii. Quota, iii. Distanza inferiore a 100 m dal perimetro degli incendi storici.

Elenco delle componenti del Danno potenziale funzionale e relativi strati cartografici di partenza e metodo e criteri di classificazione.

Componente Danno potenziale funzionale	Componente	Strati cartografici	Classificazione e criteri utilizzati
ESPOSIZIONE E FUNZIONALE E	Funzione Naturalistica	Carta dei parchi naturali (comprendente Riserve regionali e nazionali, Parchi regionali e nazionali)	Classificazione binaria 0 – 1 del territorio a seconda della presenza o assenza dei parchi naturali.
		Carta categorie forestali	Classificazione binaria 0 – 1 del territorio a seconda della presenza o assenza di categorie forestali in classe 4-5 di High Natural Values (Tabella 7).
		Siti della Rete Natura 2000	Classificazione binaria 0 – 1 del territorio a seconda della presenza o assenza Habitat della Rete Natura 2000.
	Funzione Protezione diretta	Carta delle foreste di protezione diretta	Classificazione binaria 0 – 1 del territorio a seconda della presenza o assenza di foreste di protezione diretta.
	Funzione Carbon stock	Carta biomassa ²	Classificazione binaria 0 – 1 del territorio a seconda della presenza o assenza di elevato carbon stock (Soglia: 140 t/ha)
	Percorrenza	Boschi percorsi da incendi almeno una volta negli ultimi 15 anni	Classificazione binaria 0 – 1 del territorio a seconda della presenza o assenza di superfici percorse dagli incendi.

VULNERABILITÀ ECOLOGICA	Stabilità	Carta uso del suolo	Classificazione della carta derivata dall'unione della carta di uso del suolo e della carta delle categorie forestali in 5 classi in base alla resistenza e resilienza dell'ecosistema.
		Carta categorie forestali	
	Degrado	Equazione RUSLE per quantificare il grado di erosione del suolo	Classificazione della carta dell'erosione del suolo in 5 classi utilizzando come soglie: 100 – 200 – 300 – 400 t/ha/anno.

Analisi del rischio

1. Rischio di interfaccia
2. Rischio funzionale
3. Rischio di incendio

BIBLIOGRAFIA

- 1- Finney, M.A. 2004. Landscape fire simulation and fuel treatment optimization. In: Hayes, J.L.; Ager, A.A.; Barbour, R.J., tech. eds. Methods for integrating modeling of landscape change: Interior Northwest Landscape Analysis System. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-610. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station: 117-131. Chapter 9.
- 2- Rothermel, Richard C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Res. Pap. INT-115. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 p.
- 3- Scott, J. and Burgan, R. (2005). Standard fire behavior fuel models : a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-153, 72 pp.
- 4- <https://tinality.pi.ingv.it>
- 5- <https://geoportale.regione.vda.it/>
- 6- Riano D., Chuvieco E., Condés S., González-Matesanz J., & Ustin S. L. (2004). Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L. from lidar. Remote Sensing of Environment, 92(3), 345-352.
- 7- Pyne, S. J. (1996). Introduction to Wildland Fire.
- 8- D'Este, M., Giannico, V., Laforteza, R., Sanesi, G., & Elia, M. (2021). The wildland-urban interface map of Italy: A nationwide dataset for wildfire risk management. Data in brief, 38, 107427. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340921007095#sec0008>
- 9- Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2018. ISPRA. <https://www.isprambiente.gov.it/it/evidenza/pubblicazioni/no-homepage/consumo-di-suolo-dinamiche-territoriali-e-servizi-ecosistemici.-edizione-2018>
- 10- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K, and Yoder, D.C., coordinators. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Dept. of Agriculture, Agric. Handbook No. 703, 404 pp.
- 11- Borrelli, P., Diodato, N., Panagos, P. 2016. Rainfall erosivity in Italy: a national scale spatio-temporal assessment. International Journal of Digital Earth. In Press. DOI:10.1080/17538947.2016.1148203, <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/r-factor-italy>
- 12- Erosione del Suolo e sviluppo rurale, Bazzoffi Paolo. Edagricole, 2007.