

GESTI.S.CO.

“Gestione delle emergenze senza confini”

Interreg V-A Italia - Svizzera 2014 – 2020

Asse 5 Obiettivo Specifico 5.1.

id: 475062

WP	WP3 Rafforzamento del quadro comune di informazioni
Attività	3.3 Analisi territoriale dei rischi e scenari di evento
Prodotto	P16: Piattaforma mappe territoriali del rischio naturale e degli scenari di evento transfrontalieri corredate da documento di analisi
Versione	1.00
Data	14 aprile 2021

ANALISI TERRITORIALE DEI RISCHI E SCENARI DI EVENTO

Elaborato a cura di: Politecnico di Milano e Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana



Sommario

Sommario.....	2
1. Introduzione	6
2. Area di studio.....	10
2.1. Breve inquadramento territoriale	10
2.2. Criteri adottati per la perimetrazione dell'area di studio	11
2.3. Area di studio selezionata	12
3. DEM dell'area di studio.....	15
3.1. Introduzione.....	15
3.2. Dati di input.....	15
3.3. Workflow.....	16
3.4. Prodotto.....	20
4. Note di metodo per la mappatura di suscettibilità per il rischio idraulico e da incendio boschivo	22
4.1. Il modello statistico di riferimento per le due analisi	22
5. Alluvioni	25
5.1. Introduzione.....	25
5.2. I concetti di pericolosità e suscettibilità nel rischio alluvioni.....	26
5.3. Dati di input al modello	31
Dati storicamente osservati (dataset di calibrazione)	31
Modello digitale del terreno.....	32
Strati informativi relativi ai fattori predisponenti	33
5.4. La definizione dei fattori predisponenti	36
Pendenza locale	37
Curve Number	37



Quota relativa	37
Distanza dal reticolo idrografico.....	37
5.5. Applicazione del metodo statistico	38
Pendenze locali	39
Curve Number	41
Quote relative	42
Distanze dal reticolo idrografico.....	44
5.6. Risultati.....	45
5.7. Sviluppi futuri.....	50
6. Incendi boschivi	51
6.1. Introduzione.....	51
6.2. Il dataset.....	51
6.3. Fattori predisponenti.....	54
Quote	55
Esposizione	56
Slope.....	57
Copertura del suolo e rischio di incendio.....	58
Distanza dalla rete sentieristica.....	60
Distanza da urbanizzato e seminativi	61
Distanza dai laghi	61
6.4. Risultati.....	64
6.5. Sviluppi futuri.....	68
7. Frane superficiali	70
7.1. Introduzione.....	70
7.2. Dati di input ai modelli	71
Dati topografici.....	72

Dati geologici	72
Dati di copertura del suolo	75
Dati pluviometrici	76
7.3. Modello speditivo	77
Risultati	80
7.4. Modello in transitorio	85
Caso di studio – Bacino del Cassarate, Val Colla, Canton Ticino	88
7.5. Sviluppi futuri	104
8. Frane da crollo	105
8.1. Premessa e obiettivi dello studio	105
8.2. Dati di base	105
Dati non trattati	106
Dati trattati	106
8.3. Criteri generali delle simulazioni di propagazione	106
Regolazione dell'estensione laterale	107
Regolazione della distanza di propagazione	107
8.4. Metodo dettagliato e comparazione con lo studio Terranum	108
Identificazione delle zone di distacco	108
Modello di propagazione	109
8.5. Risultati	110
9. Allegati	115
9.1. Elenco delle tavole	115
Bibliografia	121
ALLEGATO 1: Elenco comuni rientranti nell'area di studio dell'attività del WP 3.3	116
Provincia di Como	116
Provincia di Varese	117





Canton Ticino..... 119



1. Introduzione

Il presente rapporto riporta parte dei risultati intermedi del progetto Interreg GESTI.S.CO, nato come seguito dell'esercitazione Odescalchi 2016 Italia-Svizzera, per rafforzare la Governance Transfrontaliera nella gestione delle emergenze nell'area transfrontaliera. In particolare, si riporta una serie di studi svolti da Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana – Istituto scienze della Terra (SUPSI-IST) e Politecnico di Milano – Polo di Lecco (POLIMI), volti alla realizzazione di carte di suscettibilità ai processi di crollo, scivolamenti superficiali, incendi boschivi e alluvionamenti.

L'obiettivo del Work Package 3 del progetto, di cui si tratta, mira infatti ad ottenere un quadro delle criticità riguardanti i pericoli naturali distribuiti sul territorio transfrontaliero ai fini di un miglioramento della gestione delle emergenze, tanto in ambito istituzionale (centri operativi, piani di emergenza, centri di coordinamento) che operativo (formazione di volontariato e operatori, dotazioni degli operatori, informazione ai cittadini), in un'ottica di aumento della efficienza di intervento e della resilienza delle comunità locali.

L'area del progetto comprende la fascia di territorio transfrontaliero che coinvolge buona parte del Ticino meridionale (da Bellinzona verso Sud), lato svizzero, e i territori di interesse transfrontaliero delle province di Como e Varese in Lombardia. I criteri di attribuzione dei diversi territori all'interno dell'area di progetto saranno esplicitati nel Capitolo 2.

L'area è sostanzialmente omogenea dal punto di vista morfologico, idrologico e di uso dei suoli. Questo aspetto rende altrettanto omogenea la vocazione ai dissesti, soprattutto per quanto riguarda quelli gravitativi di versante, le alluvioni e gli incendi boschivi e di interfaccia. A tale sostanziale unicità fisica non corrisponde come è noto quella politica, essendo il territorio ripartito tra i due stati italiano ed elvetico. Al contrario, la natura degli eventi, tanto per la loro genesi che per la successiva dinamica degli effetti al suolo, tende a ignorare la ripartizione geografica e a determinare criticità comuni ai due Paesi. Alla rammentata pericolosità di origine naturale, si aggiunge quella indotta dalla presenza di importanti nodi infrastrutturali, con il duplice effetto di determinare una esposizione particolarmente critica al dissesto, associata alla produzione di ulteriori importanti componenti di rischio di ordine antropico, primo tra tutti quello trasporti.

Proprio nelle osservazioni drasticamente sintetizzate nelle righe precedenti, è contestualizzata l'origine del progetto di cui si tratta. La diversa titolarità statale su aree del medesimo territorio è poi ulteriormente complicata dal fatto che l'Italia è parte, oltreché Stato fondatore, della Comunità europea, mentre la Svizzera è, a tutti gli effetti, un paese extracomunitario.



La Comunità interviene sovente con Direttive quadro, basti pensare alla 2000/60/CE sulle acque, alla 2007/2/CE che istituisce un'infrastruttura per l'informazione territoriale nella Comunità europea, alla 2007/60/CE sul rischio alluvione mirate a uniformare l'azione dei paesi membri soprattutto su quei temi che potrebbero essere oggetto di interazioni rilevanti. Tali azioni, protratte nel corso del tempo, hanno determinato una ragionevole omogeneità territoriale a livello globale, tanto rispetto alla valutazione e gestione dei rischi che alla relativa rappresentazione cartografica. Ad esempio, la pericolosità da alluvione è ripartita e rappresentata territorialmente su tre classi in tutto il territorio comunitario, tali fasce sono organizzate su eventi della medesima intensità e rappresentate in modo analogo.

Gli stati europei dispongono altresì di un "Meccanismo europeo di protezione civile" (MEPC) nato per rispondere tempestivamente ed in maniera efficace alle emergenze attraverso la condivisione delle risorse degli Stati membri. Tale meccanismo non si sostituisce ai sistemi nazionali, ma vi aggiunge un ulteriore livello di sussidiarietà, in base al quale le azioni sono intraprese in coordinamento e su richiesta dello Stato colpito in caso di eventi di particolare rilevanza e, più in generale, ogni qualvolta se ne vena a palesare la necessità. Oltre ai 28 paesi membri, fanno parte del MEPC la Norvegia, Islanda e Liechtenstein.

La Svizzera, pur essendo geograficamente incastonata nel cuore dell'Unione, presenta storicamente un proprio approccio alla gestione (tra le altre cose) dell'area tematica che a livello europeo è generalmente denominata come "protezione civile". Si tratta, per la parte elvetica, di una cultura organizzativa profondamente radicata nella tradizione nazionale che peraltro si è sempre caratterizzata con una propria orgogliosa singolarità nell'ambito del Continente.

La gestione transfrontaliera delle emergenze si è sempre pertanto presentata come un importante punto di discussione condivisa tra i due Stati che, nel corso del tempo, ha segnalato numerosi positivi passi avanti. Di questi aspetti si è dato ampio conto nell'ambito del Progetto e lì si rimanda per ogni approfondimento.

Lo specifico prodotto, oggetto del presente rapporto, tratta appunto della mappatura dei pericoli. Si tratta chiaramente di un punto focale nella gestione dell'emergenza che coinvolge direttamente l'operatività, sia in fase di prevenzione che di contrasto dell'evento dannoso. In questo senso segnaliamo difficoltà di ordine semantico, dovute al lessico tecnico che, per i due Paesi, mostra numerosi elementi di forte discordanza e del quale ci siamo altresì occupati in altra parte del Progetto (prodotto P5-A3.1). Tali aspetti sono tuttavia comuni in ambito di gestione dell'emergenza, attività alla quale sono sovente reclutati volontari da ogni parte del Paese colpito e talvolta da ogni parte del mondo. L'aspetto più complesso e delicato è invece quello di ordine sostanziale legato alla stessa



concezione delle mappe, sviluppate per i due Paesi sulla base di tipologie di fenomeni e indicatori che testimoniano concettualizzazioni profondamente diverse dei fenomeni e della loro gerarchizzazione.

In questo report diamo conto di un esperimento mirato alla realizzazione di mappe nativamente sviluppate “a quattro mani”, sia dal lato italiano che da quello Svizzero del confine, che consentano una gestione del rischio condivisa a partire dalla analisi dei fenomeni e alla conseguente rappresentazione ai fini della loro gestione. Tale lavoro non ha ovviamente alcuna pretesa di sostituirsi a procedure già consolidate sui due lati del confine, ma resta un esperimento di indubbio interesse e che prospetta numerosi sviluppi e ricadute positive.

Per questa ragione si voluto ricorrere ad un approccio che, per quanto già presente nelle attività di prevenzione di ambedue gli Stati, non rientra ancora pienamente tra gli strumenti primari per la valutazione e gestione del rischio naturale. Si tratta del concetto di “susceptività” o “susceptibilità” (i due termini sono equivalenti) che, nella letteratura scientifica, denota la propensione di un’area di territorio ad essere colpita da una determinata minaccia in termini di rischio naturale. L’analisi, in buona sostanza, si basa sulle caratteristiche geolitologiche, morfologiche e di uso del suolo, che rendono uno specifico sito più o meno incline a subire un determinato fenomeno calamitoso.

Altresì è interessante sottolineare che l’analisi, quantomeno in linea generale, non si limita alla statica constatazione delle caratteristiche del territorio, ma le pone in relazione con l’effettivo occorrere dei fenomeni sulla base dell’indagine storica. Si tratta dunque di un approccio che “apprende dall’esperienza” attraverso un sistema esperto che, a seconda dei fenomeni, è basato su diverse classi di algoritmi descritte nel corso di questa relazione.

In particolare, si potrà osservare, che, in particolare per quanto riguarda le alluvioni e gli incendi boschivi, si fa riferimento a un set di fattori predisponenti la cui ricorrenza statistica, è valutata nelle aree vulnerate nelle diverse combinazioni. L’analisi di inferenza fornisce il tasso di susceptibilità. Per le frane, in generale, ci si basa invece su modelli meccanici a diverso livello di complessità.

La susceptività di un certo sito non implica necessariamente un livello di probabilità di accadimento, come accade ad esempio nel caso delle alluvioni per le quali, in generale, si individuano perimetri potenzialmente inondabili, associati a diversi tempi di ritorno. Questo fatto è dovuto ai dati storici usati nella fase di addestramento che, di regola, forniscono uninformazione di tipo binario sul fatto che un certo pixel del territorio sia stato più o meno vulnerato, senza alcuna ulteriore indicazione di intensità. In tal modo non sussiste la possibilità di assegnare al modello l’ulteriore dimensione parametrica della frequenza.

Conviene riflettere ancora su questo punto, ed è comodo farlo con riferimento alla pericolosità idraulica. I modelli in frequenza sono per lo più legati alla necessità della modellazione idraulica dei corsi d'acqua. L'analisi di frequenza dell'inondazione è trasferita a quella della precipitazione che, in condizioni standard, la va a determinare. La modellazione idrologica fa il resto, trasformando quella precipitazione in portate fluviali. La conseguente analisi idraulica, che trasforma portate in livelli, implica, a sua volta, la presenza di sezioni fluviali oltre ad ulteriori informazioni sulla scabrezza e la morfologia dell'ambiente ripario. Ne risulta necessariamente il fatto che tale approccio resti nei fatti confinato all'ambito dei corsi d'acqua maggiori. L'analisi di suscettività, essendo altresì svincolata dalla modellazione numerica idraulica, consente una copertura omogenea e completa del territorio. Quantomeno in maniera indiretta, consente dunque di valutare una generica propensione anche nei confronti dei fenomeni connessi ai rii minori, al ristagno ed a fenomeni più complessi quali, ad esempio, quelli connessi al rischio retroarginale. La ripartizione in fasce è svolta generalmente sui quantili relativi alla distribuzione dei valori e va dunque intesa come proxy della attitudine dello specifico luogo ad essere vulnerato.

Concludiamo questa introduzione ricordando che la analisi di suscettività al franamento superficiale è caratterizzata da contenuti più decisamente meccanici, ricorrendo all'equazione di equilibrio del pendio indefinito, applicata ad ogni singolo concio di terreno. Il modello idraulico utilizzato per l'umidità del suolo utilizza una analisi in moto vario, valutando nel tempo il flusso (e il conseguente accumulo o svuotamento) attraverso ciascun elemento finito del modello. È dunque possibile formulare diverse ipotesi sulla natura, intensità e durata della precipitazione ovvero ricostruire eventi osservati. Il territorio è inizialmente suddiviso in tre fasce, quella con assetto del suolo incondizionatamente instabile (e dunque la roccia nuda sulle alte pendenze), quella incondizionatamente stabile, (riferita alle pendenze più modeste), e quella intermedia ove la precipitazione intensa può andare ad attivare dissesti più o meno estesi. In questo specifico caso la suscettività al dissesto gravitativo risulta in qualche modo correlata con la frequenza dando luogo a fasce di diversa propensione al dissesto.



2. Area di studio

2.1. Breve inquadramento territoriale

L'area transfrontaliera compresa tra la sponda orientale del Lago Maggiore e quella occidentale Lago di Como è stata attentamente analizzata al fine di perimetrare l'area di primaria destinazione delle finalità promosse dal WP3 del progetto GESTI.S.CO. Lo studio è stato condotto in parallelo da SUPSI-IST per il Canton Ticino e POLIMI per Regione Lombardia (Figura 1).

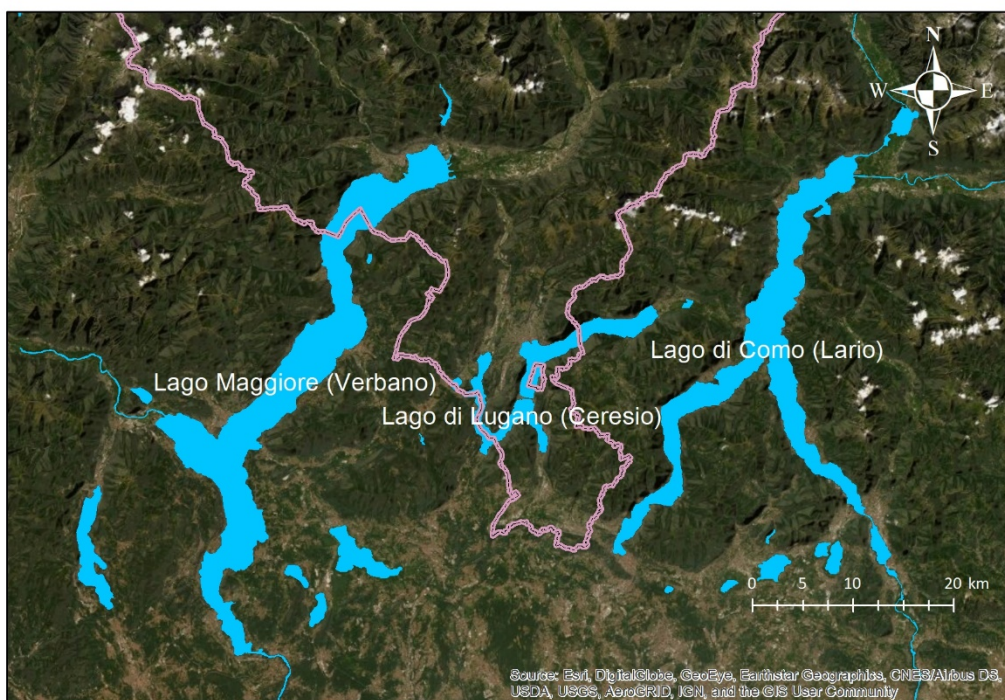


Figura 1. Territorio di riferimento per il progetto GESTI.S.CO.

Il territorio in questione corrisponde, secondo la Suddivisione Orografica Internazionale Unificata del Sistema Alpino (SOIUSA), alle Prealpi Luganesi, sezione delle Alpi Nord-Occidentali. Oltre al sistema orografico prealpino, il territorio è caratterizzato da un'importante idrografia transfrontaliera: il fiume Ticino, il fiume Tresa e i grandi laghi del Verbano e del Ceresio consolidano l'identità di questa regione.

Dal punto di vista amministrativo, l'area è suddivisa tra Canton Ticino e Regione Lombardia. Il confine italo-elvetico non segue in questa regione la linea dello spartiacque alpino, ma attraversa un territorio morfologicamente omogeneo. I due Paesi si trovano quindi a condividere un territorio che è un *unicum* dal punto di vista geomorfologico, idrologico ed ecosistemico.

Oltre ai fattori naturali, Lombardia e Canton Ticino condividono nell'area di interesse anche la stessa lingua e diversi elementi di carattere culturale. Non di minore importanza sono poi le forti connessioni anche sul piano socioeconomico: nel terzo trimestre del 2020 sono stati oltre 70 mila i frontalieri italiani registrati in Canton Ticino (Ufficio federale di statistica).

2.2. Criteri adottati per la perimetrazione dell'area di studio

I criteri adottati per identificare i comuni lombardi da includere nell'area di studio possono essere riassunti in due tipologie:

1. *Criteri derivanti dall'analisi del territorio dal punto di vista dei rischi naturali transfrontalieri*

La caratterizzazione geomorfologica dell'area ha consentito di definire criteri di inclusione alla mesoscala direttamente connessi alla predisposizione dei territori alla condivisione di scenari di rischio considerati. Sono stati pertanto presi in considerazione i principali sistemi boschivi, la distribuzione del territorio nelle fasce altimetriche rilevanti per il fenomeno considerato, le linee di deflusso che compongono la rete idrografica, le linee spartiacque e la copertura del suolo.

2. *Criteri legati all'ambito amministrativo, in particolar modo per quanto riguarda la funzione di protezione civile*

Sono stati considerati anche criteri di carattere organizzativo, in particolare, sono stati individuati i comuni con funzioni amministrative in condivisione, strutturati in unioni di comuni (DGR n. 7595 del 29/06/2020) o solamente con funzione di protezione civile condivisa, tramite la redazione intercomunale di piani di protezione civile o per quanto riguarda i gruppi di volontariato. Si è inoltre tenuto conto della suddivisione del territorio in zone omogenee di allerta, per quanto attiene al rischio Idro-Meteo, operata da Regione Lombardia (DGR n. X/4599 del 17/12/2015).

I comuni svizzeri dell'area di studio appartengono invece tutti al Canton Ticino e sono stati selezionati da SUPSI-IST, di comune accordo con il capofila svizzero. I comuni selezionati sono localizzati in gran parte nel Ticino meridionale (distretti di Mendrisio e Lugano) e sono delimitati a nord dai distretti di Bellinzona e dalla parte meridionale del distretto di Locarno. La selezione dei comuni per il Ticino si è basata, in via generale, sul primo criterio applicato per il lato italiano. L'area ricalca inoltre in gran parte quella già individuata nel progetto Interreg gemello SiCt – Sicurezza delle Infrastrutture Critiche transfrontaliere.

2.3. Area di studio selezionata

L'area di studio identificata applicando i criteri di cui sopra è illustrata in Figura 2. Essa si estende su una superficie di 2204 km² e comprende 240 comuni, di cui 150 siti in territorio italiano e 90 in territorio elvetico. La selezione non comprende solamente i comuni contigui al confine tra i due Paesi ma si allarga a una fascia più ampia, dove il carattere transfrontaliero è percepibile all'interno degli scenari di rischio analizzati.

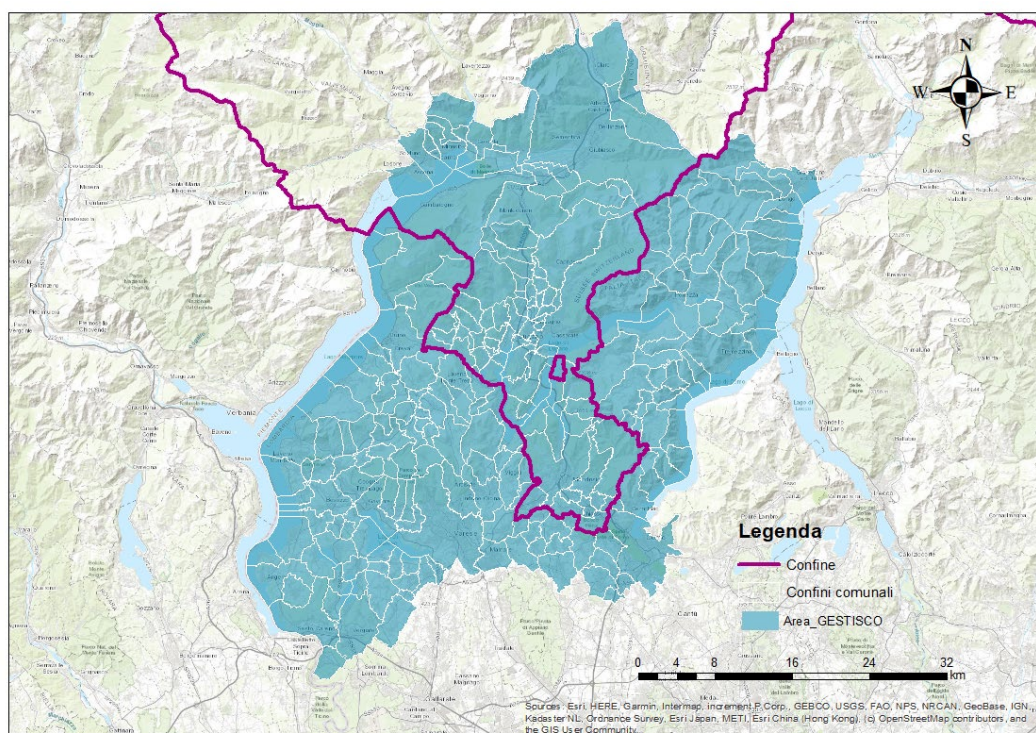


Figura 2. Area di studio selezionata per l'attività A 3.3 del progetto.

L'area lombarda selezionata è inserita all'interno delle province di Como e Varese ed è limitata come segue:

- a Nord dal confine italo-elvetico e dai comuni della parte settentrionale della provincia di Como che sono in contatto con il Canton Ticino;
- ad Est dalla sponda occidentale del Lago di Como;
- ad Ovest dalla sponda orientale del Lago Maggiore;
- a Sud il confine dell'area di studio è tracciato seguendo i limiti amministrativi dei comuni presenti lungo l'asse Como – Sesto Calende (VA), dove è presente lo sbarramento della Miorina per la regolazione del Verbano. In particolare, il confine meridionale dell'area coincide con il confine

delle zone omogenee di allerta Idro-Meteo della Regione, nello specifico Laghi e Prealpi Varesine IM-04, Lario e Prealpi Occidentali IM-05, Nodo idraulico di Milano IM-09 (Figura 3).

L'analisi alla mesoscala ha consentito di giustificare l'alienazione della zona meridionale delle province di Como e Varese e della zona del Triangolo Lariano e della parte settentrionale della provincia di Como dagli scenari transfrontalieri di rischio naturale. In particolare, si osserva che il tracciato del confine Sud dell'area GESTI.S.CO corrisponde alla suddivisione operata da Regione Lombardia per le zone d'allerta per il rischio Idro meteorologico. Si è ritenuto opportuno escludere i comuni facenti parte della zona omogenea afferente al nodo idraulico di Milano in quanto molto diversa dal punto di vista della tipologia di eventi e della morfologia al territorio di frontiera.

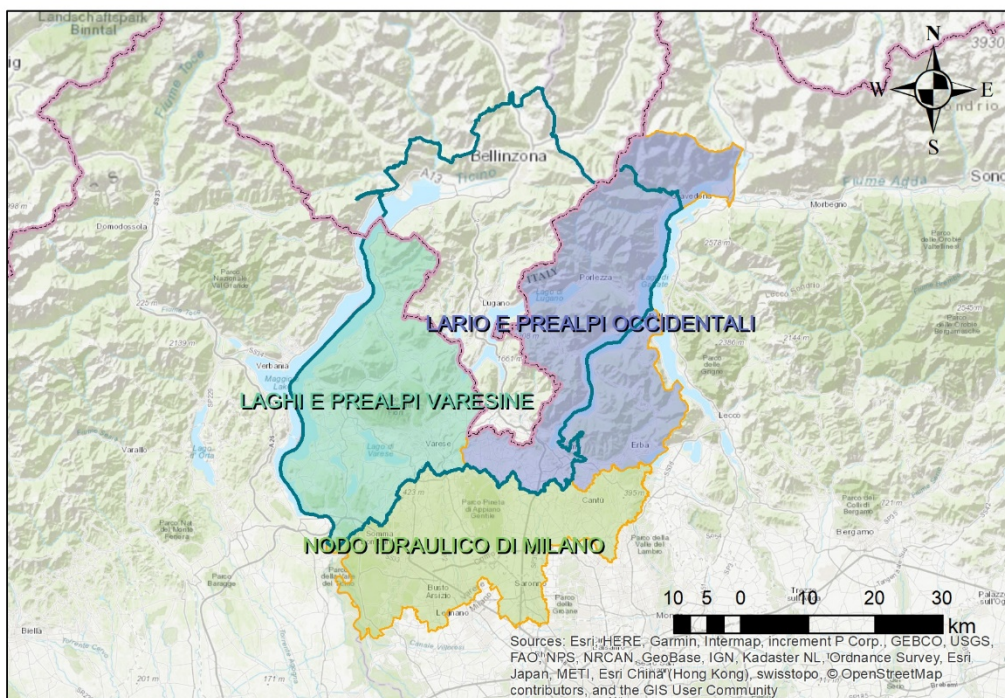


Figura 3. Zone di allerta Idro Meteo definite dalla Regione Lombardia

L'importanza interazionale del bacino del Lago Maggiore giustifica l'inclusione dei comuni del basso Verbano, collocati in un territorio pianeggiante molto ricco di evidenze storiche di alluvioni, caratteristica che rende la loro considerazione estremamente importante per l'analisi di suscettività da alluvione nei fondivalle.

Si riportano in breve le motivazioni per la non inclusione di alcune aree delle province di Como e Varese:

- a) La parte settentrionale della provincia di Como, essendo confinante con il Cantone dei Grigioni, non è stata inclusa all'interno dell'area di studio in quanto gli obiettivi del progetto riguardano l'individuazione di scenari transfrontalieri tra Regione Lombardia e Canton Ticino.
- b) Il Triangolo Lariano, pur avendo rapporti economici e sociali con il Canton Ticino, agevolati dalla vicinanza geografica e dalle vie di comunicazioni, non evidenzia scenari alla mesoscala di rischio transfrontaliero, per la netta separazione operata dal ramo occidentale del lago di Como.
- c) Allo stesso modo, le zone meridionali pianeggianti delle province di Como e Varese, connesse idraulicamente al nodo di Milano, non sono di interesse per lo studio dei rischi naturali in area transfrontaliera.

Per quanto riguarda invece la Svizzera, i comuni dei distretti di Lugano e Mendrisio sono stati inclusi in quanto il territorio si incunea naturalmente in quello italiano. Si è deciso di includere anche la parte più meridionale del Sopraceneri, vale a dire la fascia tra Locarno e Bellinzona, in quanto i rischi naturali presenti possono avere una conseguenza diretta o indiretta anche sui limitrofi comuni italiani. Tra queste vi sono l'area del Bellinzonese e del Gambarogno: la prima è interessata in particolar modo da fenomeni di incendi boschivo nella fascia montana di confine, mentre la seconda è considerata strategica in quanto rappresenta una zona di transito di persone e di merci, anche pericolose. Quest'ultima, oltre ad essere interessata da frequenti fenomeni di dissesto su strada e ferrovia, è stata individuata come area chiave dell'esercitazione Odescalchi 2022.

La parte occidentale del Canton Ticino, essendo confinante con la regione Piemonte, non è stata inclusa all'interno dell'area di studio in quanto gli obiettivi del progetto riguardano l'individuazione di scenari transfrontalieri tra Regione Lombardia e Canton Ticino.

L'elenco completo dei comuni inclusi nell'area GESTI.S.CO è presente nell'ALLEGATO 1: Elenco comuni rientranti nell'area di studio dell'attività del WP 3.3.

3. DEM dell'area di studio

3.1. Introduzione

I modelli per l'investigazione della suscettività, suscettibilità o la predisposizione del territorio all'insorgere di un fenomeno di rischio naturale espliciti in questa relazione sono tutti DEM-based, dipendono cioè dal modello digitale del terreno (DTM), il quale assume quindi un'importanza strategica nell'ambito del progetto. È stato pertanto necessario ottenere uno strato informativo di riferimento completo per l'intera area di investigazione, omogeneo in termini di sistema di riferimento, risoluzione spaziale, metodologia e accuratezza e privo di discontinuità altimetriche lungo i limiti nazionali.

Maglia regolare e buona scala di risoluzione spaziale sono requisiti fondamentali per un DTM finalizzato alle analisi che verranno esposte nei seguenti capitoli. È per questi motivi che è stato escluso l'utilizzo del modello digitale del terreno già presente per l'intera area di interesse, il prodotto del progetto HELI-DEM, con una risoluzione spaziale non adatta alle finalità dell'attività A3.3 del WP3 del progetto GESTI.S.CO.

La risoluzione spaziale scelta è di 5 m, la quale consente un buon dettaglio per quanto riguarda le linee di flusso, senza risultare troppo dettagliato e quindi computazionalmente difficile da utilizzare. Ogni cella all'interno del raster è identificata mediante una coppia di coordinate X, Y e il valore della quota Z espresso in m s.l.m.

Il sistema di riferimento scelto per questo strato e conseguentemente per tutti gli ambienti di lavoro e gli strati prodotti in questo contesto è il WGS 84 con la proiezione UTM 32 N (codice EPSG 32632) in quanto perfettamente centrata sull'area di progetto.

3.2. Dati di input

Sono stati acquisiti i dati di base necessari per il Cantone Ticino e per le province lombarde di Como e Varese:

- DEM svizzero swissALTI3D
 - prodotto dall'Ufficio federale di topografia swisstopo
 - fornito da SUPSI-IST
 - celle regolari 2 x 2 m
 - sistema di coordinate: CH 1903+
 - fogli CN25 1312, 1313, 1314, 1332, 1333, 1334, 1352, 1353, 1373, 1374

- DEM italiano
 - fornito dal geoportale della Regione Lombardia
 - celle regolari 5 x 5 m
 - sistema di coordinate: WGS 84 UTM 32 N
 - provincia di Como e provincia di Varese
- Punti fissi altimetrici svizzeri
 - PFA1 swisstopo, misurazione nazionale
 - PFA2, misurazione cantonale
- Reticolo idrografico svizzero, VECTOR10, prodotto da swisstopo, fornito da SUPSI-IST
- Reticolo idrografico italiano
 - da CTR Regione Lombardia

3.3. Workflow

Il modello digitale swissALTI3D è stato sottoposto ad alcune operazioni preliminari: è stato necessario applicare la funzione di void filling, in particolare tra i diversi fogli con i quali è stato fornito il DTM svizzero.

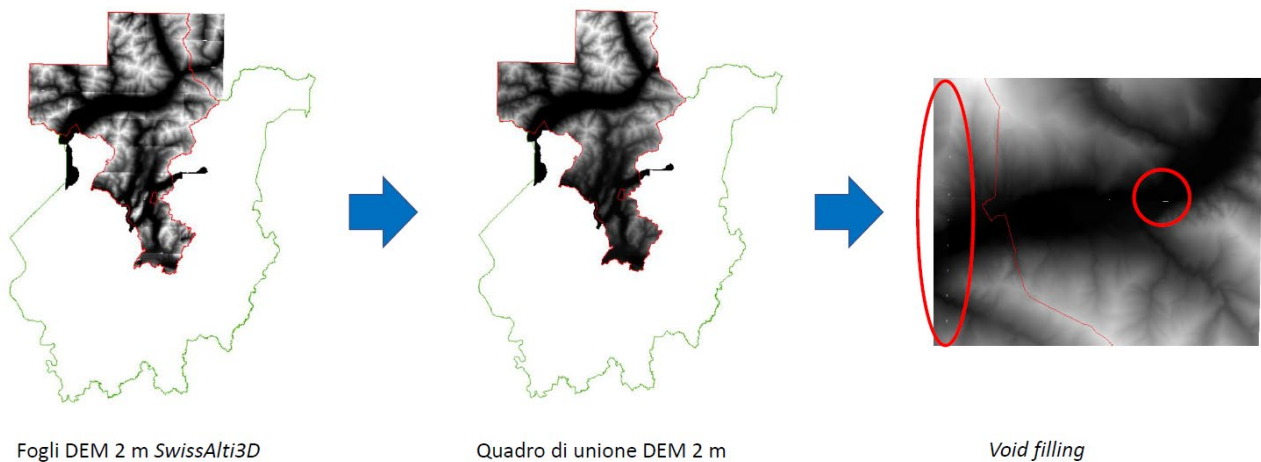


Figura 4. Operazione di void filling sui fogli swissALTI3D

In seguito a questa operazione è stato possibile ricampionare il DTM alla risoluzione spaziale desiderata, ovvero 5 m. A valle di questa operazione, per la validazione e il collaudo del DTM a 5 m della svizzera sono stati applicati test statistici utilizzando i punti fissi altimetrici.

Per il collaudo si è ricercata la accuratezza, ovvero il grado di prossimità di una grandezza osservata rispetto al valore reale della stessa grandezza in quanto l'indice di qualità utilizzato per la posizione di elementi geometrici viene comunemente espresso in termini di accuratezza.

La grandezza osservata sono le quote della mappa ottenuta in seguito al ricampionamento, mentre i valori reali sono le quote fornite dai punti fissi altimetrici, sorgente indipendente avente un'accuratezza molto più alta.

L'accuratezza viene solitamente espressa attraverso la radice dell'errore quadratico medio (Root Mean Square Error, RMSE) pari alla radice quadrata della media delle differenze al quadrato tra l'insieme delle quote stimate per certe coordinate e il valore effettivo della quota per i punti fissi:

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{m,i} - Z_{r,i})^2}{n}}$$

ove n è il numero di osservazioni di riferimento, $Z_{m,i}$ le quote da verificare e $Z_{r,i}$ le quote di riferimento dei punti fissi altimetrici.

Poiché la quota altimetrica di un punto è una variabile causale continua che può essere descritta per mezzo di una distribuzione normale, è possibile determinare la probabilità che il valore "vero" della grandezza sia compreso in un certo intervallo di confidenza. Il valore dei limiti dell'intervallo di confidenza con probabilità del 95% prende il nome di LE95 (Errore Lineare al 95% di probabilità) e viene comunemente utilizzato nelle normative internazionali come indice di qualità per l'accuratezza. In caso di campioni numerosi, come in questo caso, $LE95 = 1.960 RMSE$.

È stata calcolata la differenza tra la quota del DTM, ricampionato con diversi metodi (Figura 5), in corrispondenza di un punto fisso e la quota attribuita al punto fisso altimetrico corrispondente ed è stato verificato che lo scostamento dei punti rientrasse nei limiti di tolleranza stabiliti.

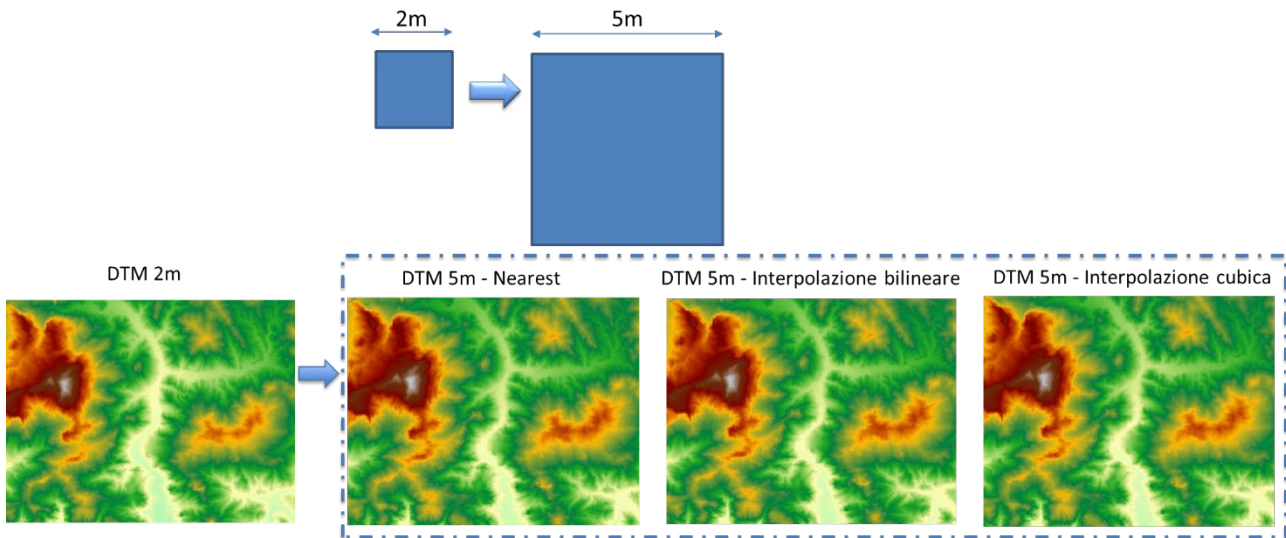


Figura 5. Esempio di ricampionamento del DTM con differenti metodi di interpolazione spaziale.

I tre modelli digitali così ottenuti, unitamente a quello originario, sono stati intersecati con il piano dei punti fissi altimetrici (Figura 6).

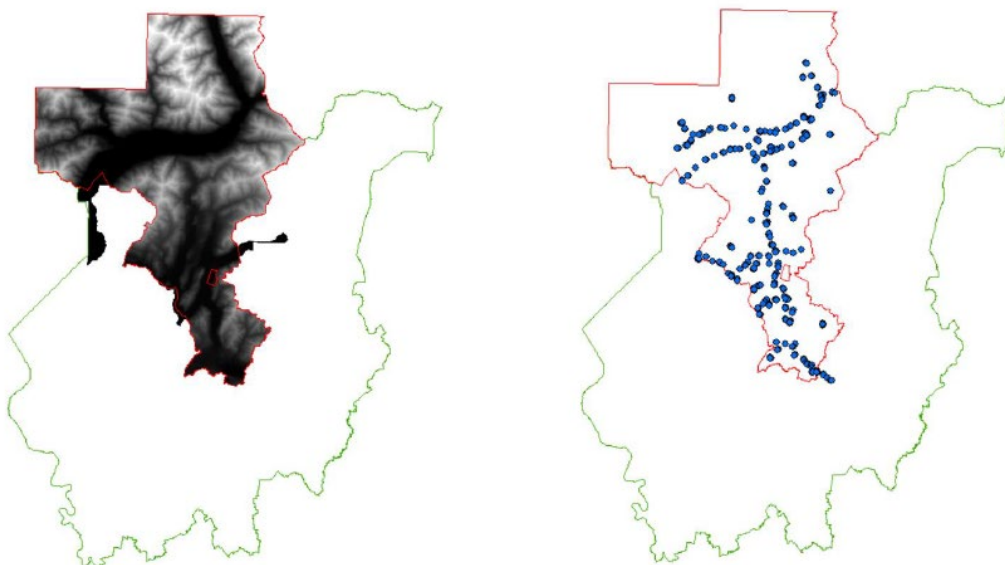


Figura 6. Modello digitale del terreno e punti fissi altimetrici

A questo punto, per determinare l'accuratezza di ognuno dei metodi di ricampionamento, è stato calcolato l'errore RMSE per tutti i modelli di elevazione ottenuti (Tabella 1).

Tabella 1. Collaudo dei modelli di elevazione ottenuti con i diversi metodi di ricampionamento e il modello di elevazione originale.

ORIGINALE	BILINEAR	CUBIC	NEAREST
-----------	----------	-------	---------

RMSE	1.85	1.97	2.01	2.03
soglia errore	3.63	3.87	3.93	3.97
n campione	427	427	427	427
punti fuori range tolleranza	2	1	1	1
% errore	0.47%	0.23%	0.23%	0.23%
COLLAUDO	SI	SI	SI	SI

Dai quattro diversi modelli di elevazione è stato ricavato il reticolo idrografico ed è stato poi confrontato con le bluelines del reticolo svizzero, ottenendo una sovrapposizione soddisfacente, come conferma la analisi riportata in Tabella 2 e Tabella 3.

Tabella 2. Analisi dei risultati tra il reticolo generato dalla flow accumulation soglia 20000 celle per il DTM originale 2 m

RMSE	DTM 2m (soglia flow acc: 20000 celle)	# PIXEL
1.850	num di celle totale	1763613
	numero di celle reticolo sovrapposte al reticolo	177366
	% celle sovrapposte	10.06%

Tabella 3. Analisi dei risultati tra il reticolo generato dalla flow accumulation soglia 3200 celle per i DTM 5 m

RMSE	DTM 5 m bilinear (soglia flow acc: 3200 celle)	# PIXEL
1.975	num di celle totale	621987
	numero di celle reticolo sovrapposte al reticolo	152759
	% celle sovrapposte	24.56%
RMSE	DTM 5 m cubic (soglia flow acc: 3200 celle)	# PIXEL
2.007	num di celle totale	625911
	numero di celle reticolo sovrapposte al reticolo	152217
	% celle sovrapposte	24.32%
RMSE	DTM 5 m near (soglia flow acc: 3200 celle)	# PIXEL
2.026	num di celle totale	630964
	numero di celle reticolo sovrapposte al reticolo	152199
	% celle sovrapposte	24.12%

I dati indicano come l'approccio bilineare risulti essere il metodo di ricampionamento che produce i risultati migliori nei test effettuati (Figura 7).

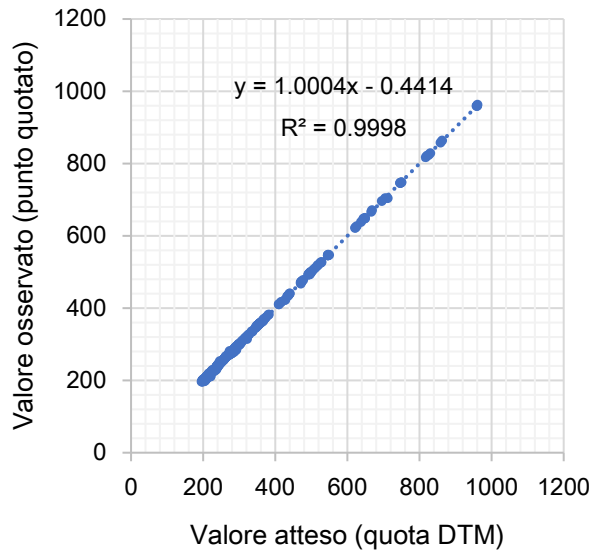


Figura 7. Correlazione tra l'elevazione espressa in m s.l.m. dal DTM 5 m bilineare dai punti fissi altimetrici

3.4. Prodotto

Una volta prodotta la validazione del modello digitale del Canton Ticino ricampionato a 5 metri secondo metodo bilineare si è proceduto con il lavoro di mosaicatura dei due modelli digitali del terreno, finora presenti come due prodotti distinti. Dal momento che il DTM 5x5 di Regione Lombardia rappresenta un prodotto nativo non si è ritenuto di svolgere alcuna validazione tra quote stimate e quote osservate sulla rete fiduciaria dei punti al suolo.

Come si può osservare in Figura 8 le procedure di mosaicatura si sono dovute necessariamente accompagnare con la cosiddetta operazione di *void filling* a causa della non completa sovrapposizione dei confini dei due strati informativi. Tale operazione sfrutta dei metodi di interpolazione comunemente usati in ambiente GIS della generazione di superfici (p.e. attraverso gli algoritmi di *inverse distance weighted* o *plane fitting*).

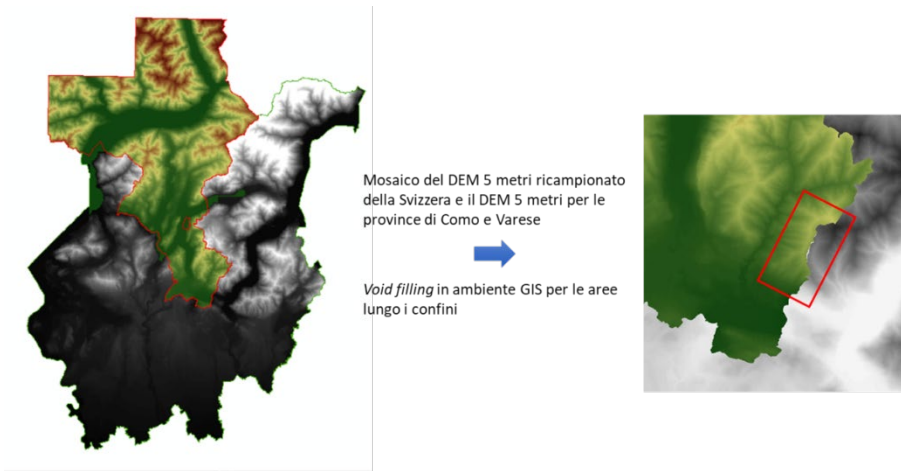


Figura 8. Operazioni di void filling lungo i confini Italia-Svizzera

Terminate tali operazioni si è ottenuto uno strato unitario mosaicato privo di discontinuità altimetriche, come riportato in Figura 9.

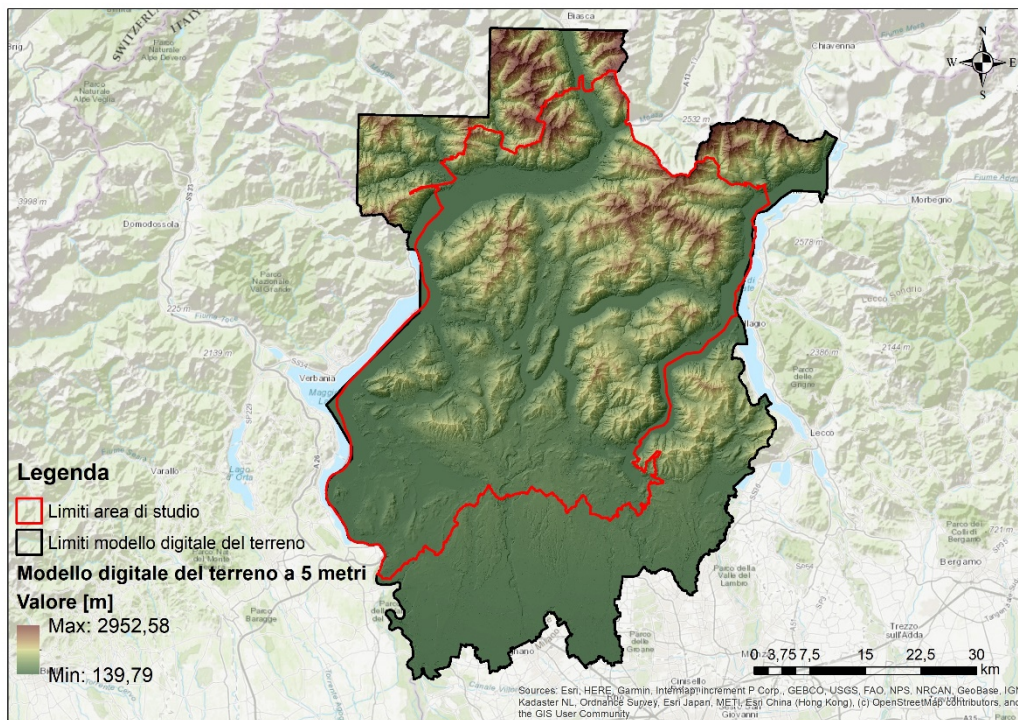


Figura 9. Modello digitale del terreno per l'area transfrontaliera con passo 5 metri

4. Note di metodo per la mappatura di suscettibilità per il rischio idraulico e da incendio boschivo

Si presentano queste due classi di fenomeni nella stessa sezione in quanto accumulate dalla metodologia di base per la mappatura. Per queste due tipologie di evento si è infatti optato per un'analisi di suscettività basata su un metodo geo-statistico di largo uso in letteratura in svariati ambiti: il metodo del *Weight of Evidence* (WoE).

Si riporta nel prossimo paragrafo un breve riferimento utile alla comprensione del metodo nella sua formulazione teorica, per poi approfondire separatamente per le due tipologie di rischio la scelta dei fattori predisponenti, la loro suddivisione in classi, il dataset utilizzato per la calibrazione e la validazione nonché la presentazione dei risultati.

4.1. Il modello statistico di riferimento per le due analisi

Il metodo *Weight of Evidence* (WoE) fu proposto da (Agterberg, Bonham-Carter, & Wright, 1990) come applicazione nell'ambito della ricerca mineraria ed è particolarmente ricorrente in letteratura per la valutazione della suscettività da dissesti geomorfologici di versante (Neuhäuser & Terhorst, 2007); (Lee, Jaewon, & Kyungduck, 2002). Le applicazioni hanno più recentemente sconfinato in altri ambiti includendo anche i fenomeni alluvionali (Tehrany, Pradhan, & Jebur, Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS, 2013) (Rahmati, Pourghasemi, & Zeinivand, 2016) e gli incendi (Romero-Calcerrada, Novillo, Millington, & Gómez Jiménez, 2008).

Il metodo WoE è basato sul teorema di Bayes: indicando con "B" ogni fattore predisponente considerato, con "B_i" ciascuna delle sue classi, e con "A" l'evidenza dell'evento, la probabilità di avere "s" data la classe "B_i" sarà dunque pari a:

$$P(A|B_i) = \frac{P(B_i|A) \cdot P(A)}{P(B_i)}$$

dove $P(B_i|A)$ è la probabilità di trovare la classe "B_i" al verificarsi dell'evento "A", $P(A)$ è la probabilità di avere un evento nell'area di studio, mentre $P(B_i)$ è la probabilità di trovare una determinata classe di un fattore predisponente.

Di conseguenza, la probabilità condizionata di trovare "A" fuori dalla classe "B_i" sarà pari a:

$$P(A|\bar{B}_i) = \frac{P(\bar{B}_i|A) \cdot P(A)}{P(\bar{B}_i)}$$

dove $P(\bar{B}_i)$ è la probabilità di non avere la classe " B_i " mentre la $P(\bar{B}_i|A)$ è la probabilità di non avere la classe " B_i " dato l'evento " A ".

Tali probabilità, che vengono calcolate come rapporti tra aree e permettono di valutare la relazione spaziale che intercorre tra il verificarsi dell'evento e la presenza o assenza di una determinata classe di fattore predisponente, portano successivamente alla definizione dei pesi di ciascuna classe. Il peso dipende in questo modo da quanto la classe oggetto di studio sia correlata positivamente o negativamente all'insorgenza dell'evento.

Nel dettaglio, vengono definiti i pesi W^+ e W^- , che sono espressi come:

$$W^+ = \ln \frac{P(B_i|A)}{P(B_i)}$$

$$W^- = \ln \frac{P(\bar{B}_i|A)}{P(\bar{B}_i)}$$

Il peso positivo W^+ rappresenta il rapporto tra la probabilità di trovare una classe in un punto dello spazio dove si è verificato l'evento e la probabilità di trovare la stessa classe in un luogo in cui non si è verificato l'evento. Esso quantifica quindi la relazione che intercorre tra una classe di un fattore predisponente e il verificarsi dell'evento, cioè indica l'influenza di tale classe sul verificarsi dell'evento. Il peso negativo W^- , al contrario, rappresenta il rapporto tra la probabilità di non trovare una classe dove si è verificato l'evento e la probabilità di non trovare la stessa classe in un'area priva di evento, definendo così l'entità di anti-correlazione tra la classe di un fattore e l'evento.

Il peso di contrasto C è definito come differenza tra i due pesi ($C = W^+ - W^-$) e indica l'entità della relazione spaziale tra la classe del fattore predisponente e il verificarsi dell'evento: un peso di contrasto uguale o prossimo allo 0 indica l'assenza di relazione tra la classe del fattore e l'evento, mentre i valori di contrasto positivi e negativi rivelano una relazione spaziale positiva o negativa della propensione di aree con determinate caratteristiche ad essere interessate dall'evento alluvionale.

I pesi di influenza W^+ e W^- e conseguentemente il peso di contrasto C permettono, attraverso una combinazione lineare di tutti i valori di C per ciascuna classe, di calcolare la probabilità a posteriori del verificarsi dell'evento espressa attraverso un indice di suscettività che ha la forma $P_A(A) = \sum w_i \cdot \ln P(A)$.

Operativamente, si tratta di quindi di

- Identificare un dataset di eventi storici, da suddividere in due sottogruppi di dati dedicati rispettivamente alla calibrazione ed alla validazione.
- Identificare gli strati informativi dei fattori predisponenti, con l'accortezza in questo preciso caso di avere un'informazione quanto più omogenea e confrontabile per i due stati.
- Suddividere ciascun fattore predisponenti in classi, sulla base di evidenze scientifiche.
- Calcolare, secondo le formule del metodo WoE descritte in precedenza, i pesi W^+ , W^- e C .
- Valutare l'indice di suscettività $P_A(A)$
- Verificare l'indice attraverso un confronto con il dataset osservato, ed eventualmente procedere a ritroso tramite una modifica delle classi, che sia in grado di rappresentare al meglio il territorio.

Al termine di queste operazioni, è possibile riportare in mappa i valori dell'indice di suscettività, che rappresentano una visualizzazione della propensione delle aree ad essere soggette al fenomeno in oggetto.

Sulla base di quanto detto fino ad ora, appare evidente come le mappe di suscettività siano nativamente transfrontaliere, in quanto ottenute dall'elaborazione di dataset omogenei per i due paesi.

Nei prossimi paragrafi verranno presentate nel dettaglio le descrizioni della procedura e dei dati di input e output per le due classi di fenomeni.

5.Alluvioni

*A cura di Giovanni Menduni, Michele Del Vecchio
(Politecnico di Milano – Polo di Lecco)*

5.1. Introduzione

Gli eventi alluvionali costituiscono la tipologia di disastri naturali con maggior frequenza e che hanno interessato il più alto numero di individui nell'ultimo ventennio (EM-DAT; <http://www.emdat.be/>). Sebbene in questa tipologia di rischi si può riscontrare un'influenza data dai cambiamenti climatici, lo sviluppo economico e sociale delle aree potenzialmente allagabili è il maggiore responsabile dell'aumento dei danni associati a tali eventi (Domeneghetti, Carisi, Castellarin, & Brath, 2015) (Bouwer, Bubeck, & Aerts, 2010).

In tal senso, la mappatura dei pericoli e dei rischi di alluvione si rivela il punto imprescindibile di qualsiasi politica di gestione del rischio (Merz, Kreibich, Schwarze, & Thielen, 2010). Come recita la Direttiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo ("Direttiva sulle alluvioni") in uno dei suoi primi preamboli «il principio di solidarietà è estremamente importante nel contesto della gestione del rischio di alluvioni» e dovrebbe portare gli Stati membri ad una gestione condivisa e ripartita delle responsabilità lungo i corsi d'acqua, nell'interesse comune. Parte fondamentale di questo processo è senz'altro l'elaborazione dei piani di gestione del rischio di alluvioni, per una gestione integrata del bacino idrografico. Si può immediatamente apprezzare dall'Atlante di distretto, allegato 7 alla relazione del "Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni" dell'Autorità di Distretto del fiume Po¹ come i territori sin qui presentati come area di studio del progetto GESTI.S.CO appartengano allo stesso bacino idrografico (Figura 10), quello del fiume Po. Gran parte di essi, localmente, appartengono al bacino del fiume Ticino, che disegna un'unica area idrologicamente connessa al di sopra e al sotto del lago Maggiore, come testimoniato dalla collaborazione tra Arpa Piemonte, Arpa Lombardia e Canton Ticino nell'ambito del progetto FLORA (ArpaPiemonte, ArpaLombardia, & Repubblica e Cantone Ticino, 2012) per il miglioramento di strumenti operativi non strutturali per la difesa dalle alluvioni.

¹ Approvato nella seduta di Comitato Istituzionale del 17 dicembre 2015, con deliberazione n.4/2015

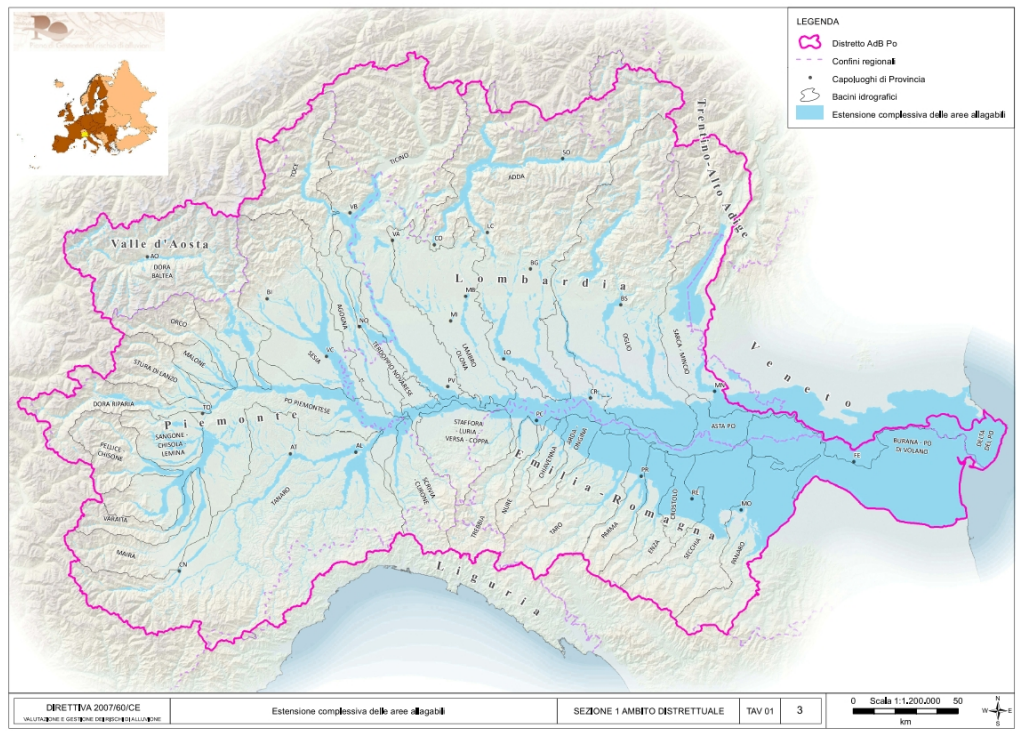


Figura 10. Bacino idrografico del fiume Po

Quello “puramente” idrologico non è l’unico ambito di interconnessione tra i territori della fascia transfrontaliera identificata: anche a livello di gestione dell’allertamento sono molteplici gli aspetti di sinergia tra Italia e Svizzera indicati nella sezione B del PGRA sopracitato (Regione Lombardia, 2016), a partire dall’APP “Protezione Civile Lombardia” per concludersi con la condivisione delle informazioni con MeteoSvizzera.

Risulta quindi evidente come un approccio condiviso e coordinato di un rischio intrinsecamente transfrontaliero sia l’unica strada per una corretta pianificazione a scala di bacino.

5.2. I concetti di pericolosità e suscettibilità nel rischio alluvioni

La mappatura delle pericolosità del territorio in Italia è stata storicamente affidata alla modellazione idrologica e idraulica, dalla prima produzione dei Piani di Assetto Idrogeologico in avanti. Medesimo approccio per il Canton Ticino, dove vengono definiti i piani delle zone di pericolo (PZP²) con una classificazione del territorio, tramite modellazioni, in cui si calcolano l’intensità e la frequenza con la quale può manifestarsi un determinato evento per poi aggregare tali informazioni nei PZP.

² <https://www4.ti.ch/dt/da/sf/temi/pericoli-naturali/pericoli-naturali/piani-zone-di-pericolo-pzp/piani-zone-di-pericolo/>

L'inondazione in un sito assegnato è così un processo stocastico funzione del tempo e dello spazio, all'interno di un approccio definibile come "quantitativo" che segue il percorso segnato dall'equazione di Varnes (Varnes & IAEG, 1984): la minaccia è quindi descritta dal valore della probabilità di occorrenza dell'evento su una qualsiasi finestra temporale. Tuttavia, la necessità di ottenere, anche a fronte di scarsità di dati osservati, una caratterizzazione probabilistica ha portato ad operare trasferendo la probabilità dell'evento al suolo, a quella della precipitazione che lo ha determinato, procedendo poi con una modellazione complessiva del fenomeno (Feniccia, et al., 2013).

Questa "ipotesi di isofrequenza" che conserva intatta la probabilità dell'evento attraverso l'intera catena di trasformazione idrologica, è un'ipotesi molto "forte" e spesso disattesa in natura. Infatti, i fenomeni alluvionali sono condizionati da una serie consistente di fattori contingenti (anch'essi di carattere fortemente stocastico) che condizionano i risultati dei modelli in maniera consistente. La modellazione proposta nei PAI/PGRA è dunque "una" realizzazione del processo tra le tante possibili, a partire dalla precipitazione di probabilità fissata. Vi sono casi nei quali la morfologia dei siti, i caratteri idraulici dell'asta fluviale, la presenza (o l'assenza) di opere idrauliche, rendono la soluzione relativamente stabile rispetto alla dinamica intrinseca dei processi. Altre volte non è così, e le perimetrazioni risultano limitate al ristretto ambito delle ipotesi assunte (Smith & Ward, 1988).

Tale approccio molto diffuso (Merwade, Olivera, Arabi, & Edleman, 2008) consente numerosi vantaggi, tra cui la possibilità caratterizzare gli eventi in probabilità su solide basi quantitative e generare mappe di inondazione per scenari su diversi tempi di ritorno (Hagemeier-Klose & Wagner, 2009), (Bignami, Dragoni, & Menduni, 2018)., cui si aggiunge il processo logico deduttivo chiaro, definito e ampiamente sviluppato in letteratura nelle sue diverse componenti (De Moel, Alphen, & Aerts, 2009).

Tuttavia, il riconoscimento e la perimetrazione delle aree inondabili è un problema complesso sia per le incertezze legate alla definizione delle forzanti di tipo idrologico sia per quelle legate alla parametrizzazione dei modelli di propagazione dell'onda di piena in alveo e nei territori di esondazione (Horrit, 2000) (Horritt & Bates, 2002) (Werner, Hunter, & Bates, 2005). La calibrazione di modelli matematici più o meno complessi, accoppiati a modelli digitali del terreno sempre più accurati e precisi, necessita di una conoscenza molto dettagliata e onerosa del territorio (Di Baldassarre, Schumann, & Bates, 2009). Tale approccio si adatta particolarmente allo studio di contesti territoriali localizzati ma non risulta sostenibile alla scala di vasti territori (scala di bacino o regionale), a volte rendendo necessaria una gerarchizzazione degli studi sulle aree più significative, avendo comunque la possibilità di disciplinare e tutelare le altre aree in via di completamento attraverso specifici strumenti normativi.



Tali condizioni rendono gli studi spesso incompleti e incapaci di classificare la reale perimetrazione di alcuni fenomeni inondativi “locali”, in special modo quelli originati da corsi d’acqua secondari (Figura 11)(Figura 13) e legati a quei fenomeni inondativi che sfuggono intrinsecamente alla mappatura di pericolosità alla scala di bacino (allagamento dei sottopassi stradali) che risulta, nel caso di specie, inadatta per una corretta pianificazione di protezione civile.

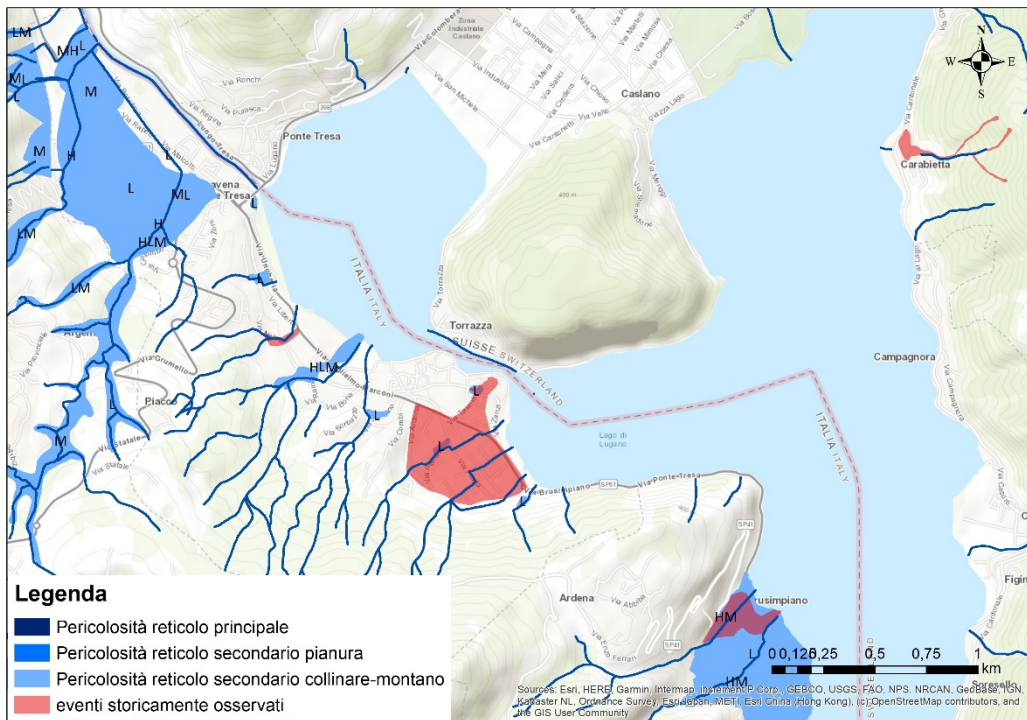


Figura 11. Perimetrazioni di pericolosità (PGRA 2019) ed evento del 7 giugno 2020 a Lavena Ponte Tresa (fonte: Politecnico di Milano)



Figura 12. Effetti dell'evento del 7 giugno 2020 a Lavena Ponte Tresa (fonte: La Prealpina³)

³ <https://www.prealpina.it/pages/lavena-ponte-tresa-nubifragi-conto-da-26-milioni-226243.html>

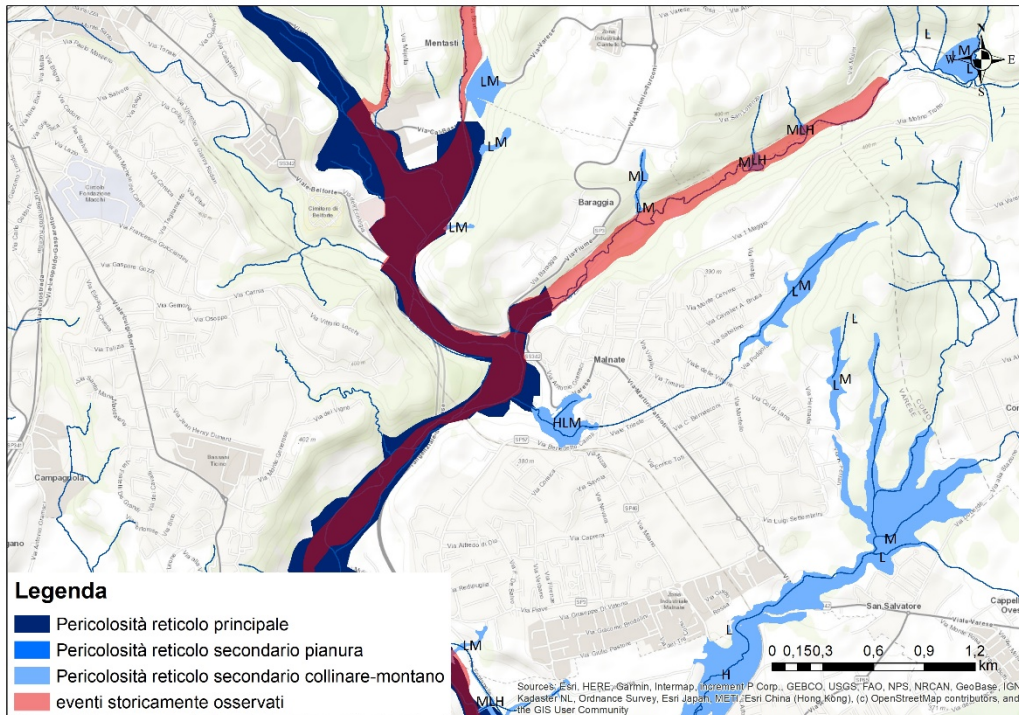


Figura 13. Perimetrazioni di pericolosità (PGRA 2019) ed evento del 12-13 settembre 1995 sul fiume Olona (fonte: Regione Lombardia)

Quanto detto rende necessario un ulteriore punto di vista, che fornisca una visione generale del contesto morfologico in cui possono svilupparsi rischi di natura idraulica e che possa essere un'utile integrazione per un'analisi speditiva delle caratteristiche del territorio atta a individuare aree intrinsecamente predisposte ad essere alluvionate.

In questo contesto si inseriscono tutti quegli approcci che si basano sull'analisi di inferenza degli eventi osservati in relazione alle caratteristiche del territorio nel quale questi si collocano, correlandoli con la ricorrenza di particolari caratteristiche del sito in esame ("fattori predisponenti")

Si hanno quindi gli approcci puramente geomorfologici che lavorano sulla costruzione di indici di varia complessità (Samela, et al., 2015) (Samela, Troy, & Manfreda, 2017) (Manfreda, et al., 2015) e tutte quelle metodologie cosiddette "indirette" *data driven*, entrambi con l'obiettivo di descrivere la cosiddetta suscettibilità di un'area al rischio idraulico.

La suscettibilità ha come finalità quella di collegare la probabilità di accadimento di un evento - che si tratti di dissesto geomorfologico di versante o di un fenomeno alluvionale - ad un determinato numero di fattori predisponenti che ne favoriscono o meno il verificarsi. Questo permette di definire una probabilità a priori basata su caratteristiche morfologiche del territorio, lasciando il concetto di tempo di ritorno e frequenza di accadimento ad una successiva fase di analisi del rischio (Corominas

& al., 2003). Per la suscettibilità, sia da dissesto che da alluvione, risulta fondamentale la conoscenza, anch'essa a priori, delle cause e dei fattori che influenzano in maniera rilevante il fenomeno in esame: dal momento che si tratta di un approccio indiretto la sua resa sarà necessariamente legata alla capacità di spiegare in modo esaustivo i processi in atto attraverso un numero congruo di fattori predisponenti, insieme ad un robusto repertorio di evidenze storiche (Guzzetti & al., 1999). Si può quindi affermare che il concetto di suscettibilità dipenda dalle caratteristiche fisiografiche e climatiche di un territorio, ma che al tempo stesso posso essere sensibilmente influenzata dall'azione dell'uomo. Ad ogni "pixel" del territorio corrisponde così una n - p/a di fattori predisponenti che, confrontati in forma binaria con la presenza di alluvioni storiche, possono fornire la base per modellazioni statistiche di diversa complessità: elaborando dati territoriali di ordine topografico/geomorfologico, geolitologico e climatico si evidenzia la correlazione con gli effetti al suolo degli eventi alluvionali, per fornire un "grado" di propensione al dissesto detto suscettibilità.

I fattori predisponenti sono combinati attraverso modelli di inferenza statistica: tali modelli di inferenza, cosiddetti *data driven* perché calibrati con un insieme di dati osservati utilizzano diverse tecnologie, tra le quali le reti neurali artificiali (ANN) (Pradhan & Buchroithner, 2010), i processi gerarchici analitici (AHP) (Yalcin, 2008), la regressione logistica (LR) (Pradhan, 2010) e fuzzy logic (Pradhan, 2011). L'utilizzo di metodi machine learning è indirizzato in alcuni lavori più recenti (Lamovec, Veljanovski, Mikoš, & Oštir, 2013), (Tehrany, Pradhan, & Jebur, 2013).

5.3. Dati di input al modello

Per produrre la mappatura della suscettibilità da alluvione i modelli di inferenza statistica richiedono in ingresso sempre le stesse tipologie di strati territoriali. Si propone una rapida elencazione, specificando la fattispecie di quelli utilizzati per quest'analisi.

Dati storicamente osservati (dataset di calibrazione)

I dati storici, come si è detto, sono un elemento imprescindibile per la taratura del modello di suscettività, trattandosi di un metodo cosiddetto "indiretto". Inoltre, sono fondamentali anche per la valutazione della resa predittiva in fase di validazione.

Il dataset delle osservazioni raggruppa tutti gli eventi di alluvionamento di cui si è trovata informazione su localizzazione, data ed estensione. Di questo insieme fanno parte:



- gli eventi riportati dalla Confederazione Svizzera nel Catasto degli eventi naturali (progetto StorMe⁴);
- gli eventi mappati dal Politecnico di Milano sulla base di fotografie, video e altre informazioni di cronaca;
- gli eventi tracciati dalla Regione Lombardia sulla base di segnalazioni di Comuni, di foto aeree, di rilievi in loco, di studi idraulici o di altre informazioni storicamente riportate (“Esondazioni storiche tra Ticino e Adda”)

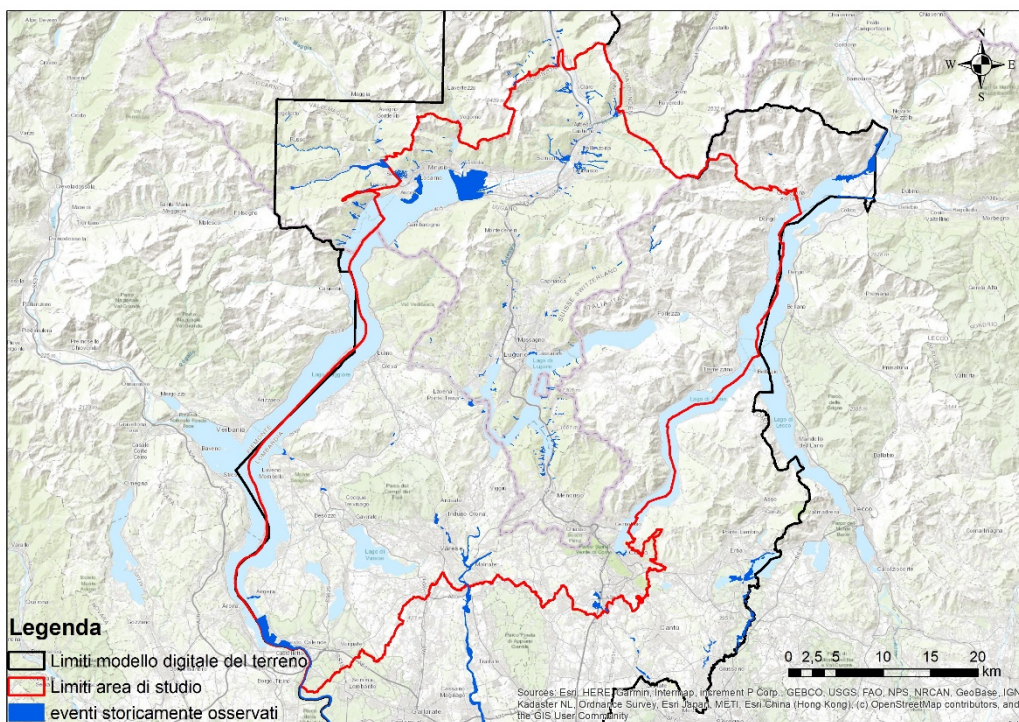


Figura 14. Dataset di eventi di inondazione storicamente osservati (fonte: varie)

Tale insieme di dati è stato suddiviso in modo casuale in due sub-dataset, uno per la calibrazione del modello (circa il 70% del totale) e uno per la fase di validazione (circa il 30% del totale).

Modello digitale del terreno

Parte fondamentale dei modelli indiretti *data driven* è l'utilizzo di un modello digitale del terreno per la rappresentazione del territorio e la conseguente valutazione delle caratteristiche geomorfologiche e litologiche predisponenti o avverse alle alluvioni. Uno dei motivi per cui il loro uso è aumentato è

⁴ <https://www4.ti.ch/dt/da/sf/temi/pericoli-naturali/per-saperne-di-piu/link-utili/progetto-storme/>

anche grazie ai numerosi vantaggi che presenta la crescente disponibilità di modelli digitali del terreno ad alta risoluzione. Il DEM in questione è quello prodotto e validato dal gruppo di lavoro del Politecnico di Milano, ottenuto, come specificato nei precedenti capitoli dalla fusione di due diversi strati informativi di partenza (DEM Regione Lombardia 5x5 m, DEM Svizzera 2x2 m).

Per l'analisi di suscettività da alluvione il modello digitale del terreno è stato mantenuto per un'area più estesa rispetto a quella di studio (Figura 15) per permettere di addestrare il modello con un dataset più ampio di dati osservati.

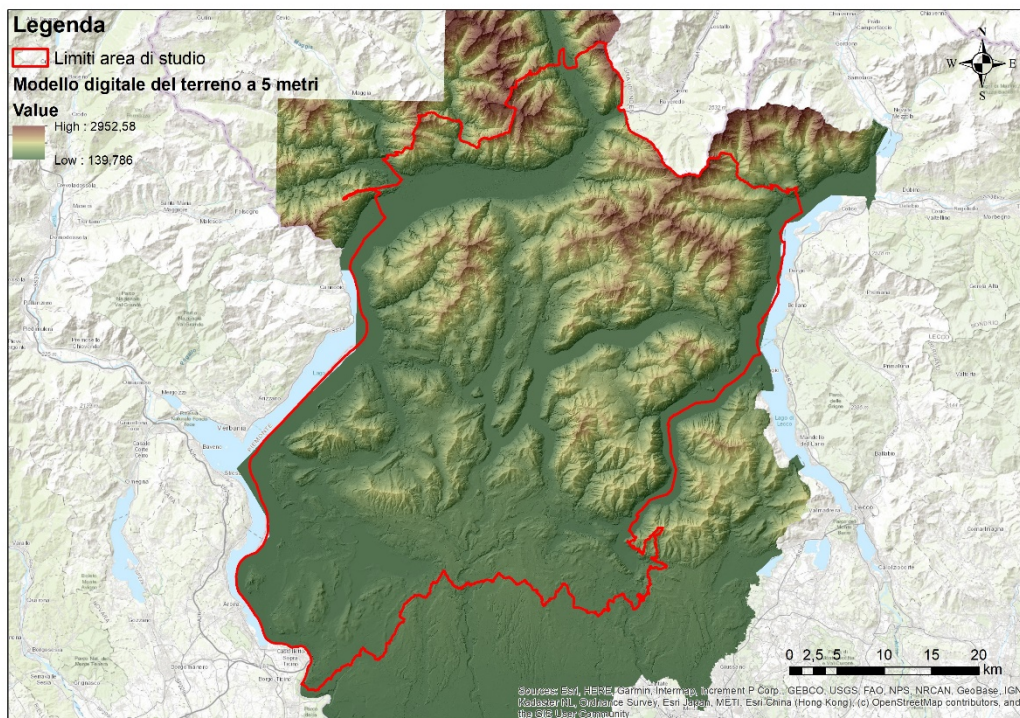


Figura 15. Modello digitale del terreno in uso (DEM 5 metri – Politecnico di Milano)

Strati informativi relativi ai fattori predisponenti

I fattori predisponenti presenti in letteratura per la valutazione della suscettibilità alle inondazioni sono molteplici (Pal & Roy, 2020) (Lee, Tehrany, & Pradhan, 2014) ma possono essere raggruppati in alcune categorie ricorrenti:

- i fattori topografici (p.e. elevazione, pendenza);
- i fattori geolitologici (p.e. permeabilità degli strati litologici);
- i fattori idrologici (p.e. distanza dal reticolo idrografico);
- i fattori antropogenico-ambientali (p.e. tipologia e uso dei suoli).

A seconda dei fattori predisponenti in uso si richiedono diversi strati informativi di uso del suolo, reticolo idrografico, litologia...

Per l'analisi di suscettività da alluvione proposta le informazioni necessarie oltre al modello digitale del terreno sono state:

- il reticolo idrografico proveniente dalla cartografia tecnica. Il reticolo del Canton Ticino è stato ottenuto direttamente dal Portale dell'Ufficio Federale dell'Ambiente della Svizzera a scala 1:25.000 e integrato con il reticolo idrografico della Carta Tecnica Regionale della Regione Lombardia in scala 1:10.000. Tali informazioni, in quanto provenienti entrambe dalle cartografie tecniche, si sono ritenute sufficientemente coerenti e sovrapponibili per modalità di rilevamento e cartografazione.
- il *Corine Land Cover* del 2018 (Figura 17) direttamente scaricato dal sito dell'ente europeo Copernicus per il progetto Land Monitoring Service⁵. Tale informazione è servita, insieme alla carta litologica, per la costruzione del fattore predisponente del *Curve Number*. Inoltre ha permesso di ricavare la superficie occupata dai laghi presenti sul territorio oggetto dell'analisi di studio.
- la carta litologica con informazioni sulla permeabilità dei singoli strati. Lo strato è stato ottenuto dal portale federale *opendata.swiss* e consiste nella carta geotecnica 1:500.000 (GK500) del Gruppo Georisorse Svizzere, che mostra il sottosuolo in base a criteri litologici e petrografici⁶. Attraverso una combinazione con il precedente strato di copertura dei suoli è stato possibile costruire l'informazione relativa al parametro del *Curve Number*.

⁵ <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>

⁶ <https://opendata.swiss/it/dataset/lithologisch-petrografische-karte-der-schweiz-genese-1-500000>

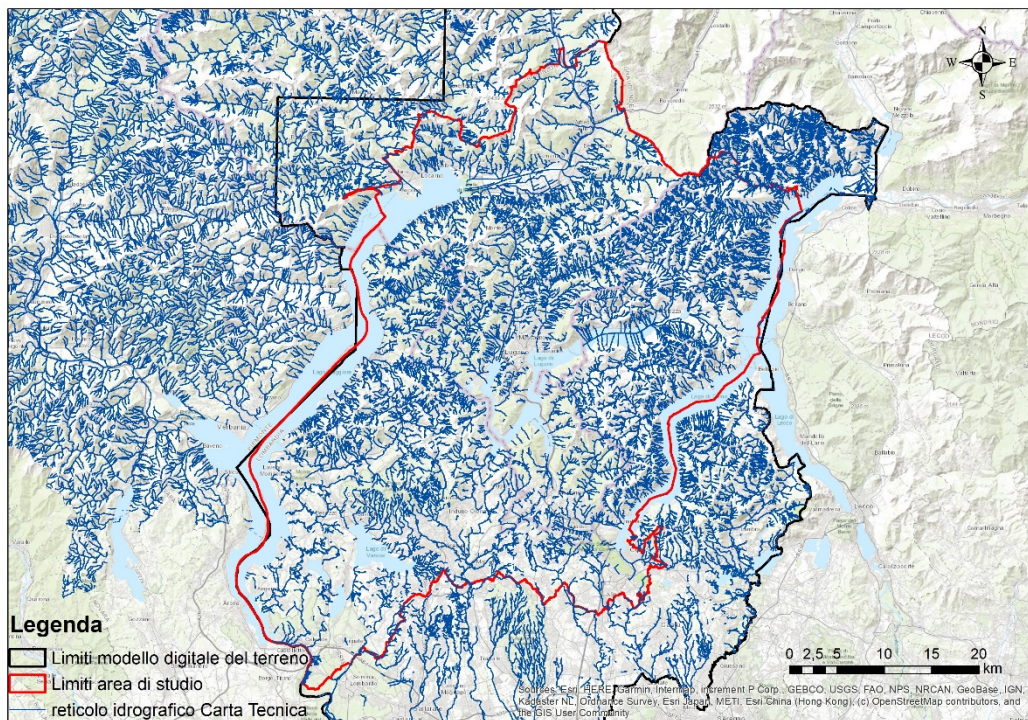


Figura 16. Reticolo idrografico svizzero e italiano

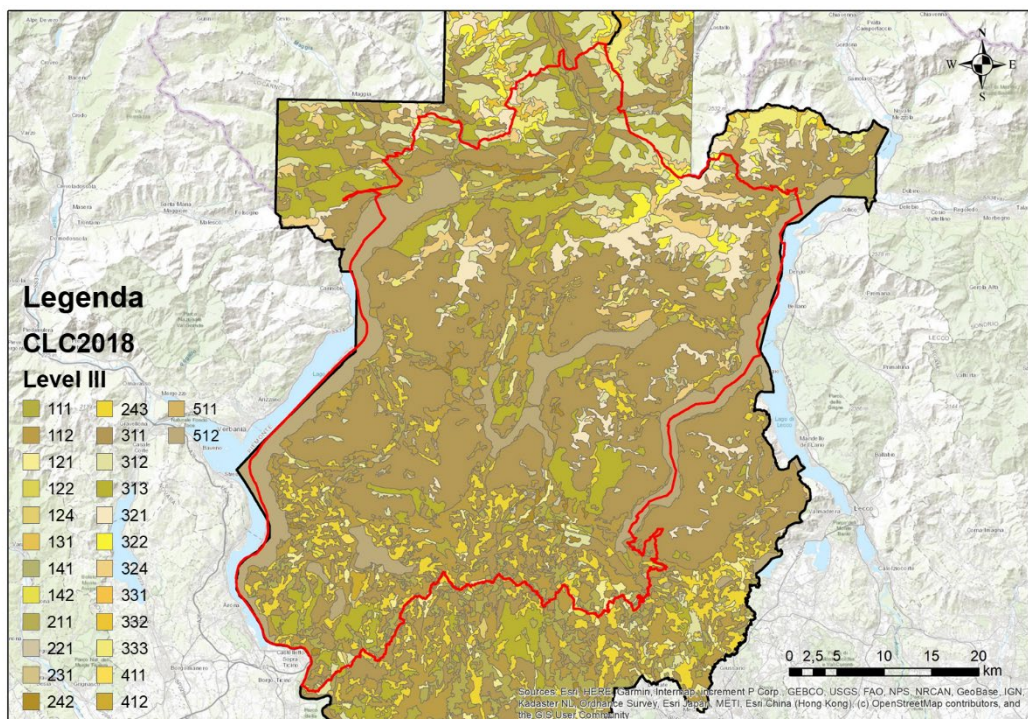


Figura 17. Corine Land Cover 2018

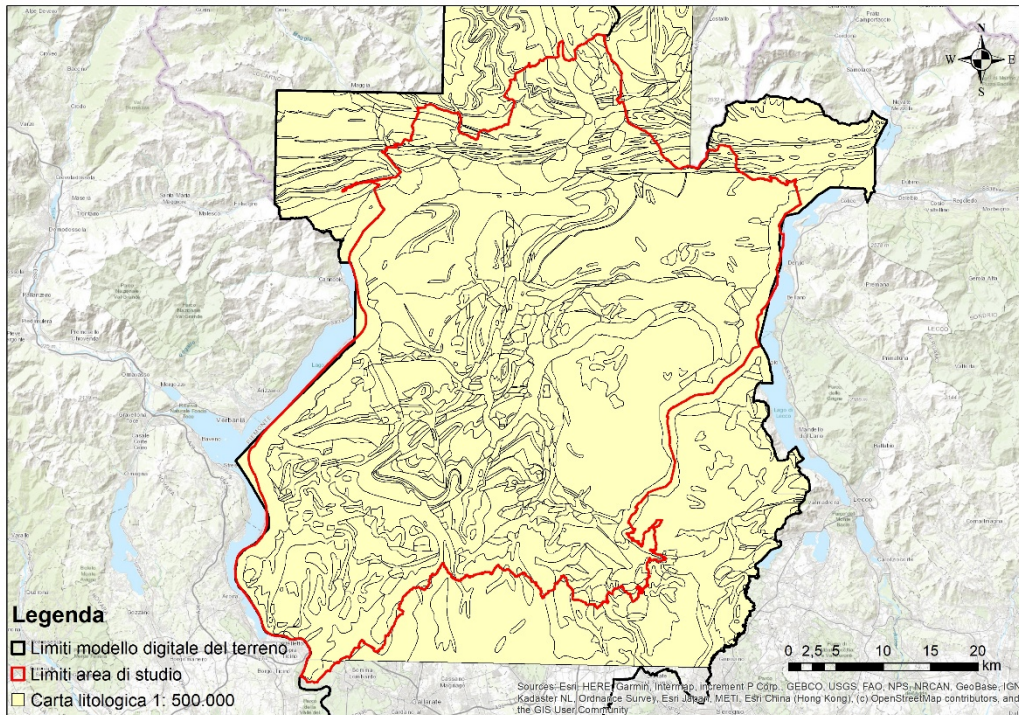


Figura 18. Carta litologica e petrografica della Svizzera – Origine delle rocce 1:500.000

5.4. La definizione dei fattori predisponenti

Vi sono in letteratura, come detto, molti fattori predisponenti differenti, ottenuti direttamente o attraverso una composizione in indici “complessi” (p.e. *Topographic Wetness Index*).

Nell’ambito del progetto si è scelto di selezionare quattro caratteristiche morfologiche da DEM sempre presenti, sulla base di precedente letteratura, esplorata adeguatamente (Chapi, et al., 2017) (Chen, et al., 2019) (Choubin, et al., 2019) (Zhao, Pang, Xu, Yue, & Tu, 2018).

Si tratta dei fattori predisponenti coincidenti con due parametri di prossimità in forma di distanza orizzontale e verticale dal reticolo di drenaggio, la pendenza come parametro di morfologia locale e l’indice *CN* per dar conto del comportamento idraulico locale del territorio.

Tali fattori sono stati testati sul territorio di cinque Regioni dell’Italia meridionale nell’ambito del progetto PON Governance 2014-2020 per il rischio idrogeologico e idraulico⁷ e in lavori connessi (Diozzi, 2018): questo al fine di poter assicurare una sufficiente descrizione delle caratteristiche dei territori in esame e, di conseguenza, una buona resa in termini previsionali dei fenomeni idraulici e

⁷ <http://governancerischio.protezionecivile.gov.it/web/guest/rischio-idrico>

idrogeologici. Una volta individuati, tali fattori sono stati verificati sulla loro significatività statistica e assenza di reciproca correlazione. Si propone qui di seguito una breve rassegna.

Pendenza locale

Il fattore predisponente della pendenza locale, estratto a partire dal DTM con passo 5 metri, è stato ottenuto sfruttando gli strumenti di analisi della superficie in ambiente GIS utilizzando una finestra mobile di 3 celle per 3 celle attraverso il metodo planare.

Curve Number

L'uso del suolo è stato ricavato dal progetto Corine Land Cover (2018) a livello 3. I tematismi sono stati riaggregati assegnando alle componenti litologiche, provenienti dalla carta geotecnica 1:500.000, diversi gruppi idrologici di suolo (HSG) in accordo al metodo SCS-CN (Mishra & Singh, 2003).

Quota relativa

La costruzione dello strato informativo delle quote relative è stata fatta considerando ogni punto del territorio in relazione con i punti circostanti attraverso la definizione di un *buffer* (Zhao, Pang, Xu, Yue, & Tu, 2018), all'interno del quale viene individuato un punto di minimo locale la cui quota è stata sottratta al DEM originale. Se in letteratura non viene sufficientemente studiato un metodo per la costruzione di tale raggio di esplorazione dei minimi, per far sì che il punto di minimo locale individuato avesse delle caratteristiche di accumulo di flusso superficiale, il *buffer* di esplorazione dei minimi è stato costruito secondo un criterio fisico-idrologico (Diozzi, 2018): viene considerata, cioè, la densità di drenaggio e quindi la distanza media tra i corsi d'acqua. Una volta calcolata la densità di drenaggio come la massima distanza di ruscellamento superficiale (*length of overland flow*), la distanza media tra i corsi d'acqua risulta pari alla metà di tale valore (Dingman, 1978), ovvero nel caso specifico, il raggio all'interno del quale esplorare il minimo locale.

Distanza dal reticolo idrografico

L'ultimo fattore utilizzato è quello della distanza dal reticolo idrografico, che risulta essere strettamente collegato a quello delle quote relative: il primo rappresenta, infatti, la distanza orizzontale, il secondo, invece, la distanza, nella sua componente verticale, dai corsi d'acqua. Questo elemento predisponente viene calcolato con gli strumenti di analisi della distanza in ambiente GIS a partire dal reticolo idrografico (strumento *Euclidean Distance*) e rappresenta uno dei più tipici e presenti all'interno di ogni analisi di suscettività da alluvione (Tehrany, Pradhan, & Jebur, 2014).

Inoltre, per il caso specifico del calcolo della distanza, si è ritenuto di dover integrare quali fonte di rischio idraulico da inondazione i laghi regolati presenti sul territorio analizzato (Lettera, 2019): lago Maggiore, Lario, lago di Lugano. A questa lista è stato aggiunto il lago di Varese su cui sono state registrate alcune esondazioni⁸. Il reticolo idrografico è stato quindi integrato con la linea di costa di tali laghi (Figura 19).

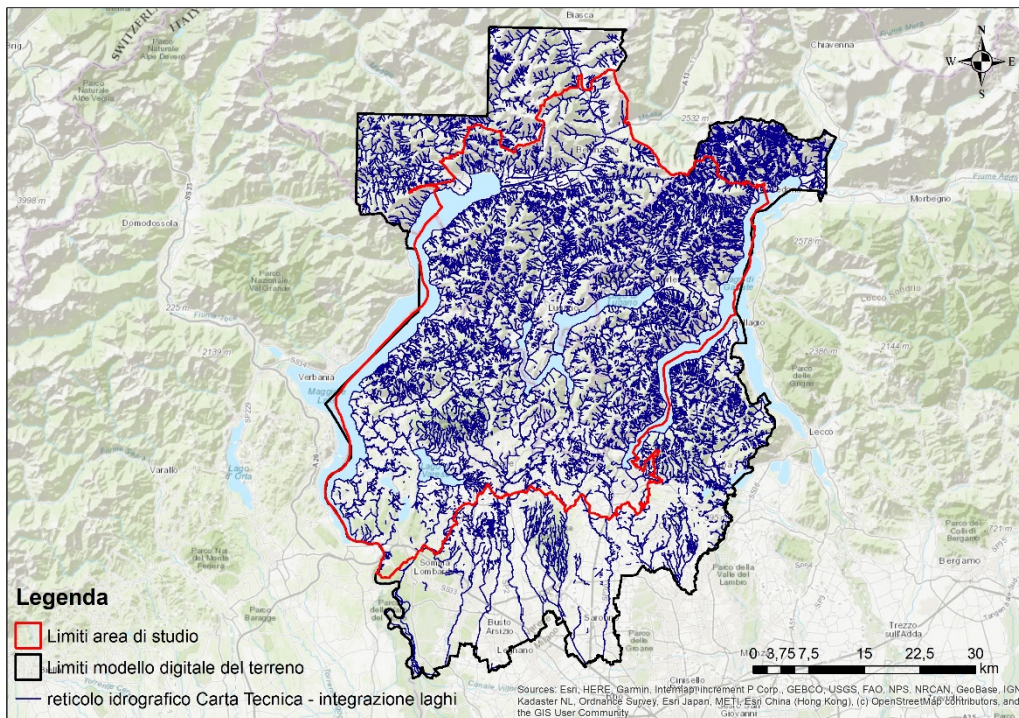


Figura 19. Reticolo idrografico svizzero e italiano (con integrazione linea costiera dei laghi)

5.5. Applicazione del metodo statistico

Si vanno qui di seguito a presentare i risultati ottenuti in termini di correlazione tra classi i-esime e dataset degli eventi osservati per ogni fattore predisponente, inquadrati nel metodo statistico bivariato *Weight of Evidence* (Bonham-Carter & al., 1988) (Tehrany, Pradhan, & Jebur, 2014).

Si precisa che in generale in letteratura non vengono indicate delle modalità per la costruzione degli intervalli dei singoli fattori predisponenti. Solitamente si ricorre alle suddivisioni proposte nei software

8

https://milano.repubblica.it/cronaca/2014/07/29/news/maltempo_varese_in_ginocchio_per_l_esondazione_del_lago_situazione_grave_lasciate_le_auto-92676409/

GIS⁹, proprio perché la definizione delle classi è utile, prima ancora che a classificare il territorio in porzioni con caratteristiche morfologiche omogenee, a creare degli intervalli che siano rilevanti ai fini dell'analisi statistica di suscettività.

Infine, la carta litologica e di conseguenza il *CN*, pur coprendo l'intera area di studio, forniscono una rappresentazione parziale del territorio modellato dal DEM, in particolare nei suoi limiti inferiori (Figura 20): di conseguenza questo fattore predisponente è servito come riferimento per uniformare l'estensione degli altri ai fini dell'analisi statistica.

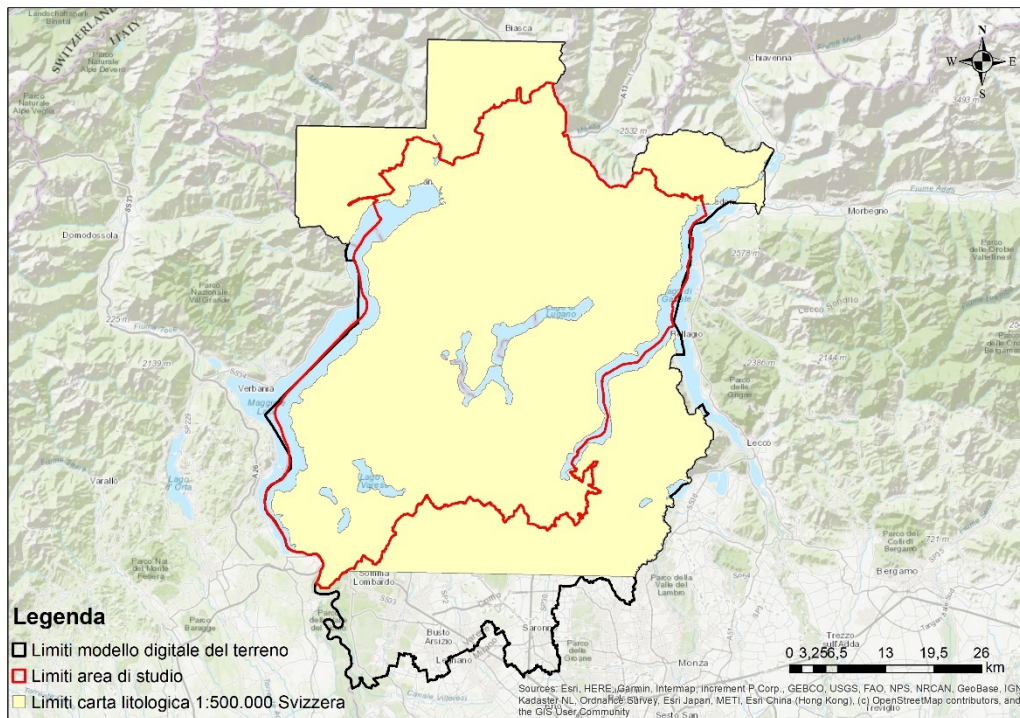


Figura 20. Limiti inferiori dell'area di analisi statistica di suscettività

Pendenze locali

Le pendenze locali del territorio di analisi statistica sono state classificate secondo una suddivisione in 5 classi, in funzione dell'angolo di pendenza¹⁰. Il territorio viene così descritto in zone a pendenza nulla, moderata, forte, molto forte e ripida (>35°). I risultati in termini di pesi di correlazione positiva W^+ , pesi di correlazione negativa W^- e pesi di contrasto C (la combinazione dei due) vengono presentati in Figura 21.

⁹ <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/mapping/layer-properties/data-classification-methods.htm>

¹⁰ <https://geographyfieldwork.com/SlopeSteepnessIndex.htm>

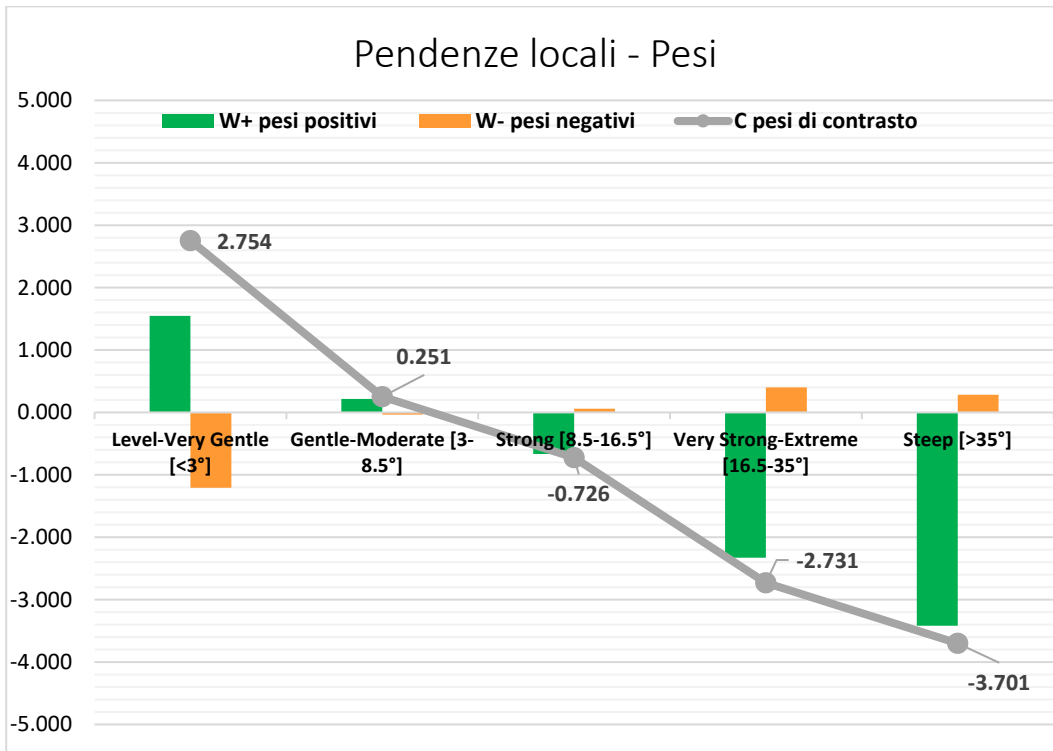


Figura 21. Distribuzione dei pesi delle classi di pendenza

L'andamento monotono decrescente è confortato da quanto emerge dalla distribuzione dei dati osservati (Figura 22): coerentemente con la natura del fenomeno, quasi il 90% del totale degli effetti al suolo delle inondazioni mappate si colloca in aree a pendenza assente o moderata.

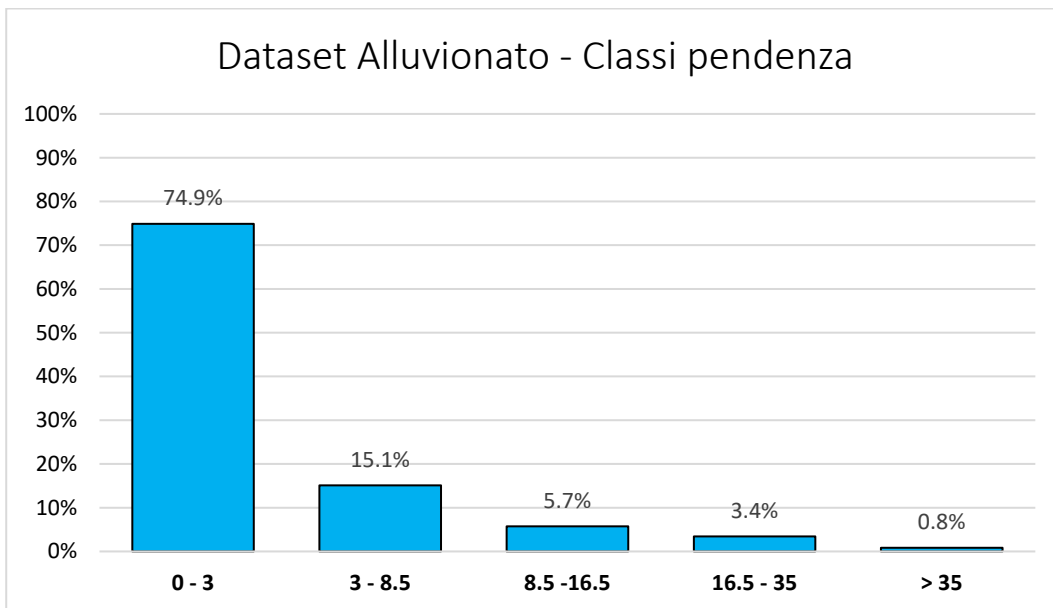


Figura 22. Distribuzione dataset aree inondate nelle classi di pendenza

Curve Number

Le classi di permeabilità dei suoli sono state definite in base ai valori di *Curve Number* corrispondenti. Si sono così definite quattro tipologie di suoli: impermeabili, scarsamente permeabili, mediamente permeabili e completamente permeabili (Figura 23).

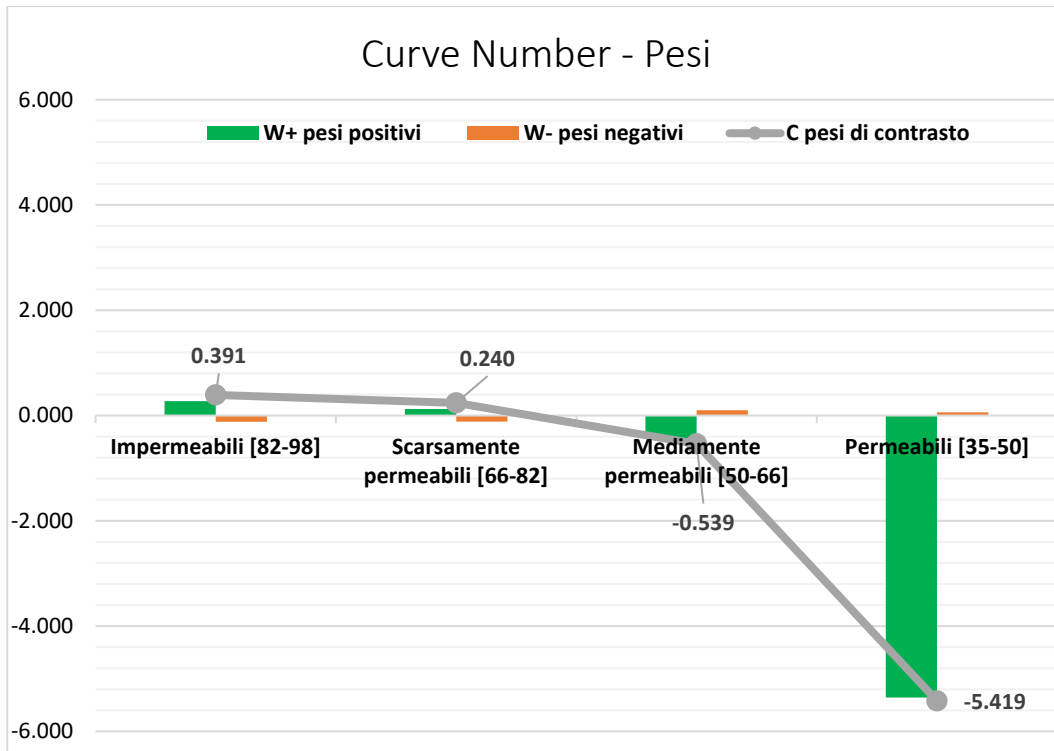


Figura 23. Distribuzione dei pesi delle classi di Curve Number

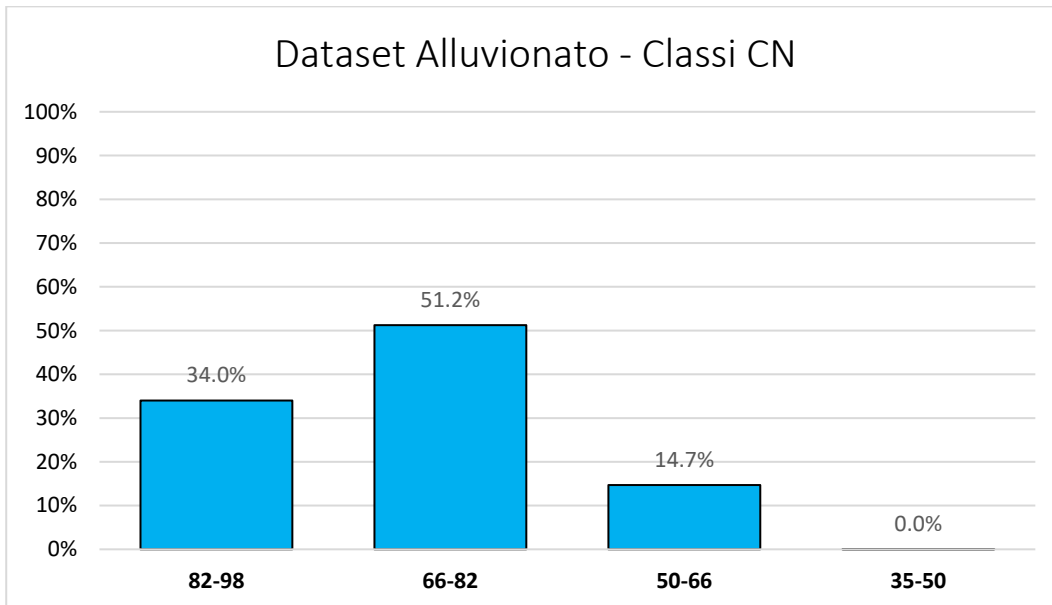


Figura 24. Distribuzione dataset aree inondate nelle classi del CN

La distribuzione dei dati osservati (Figura 23) e dei pesi rilevati permette di arrivare alla seguente conclusione: mentre non si rileva una forte correlazione tra la permeabilità dei suoli così costruita e gli eventi, esiste invece una sostanziale anti-correlazione tra le inondazioni e i suoli ad alta permeabilità, che sono in sostanza in grado di assorbire gli effetti al suolo e costituire condizioni avverse al rischio idraulico.

Quote relative

Il fattore delle quote relative, predisposto sulla base dei minimi locali in funzione della densità di drenaggio, è stato suddiviso per via empirica, fornendo una progressione aritmetica definita sulla base dei dati osservati (Figura 29): infatti, quasi la totalità del dataset delle inondazioni storiche si distribuisce entro un intervallo di variazione di 20 metri tra quote sul territorio e minimi locali. Tale assunto è coerente col fatto che difficilmente i fenomeni inondativi raggiungano quote relative elevate (Greco, et al., 2008). Infatti, le alluvioni sono guidate da un gradiente di carico idraulico e, pur sviluppandosi spesso in un gradiente di quota avverso, si tratta di percorsi di minima resistenza al moto e, più in generale, dal gradiente idraulico più favorevole.

La Figura 25 mostra come tale ragionamento sia convalidato dall'andamento dei pesi di correlazione morfologia-eventi osservati: si evidenzia una forte correlazione che decresce all'aumentare delle quote relative del territorio rispetto alle quote di reticolo.

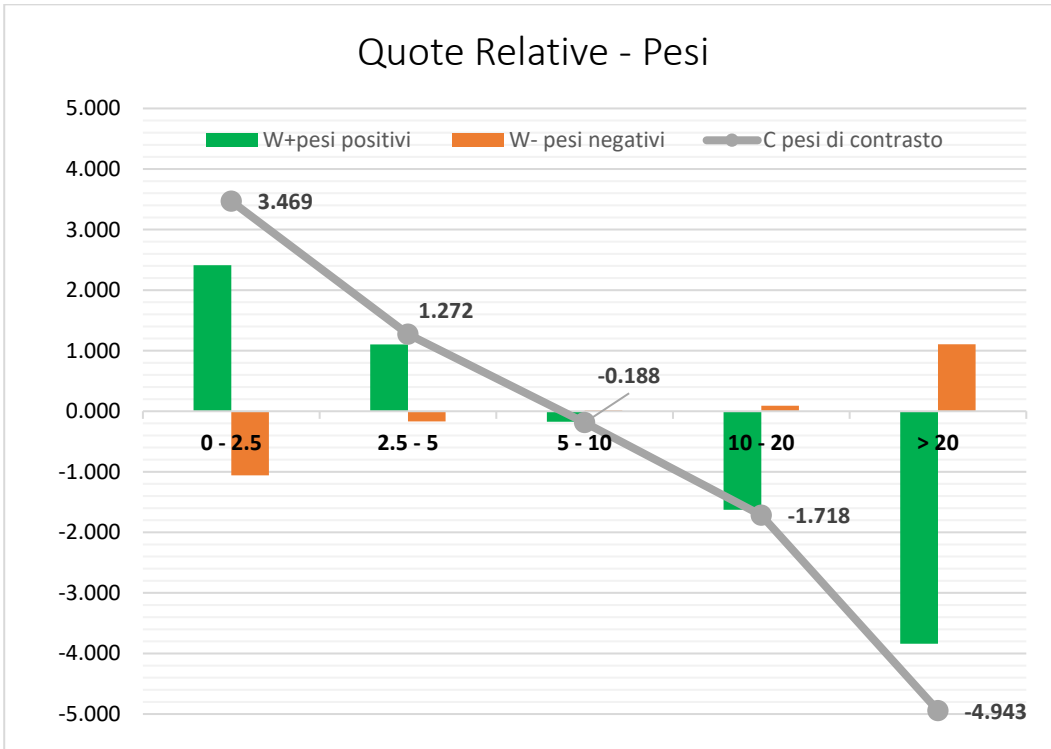


Figura 25. Distribuzione dei pesi delle classi di quota relativa

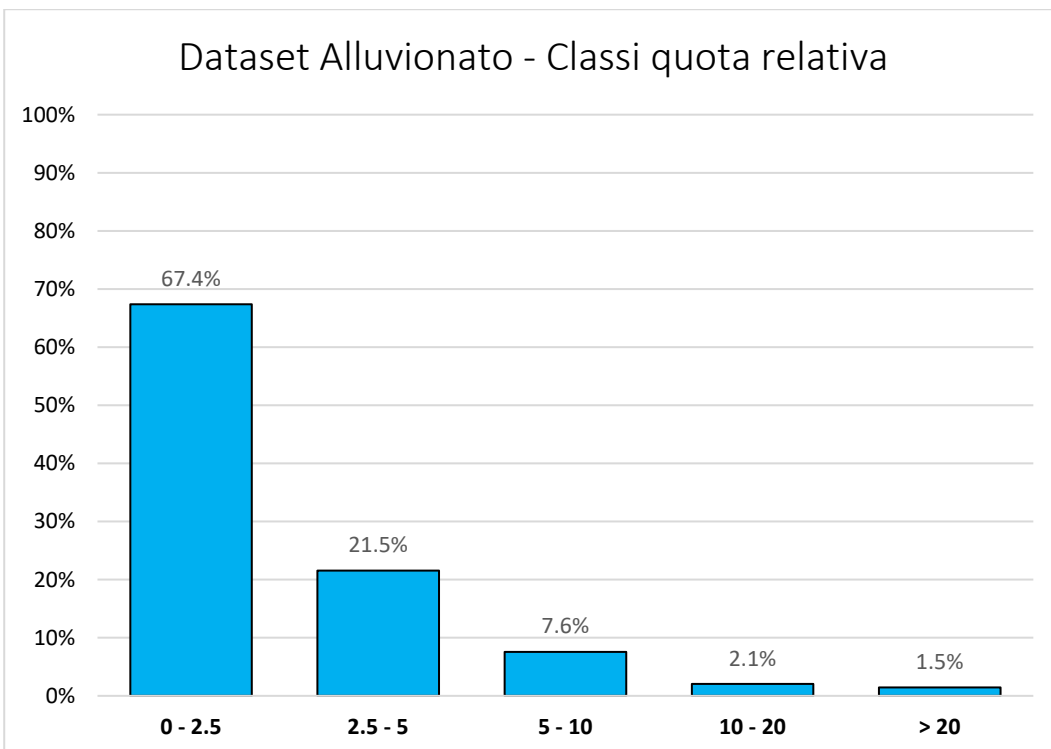


Figura 26. Distribuzione dataset aree inondate nelle classi delle quote relative

Distanze dal reticolo idrografico

Come per il fattore delle quote relative anche quello delle distanze dal reticolo idrografico è stato suddiviso per via empirica fornendo una progressione aritmetica definita sulla base dei dati osservati. Anche in questo specifico caso esiste una correlazione (Figura 27), com'è logico, tra le basse distanze dal reticolo idrografico e gli eventi osservati. Infatti, la posizione di un punto del territorio rispetto al reticolo di drenaggio costituisce notoriamente uno dei principali fattori predisponenti al fatto che venga inondato (Figura 28).

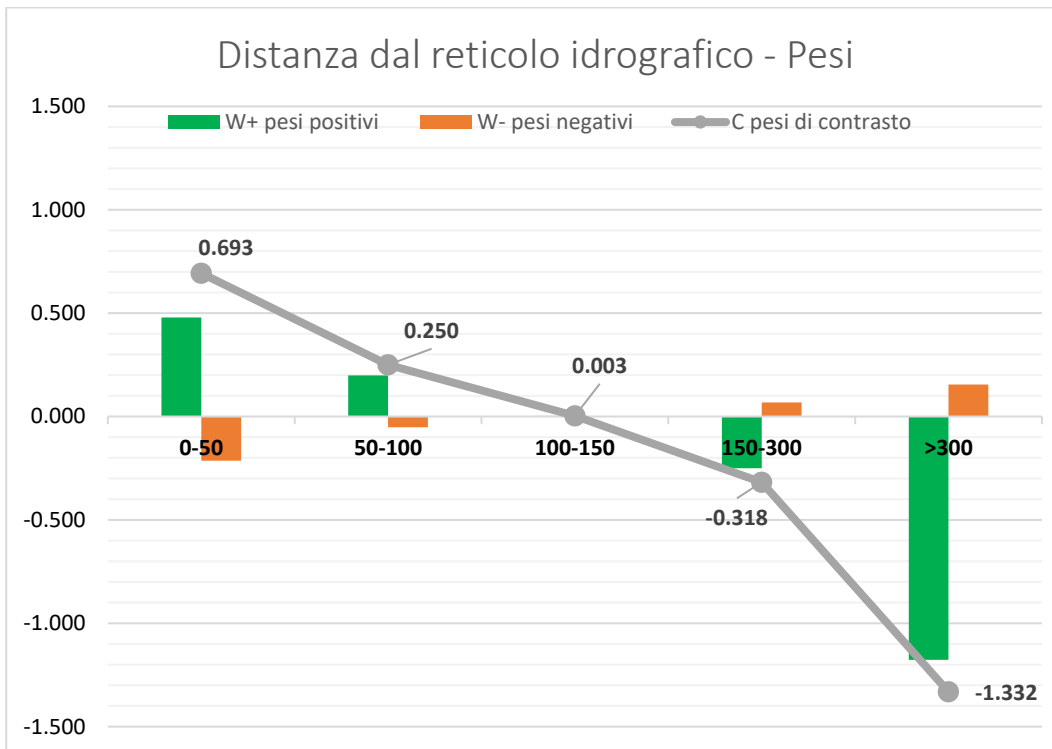


Figura 27. Distribuzione dei pesi delle classi di distanza dal reticolo

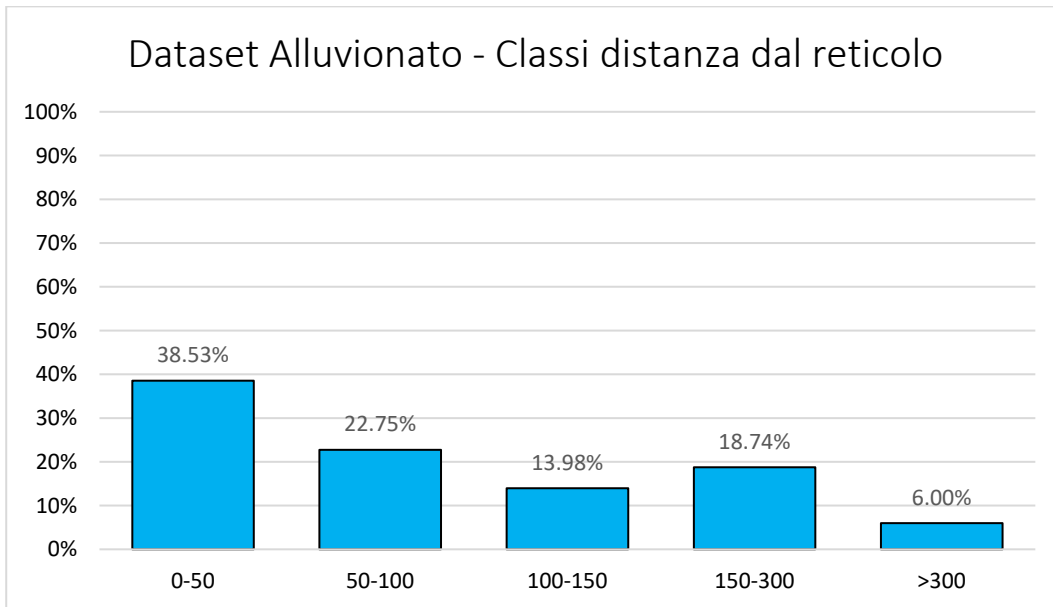


Figura 28. Distribuzione dataset aree inondate nelle classi di distanza dal reticolo

5.6. Risultati

Come precisato precedentemente, la differenza tra i due pesi viene definita come peso di contrasto C e indica la correlazione spaziale tra la classe del fattore predisponente e il verificarsi dell'evento: un peso di contrasto uguale o prossimo allo 0 indica l'assenza di relazione tra la classe del fattore e l'evento, mentre valori di contrasto positivi o negativi rivelano una correlazione spaziale positiva o negativa della propensione di aree con determinate caratteristiche ad essere interessate dall'evento alluvionale o meno. La combinazione lineare di tutti i valori di C per ciascuna classe di ogni fattore predisponente consente di calcolare la probabilità a posteriori del verificarsi dell'evento espressa attraverso un indice di suscettività da alluvione, adeguatamente normalizzato (Figura 29).

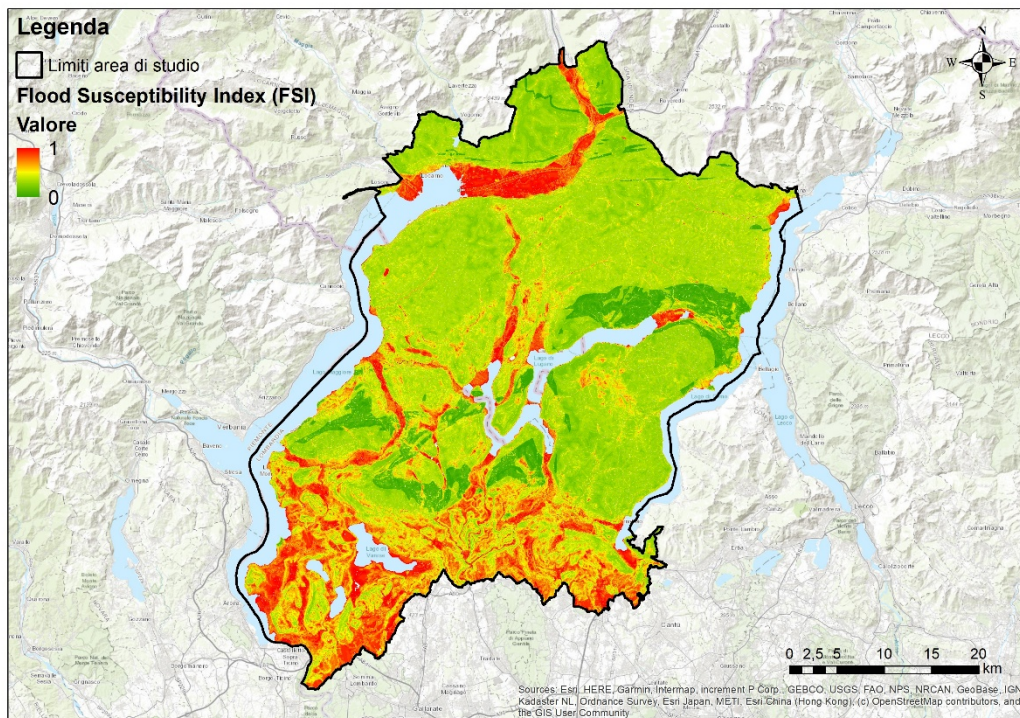


Figura 29. Indice di suscettibilità da alluvione (FSI)

Per favorire l'interpretazione dell'indice di suscettività è stato utile suddividere il range di valori in classi che individuino livelli di esposizione del territorio così da definire empiricamente quattro classi con corrispondenti intensità di predisposizione al rischio idraulico (trascurabile, bassa, media e alta). Partendo da una suddivisione più ampia (dieci classi con intervalli omogenei) sulla base della distribuzione dei dati di calibrazione riportata la classificazione ai quattro livelli di suscettività proposta nella mappa (Figura 30).

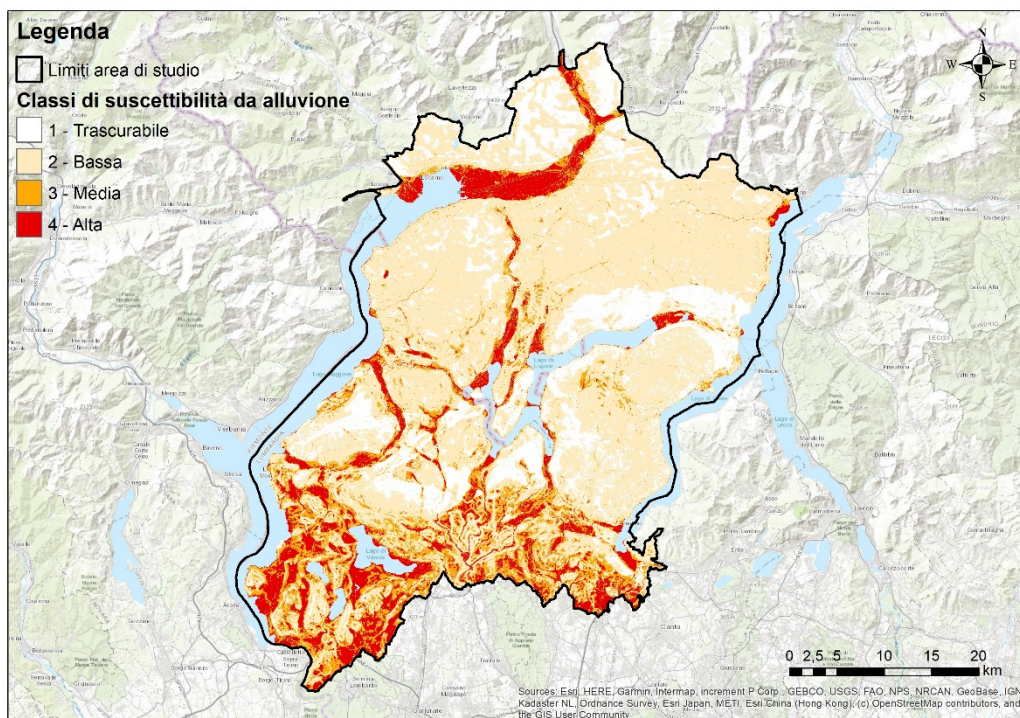


Figura 30. Mappa di suscettibilità da alluvione

Infine, per valutare il rendimento previsionale del metodo prescelto, sono state prodotte alcune statistiche sulla distribuzione del dataset osservato, sia in termini del sottoinsieme di calibrazione, che, ovviamente, di validazione. Quest'ultimo è stato costruito affinché contenesse aree inondate totalmente differenti da quelle utilizzate per la calibrazione del modello, per valutare la resa del modello su dati osservati indipendenti dai precedenti.

Dalla Figura 31 si possono trarre alcune conclusioni:

- che il modello abbia buone capacità nella descrizione degli eventi alluvionali osservati (oltre il 95% del dataset di calibrazione viene collocato in aree a medio-alta suscettività) e del territorio (circa il 20% del territorio analizzato viene definito a medio-alta suscettività).
- che vi sia una discreta stabilità a fronte di un diverso dataset di eventi (>70% della validazione viene collocato in aree a medio-alta suscettività).
- che il modello riesca a fornire un'immagine dei rischi del territorio in maniera efficace e precisa, senza dover assimilare come suscettibili porzioni eccessivamente ampie di territorio "bianco" per individuare le aree storicamente interessate da fenomeni alluvionali.

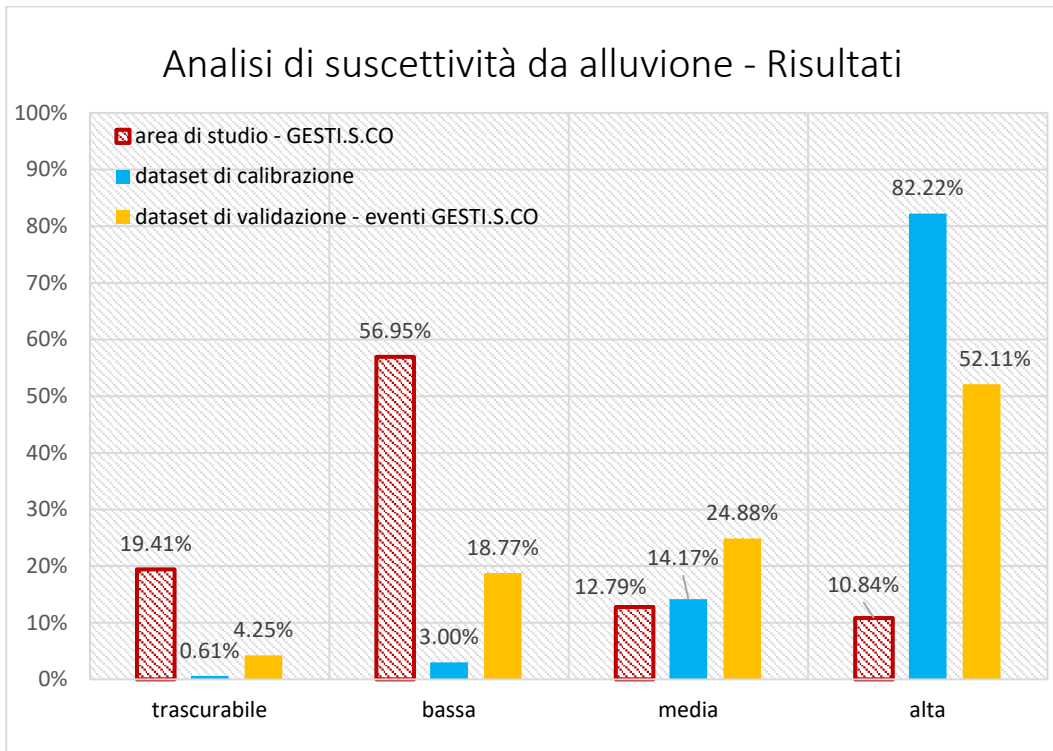


Figura 31. Risultati e statistiche dall'analisi di suscettività da alluvione

Tale mappatura fornisce così un facile strumento – aggiuntivo alle vigenti perimetrazioni di pericolosità idraulica – che possa rappresentare in maniera speditiva quelle che sono le minacce sul territorio derivanti dai fenomeni di inondazione. Si definisce in tal modo con un approccio concorrente e integrato un quadro, il più possibile esaustivo, degli eventi probabili e delle aree su cui insistono (Figura 32) (Figura 33), dando supporto all'analisi preliminare di definizione degli scenari di rischio idraulico.

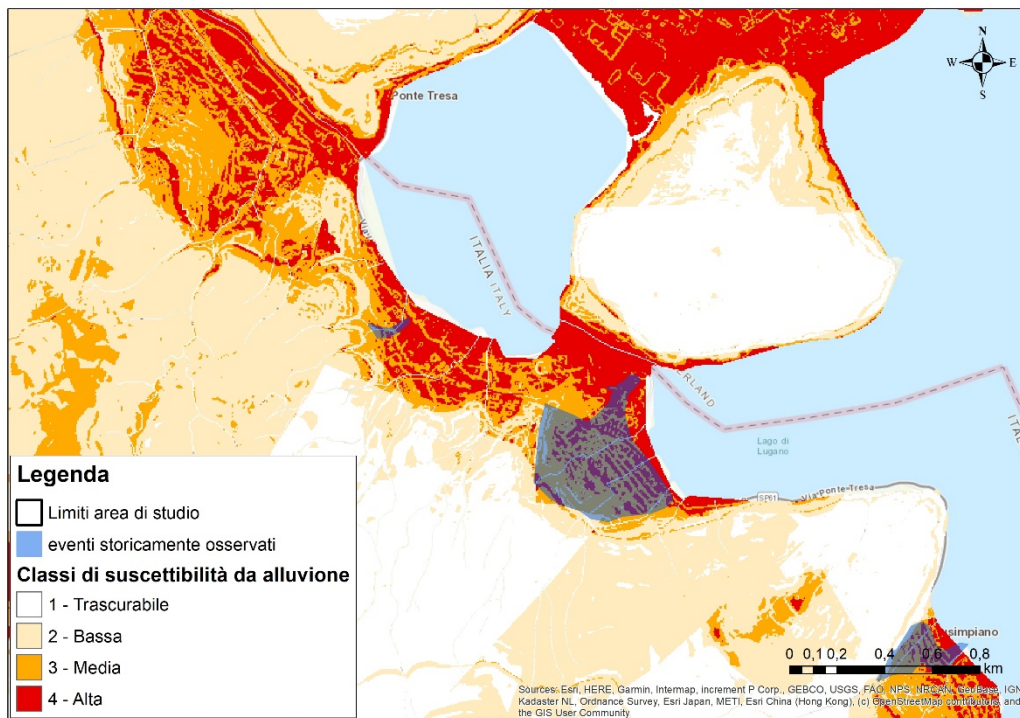


Figura 32. Mappa di suscettibilità da alluvione – caso di Lavena Ponte Tresa

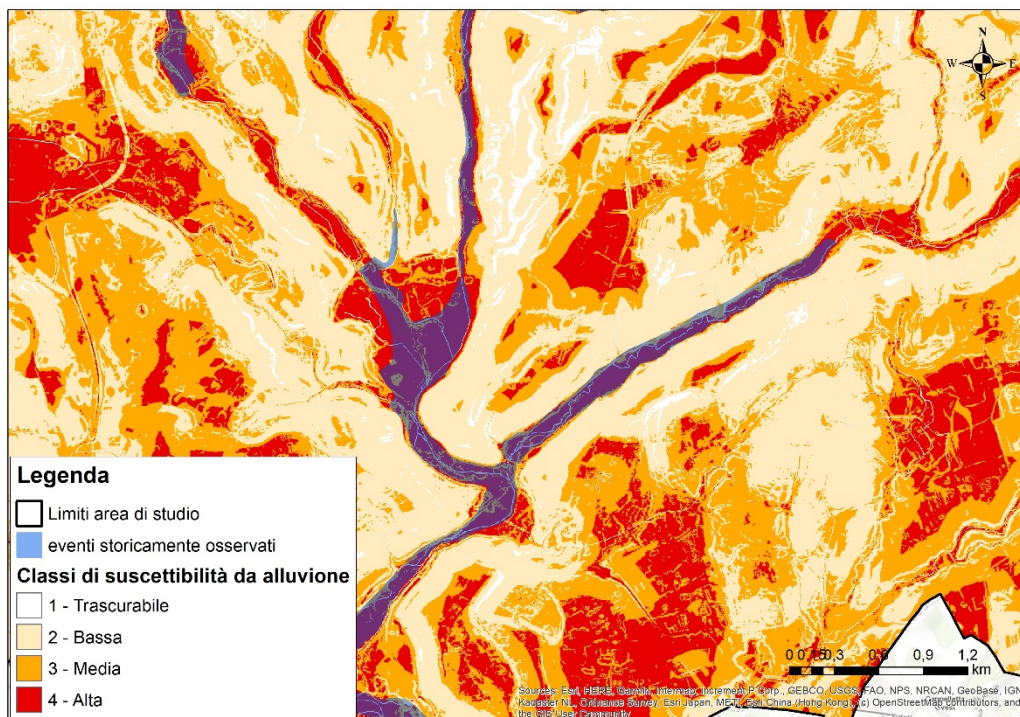


Figura 33. Mappa di suscettibilità da alluvione in corrispondenza dell'evento del 12-13 settembre 1995 sul fiume Olona

5.7. Sviluppi futuri

Questa prima proposta di mappatura di suscettività da alluvione del territorio di GESTI.S.CO si configura già come uno strumento utile per l'integrazione delle attuali informazioni a scala di bacino relative alle aree individuate a pericolosità idraulica, sia dal lato svizzero che da quello italiano. Tuttavia, si possono già identificare alcuni aspetti su cui insistere per un aggiornamento dello strumento sin qui elaborato:

- Continuo lavoro di aggiornamento e ampliamento del dataset di eventi osservati per calibrazione e validazione, anche con il coinvolgimento attivo degli enti di prossimità o altri soggetti che abbiano esperienza diretta dei rischi storicamente occorsi al territorio. Questo con l'obiettivo di incrementare le capacità predittive del modello e la sua stabilità. Questo aspetto costituisce l'effettivo punto di forza del metodo, ma al contempo vincola l'affidabilità del modello alla mole di dati storici di addestramento.
- Analisi di suscettività per la sola unità territoriale con caratteristiche omogenee rappresentata dalle fasce altimetriche di pianura e collina (più del 95% degli eventi osservati ricade in aree a quota inferiore a 600 m s.l.m., ovvero quelle aree definite da Istat come fasce di "pianura" e "collina"). Tale scelta, limitando la taratura del modello alla sola area interessata dagli eventi di inondazione, può nei fatti migliorare le rese descrittive del modello statistico in uso.
- Valutazione di ulteriori motori statistici suggeriti dalla letteratura che possano aumentare l'efficienza dell'analisi prodotta.
- Analisi dei contesti funzionali per la pianificazione d'emergenza a livello comunale. Ciò potrebbe permettere di testare a scala comunale su alcuni casi studio opportunamente suggeriti il funzionamento del modello di suscettibilità, le sue potenzialità e le sue criticità.
- Strutturazione di ulteriori strumenti che possano affiancare e favorire l'utilizzo della mappa di suscettibilità da alluvione (p.e. in fase di analisi degli scenari di evento da rischio idraulico), proponendo una procedura applicativa della mappa secondo passaggi codificati.

6. Incendi boschivi

*A cura di Giovanni Menduni, Michele Del Vecchio,
Francesco Rotondi, Federica Zambrini
(Politecnico di Milano – Polo di Lecco)
e di Daniele F. Bignami (Fondazione Politecnico di Milano)*

6.1. Introduzione

La mappatura della suscettività da incendio boschivo nasce con l'obiettivo di indicare le porzioni di territorio nelle quali la propensione al fuoco è maggiore o minore in funzione di determinati fattori. L'analisi prevede l'implementazione di un modello statistico addestrato sulla base delle relazioni esistenti tra i dati storici disponibili e i fattori predisponenti che caratterizzano il territorio per il fenomeno in esame. Questi elementi devono essere in grado di descrivere adeguatamente il contesto di applicazione, rappresentando quegli aspetti che possono facilitare l'innesco e lo sviluppo di un incendio. Le variabili scelte in questo studio sono sia di tipo naturale, come la pendenza, l'esposizione o la copertura del suolo, che antropico come la vicinanza da sentieri o da centri urbani per includere nel modello una variabile associata all'effetto della presenza dell'uomo sul territorio.

Il modello di suscettività calibrato e validato sugli eventi storici e sui punti di innesco ha richiesto quindi la suddivisione in classi dei fattori predisponenti selezionati e pesati attraverso la metodologia proposta dal modello statistico sopra citato, in base alla loro influenza sugli incendi boschivi.

Per rappresentare al meglio il fenomeno si è scelto di creare infine due differenti mappe, definite secondo quattro classi di suscettività (Trascurabile, Bassa, Media, Alta), che rappresentano la predisposizione del territorio agli incendi boschivi in periodo estivo ed invernale. Questa divisione è stata effettuata per evidenziare le differenze in ambito di copertura del suolo nelle due stagioni in funzione anche al rischio di incendiabilità delle stesse.

6.2. Il dataset

Affinché si possa addestrare il modello per la creazione delle mappe di suscettività è necessario identificare i dati storici delle aree percorse dal fuoco per l'intera area di studio. Le informazioni riguardanti gli incendi boschivi per la regione Lombardia vengono raccolte in una banca dati gestita

dall'Arma dei Carabinieri, la cui sezione Forestale si occupa di redigere un rapporto dettagliato sull'evento contenente:

- data, ora, località e coordinate dei punti di innesco, causa dell'incendio e relativo tempo di ritorno;
- area percorsa dal fuoco, tipologia di superficie e vegetazione coinvolta;
- durata della fase di spegnimento, con relativo personale e mezzi intervenuti;
- descrizione del territorio coinvolto.

Per quanto riguarda il Canton Ticino, le informazioni prelevate per ogni evento vengono registrate dai servizi forestali cantonali e, dal 2008, vengono collezionate nella banca dati incendi boschivi della Svizzera (Swissfire). I dati elvetici sono stati forniti da SUPSI-IST, partner del progetto, di comune accordo con l'Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve ed il paesaggio (WSL), che ha sviluppato il database (Pezzatti, Reinhard, & Conedera, 2010) e contengono informazioni simili al dataset italiano con l'aggiunta di indicazioni inerenti alla tipologia di suolo e vegetazione coinvolta.

Per poter effettuare le analisi i due dataset sono stati riportati sotto lo stesso sistema di riferimento UTM WGS84 fuso 32 N.

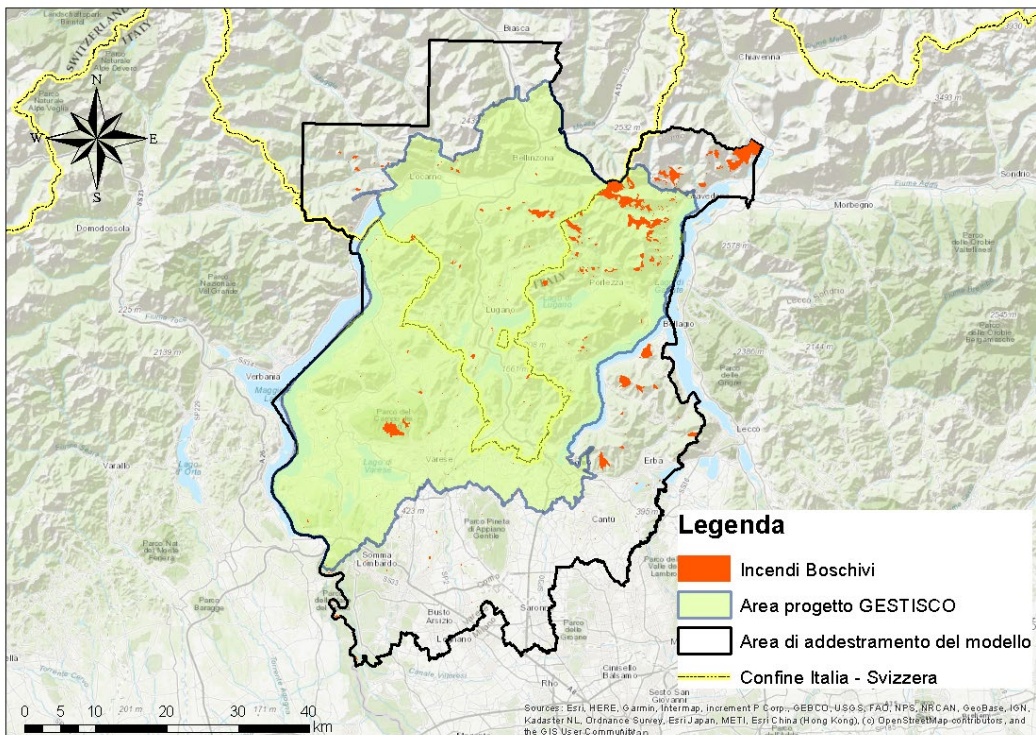


Figura 34. Rappresentazione degli incendi boschivi registrati nell'area di studio per decennio 2009-2018.

Come si può osservare dalla mappa in Figura 34 sono stati presi in considerazione anche eventi che ricadono al di fuori del confine dell'area di studio del progetto per permettere un miglior addestramento del modello. Il modello è stato infatti calibrato e validato su un territorio maggiore dell'area di studio che coincide con l'estensione del DTM transfrontaliero appositamente creato per il progetto GESTI.S.CO.

Tabella 4. Numero di incendi boschivi nell'area di addestramento del modello nel decennio 2009-2018.

	n. incendi	Area Bruciata km ²
IT	592	73.99
CH	160	5.60
Totale	752	79.59

All'interno dell'area di addestramento come si può vedere in Tabella 4 circa l'80% degli eventi ricade in territorio italiano. D'altra parte, è bene sottolineare che la percentuale di territorio lombardo compresa nell'area di studio è maggiore di quella ticinese, che copre poco meno del 35% della superficie esaminata.

Nei grafici seguenti sono riportate le distribuzioni annue e mensili del numero di incendi e delle aree percorse dal fuoco all'interno dell'area di addestramento del modello.

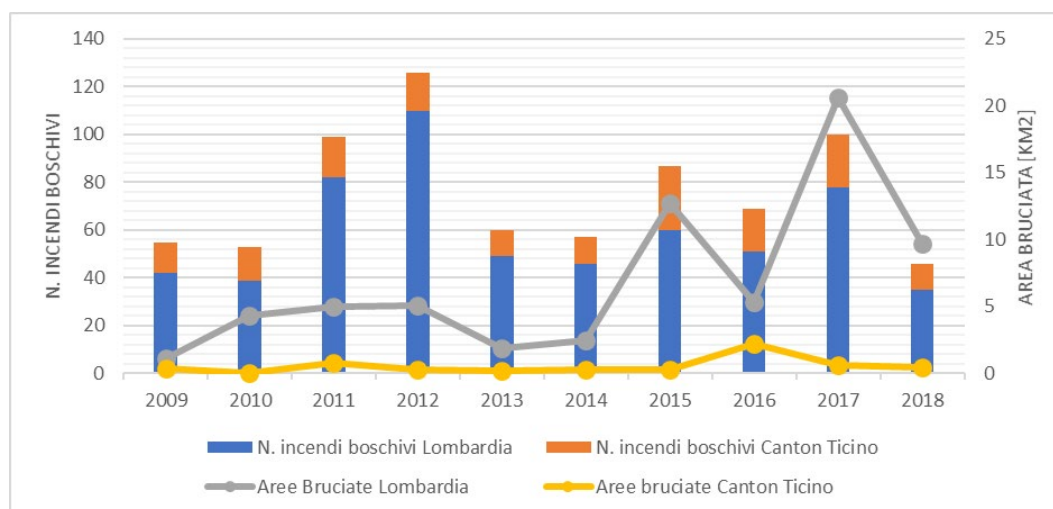


Figura 35. Distribuzione degli incendi boschivi e delle aree bruciate per il periodo 2009-2018

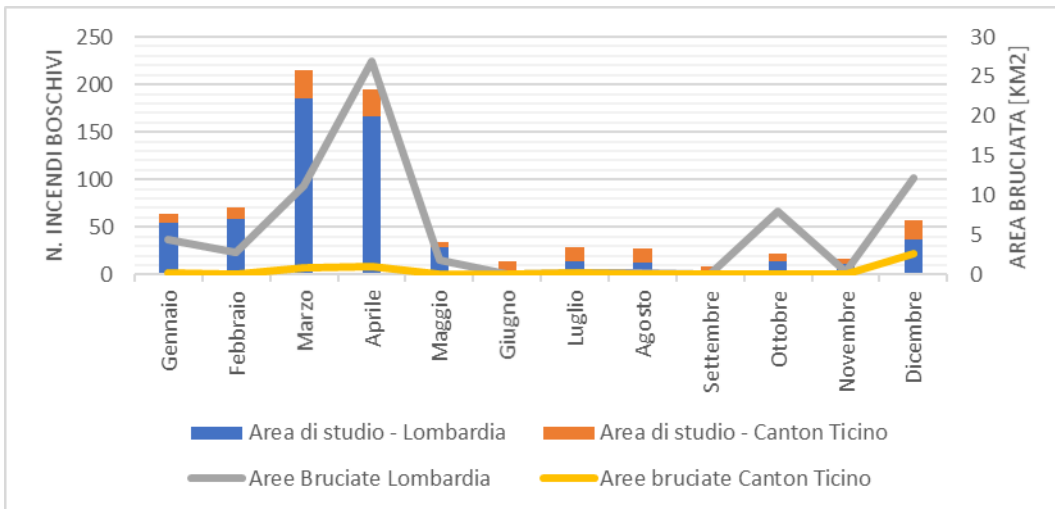


Figura 36. Distribuzione mensile degli incendi boschivi e delle aree bruciate nel periodo 2009-2018

Come si evince da Figura 36 appare evidente che l'intera area sia interessata da un regime di incendi principalmente invernali. La divisione del dataset in Incendi invernali ed estivi è stata effettuata a partire da un'analisi svolta dal Piano Antincendio Boschivo della Regione Trentino-Alto Adige (Provincia Autonoma di Trento, 2010) che identifica gli incendi invernali nei mesi da dicembre a maggio e quelli estivi da giugno a novembre.

6.3. Fattori predisponenti

I fattori predisponenti per quanto riguarda il rischio incendi boschivi sono stati selezionati sulla base dell'analisi della letteratura scientifica (si vedano ad esempio (Keane, Drury, Karau, Hessburg, & Reynolds, 2010), (Pourtaghi, Pourghasemi, Aretano, & Semeraro, 2016)) e delle prassi in uso in Italia (piani regionali antincendio boschivo) ed in Svizzera.

In particolare, si sono identificati quali fattori predisponenti dell'incendiabilità:

- fattori morfologici, direttamente derivabili dal modello digitale del terreno (Quote assolute, Slope, Aspect)
- l'uso del suolo e la conseguente propensione all'incendiabilità
- la distanza dal reticolo stradale
- la distanza da tessuto urbanizzato e dai terreni seminativi
- la distanza dal lago.

Vediamo ora nel dettaglio questi fattori, ed i pesi ad essi associati nel modello

Quote

Le quote assolute sono uno dei fattori più frequentemente considerati nella definizione della suscettività agli incendi di un territorio. La quota influenza, infatti, il tipo di vegetazione, e quindi la tipologia e la disponibilità di combustibile per la propagazione del fenomeno, nonché la temperatura, altro fattore chiave nella dinamica del fenomeno.

Lo strato informativo di riferimento per questo parametro è il DEM ricampionato per il progetto, così come spiegato in precedenza nel presente report. Come conseguenza, questo fattore predisponente, così come gli altri fattori morfologici di cui diremo a breve, sono ottenuti in modo omogeneo per i due paesi.

Le quote sono state suddivise in cinque classi, sulla base delle considerazioni di ISTAT inerenti la classificazione per zona altimetrica, di collina, di montagna e di pianura.

Di conseguenza, la prima classe comprende valori tra 0 e 300 metri s.l.m. che definiscono le aree di pianura, mentre la seconda include le quote tra 300 e 700 metri s.l.m., tipiche del contesto collinare.

La porzione montuosa invece è distribuita su diverse classi, in funzione delle analisi fitogeografiche⁴ svolte per la vegetazione italiana. In particolare, la terza classe, comprende il range di quote 700 - 1500 m s.l.m., definito come piano montano inferiore e costituito principalmente da boschi di latifoglie. Il quarto intervallo viene rappresentato dal piano montano superiore, compreso tra i 1500 m s.l.m. e i 2000 m s.l.m., e caratterizzato dai boschi di conifere (Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura, 2003).

Per quote superiori ai 2000 si definisce infine il piano alpino, che è compreso tra il limite superiore della vegetazione arborea e il limite superiore dei prati continui. L'ultima classe in analisi è quindi compresa tra i 2000 m s.l.m. e la quota massima presente sul sito, pari a 2955 m s.l.m.

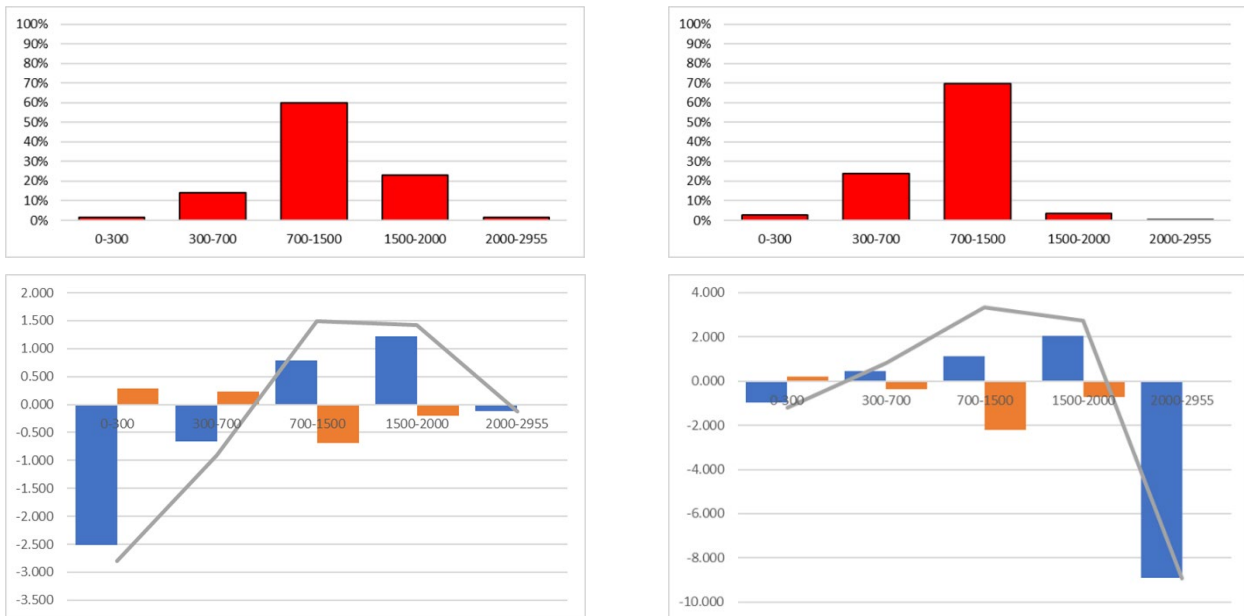


Figura 37. Ripartizione dei pixel bruciati per classi di altitudine (alto) e calcolo dei pesi positivi (W^+) in blu e negativi (W^-) in arancione (basso). A sinistra per l'inverno, a destra per l'estate

Dalla Figura 37 è possibile notare come per entrambe le stagioni la fascia dove si riscontrano la maggior parte di pixel bruciati è quella del piano montano inferiore. La distribuzione mostra altresì delle differenze tra le due stagioni, seppure l'andamento sia il medesimo. Interessante notare, in periodo estivo, il sensibile innalzamento che il peso della prima classe subisce, insieme all'abbassamento di quello della classe per il piano montano superiore: questo risultato suggerisce una generale predisposizione del territorio ad accogliere gli incendi boschivi estivi anche a quote molto basse, rispetto al corrispettivo fenomeno in periodo invernale.

Sempre per quanto riguarda i pesi, si nota una correlazione positiva tra incendi e quote tra 700 e 2000 m.s.l.m. in entrambe le stagioni

Esposizione

L'esposizione è un altro fattore morfologico ampiamente impiegato nelle analisi di suscettività da incendio boschivo, in quanto permette di tenere conto dell'irraggiamento solare, parametro che influenza fattori fisici importanti per lo sviluppo delle fiamme, quali la circolazione delle masse d'aria, la temperatura locale ed il contenuto di umidità del suolo. Lo strato informativo è stato ricavato in ambiente GIS a partire dal DEM. In questo caso, le classi sono quelle di default dell'algoritmo di produzione dello strato, che indicano le otto direzioni.

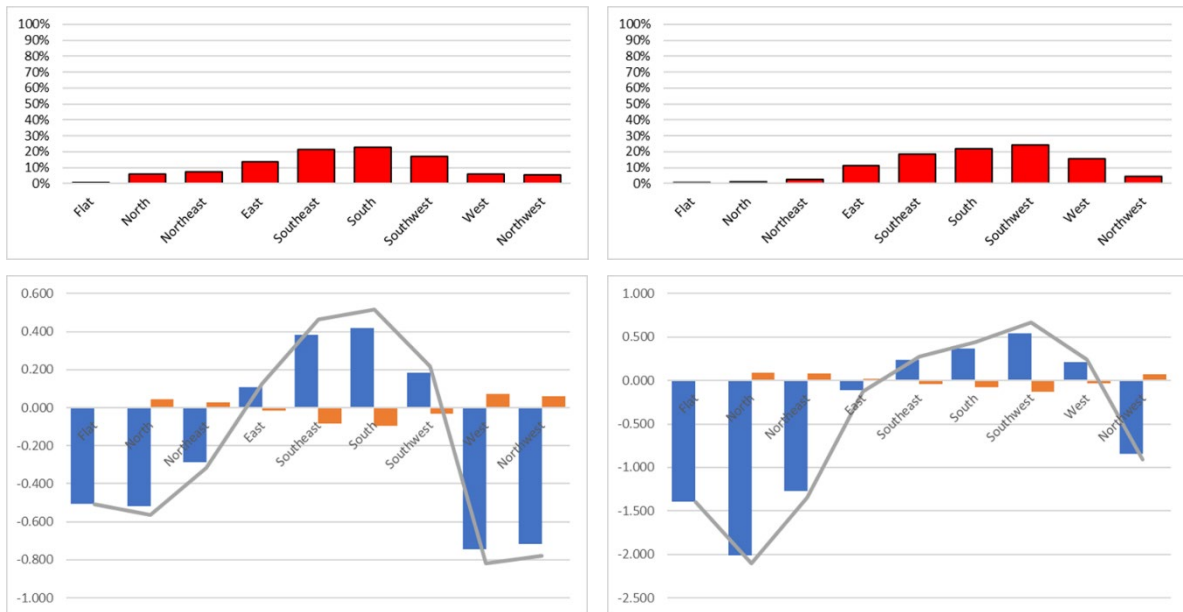


Figura 38. Ripartizione dei pixel bruciati per classi di esposizione (alto) e calcolo dei pesi dei pesi positivi (W+) in blu e negativi (W-) in arancione (basso). A sinistra per l'inverno, a destra per l'estate

In questo caso, è possibile osservare come vi sia effettivamente una variazione delle classi correlate positivamente o negativamente all'occorrenza dei pixel bruciati che cambia con la stagione, in entrambe le stagioni sono comunque dominanti le occorrenze di incendi con esposizione in direzione sud/sud-est/sud-ovest, come per altro riportato in letteratura (Regione Lombardia, 2020)

Slope

L'ultimo fattore morfologico oggetto di analisi sono le pendenze dei versanti, anche in questo caso elaborate in ambiente GIS a partire dal DEM, calcolate come percentuale di variazione delle quote per ogni cella. Si tratta di un parametro che influenza la velocità di propagazione degli incendi, in quanto favorisce lo sviluppo del così detto effetto camino. Alcuni autori evidenziano inoltre come la presenza della pendenza induca un'inclinazione della fiamma, che si avvicina così al combustibile (Ghobadi, Gholizadeh, & Dashliburun, 2012).

Come precisato per la costruzione del fattore predisponente in uso per la suscettibilità da alluvione in generale in letteratura non sono indicate delle modalità univoche per la costruzione degli intervalli dei singoli fattori predisponenti. Solitamente si ricorre alle suddivisioni proposte nei software GIS (intervalli uguali, quantile...), proprio perché la definizione delle classi è utile, prima ancora che a classificare il territorio in porzioni con caratteristiche morfologiche omogenee, a creare degli intervalli che siano rilevanti ai fini dell'analisi statistica di suscettività.

Le pendenze locali del territorio di analisi statistica sono state classificate secondo una suddivisione in 5 classi, in funzione dell'angolo di pendenza¹¹.

Si sono così definite sei classi: tra 0 e 3 gradi, tra 3 e 8.5, tra 8.5 e 16.5, tra 16.5 e 35 e infine pendenze molto acclivi superiori ai 35 gradi. I grafici corrispondenti alla ripartizione dei pixel nelle diverse classi sono riportati in Figura 39

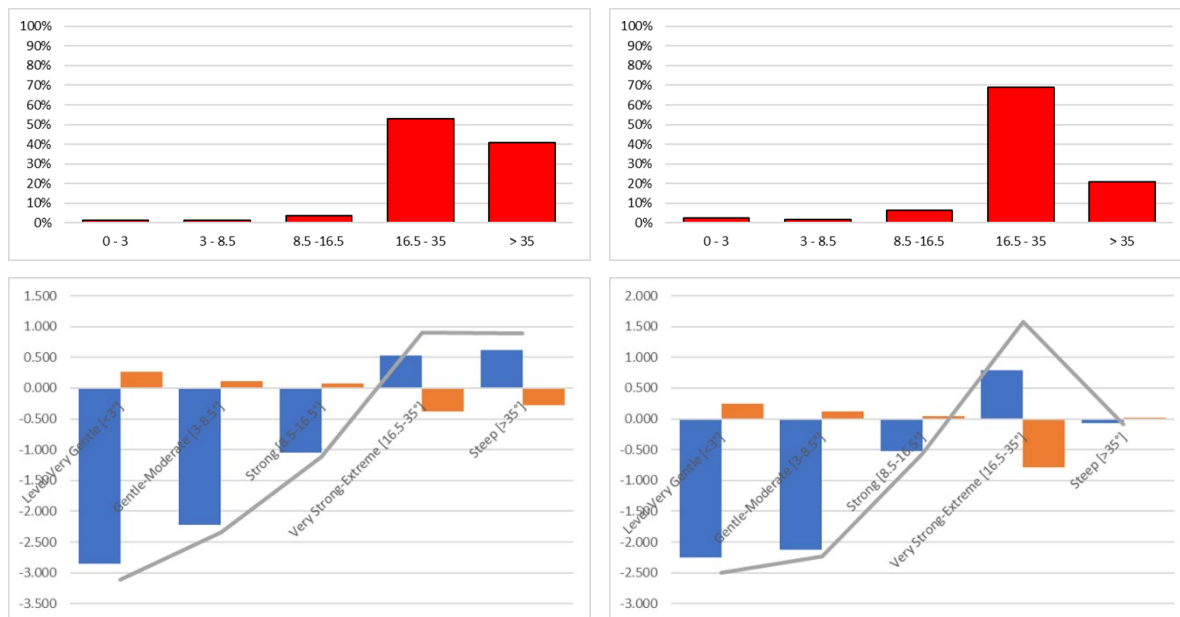


Figura 39. Ripartizione dei pixel bruciati per classi di pendenza (alto) e calcolo dei pesi dei pesi positivi (W+) in blu e negativi (W-) in arancione (basso). A sinistra per l'inverno, a destra per l'estate

Dall'immagine è possibile notare come venga confermata l'ipotesi, già riscontrata in letteratura, per la quale gli incendi sono correlati positivamente con un incremento delle pendenze. Interessante inoltre notare la differenza stagionale per quello che riguarda la classe superiore, che mostra durante la stagione estiva una flessione dell'andamento.

Copertura del suolo e rischio di incendio

I diversi tipi di uso del suolo rappresentano uno dei fattori che determinano il comportamento del fuoco e la propagazione che esso può avere sul territorio. Dalle caratteristiche vegetative presenti è infatti possibile definire il grado di rischio incendio del territorio in esame. Per rischio di incendio si intende la somma delle variabili, che rappresentano la propensione delle diverse formazioni vegetali a essere percorse più o meno facilmente dal fuoco (Marchetti, Bertami, & Scatarzi, 2007).

¹¹ <https://geographyfieldwork.com/SlopeSteepnessIndex.htm>

Tale indice di rischio è funzione di diverse caratteristiche del materiale combustibile e dipende inoltre dalla stagione, estiva o invernale. Grazie alla classificazione effettuata da Marchetti et al. che mette in relazione alle singole categorie di uso del suolo, secondo il Corine Land Cover (CLC), un diverso grado di rischio secondo la stagione, è stato possibile utilizzare questo fattore per il nostro caso di studio. Per classificare in modo più preciso il territorio di studio si è voluto utilizzare una differente classificazione dell'uso del suolo rispetto al CLC andando ad utilizzare l'Uso e copertura del suolo realizzato nell'ambito del progetto DUSAF (Destinazione d'Uso del Suolo Agricolo e Forestale) per il territorio italiano e il Modello topografico dettagliato del paesaggio svizzero (swissTLM3D) per il territorio del Canton Ticino.

Si è quindi proceduto affiancando ad ogni tipologia di uso di suolo il rispettivo grado di rischio per la stagione estiva e per quella invernale identificando cinque differenti classi:

Tabella 5. Classificazione del grado di rischio incendio dell'uso del suolo

Classe di Rischio	Intervallo grado di Rischio
Nulla	--
Basso	0-25
Medio-basso	25 - 50
Intermedio	50 - 75
Elevato	75 - 100

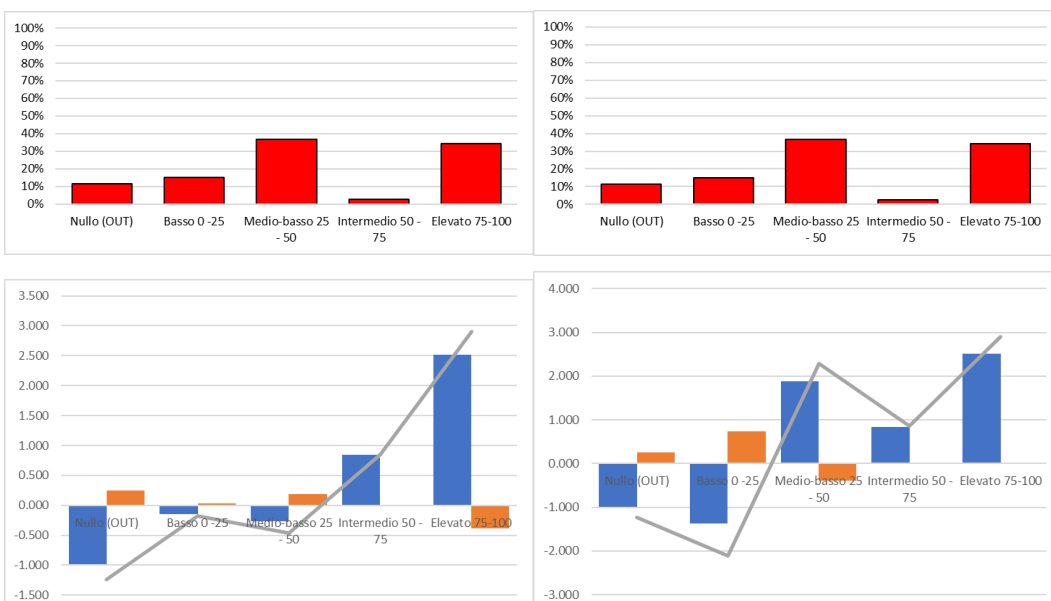


Figura 40. Ripartizione dei pixel bruciati per classi di rischio di incendio (alto) e calcolo dei pesi dei pesi positivi (W+) in blu e negativi (W-) in arancione (basso). A sinistra per l'inverno, a destra per l'estate

È utile notare la correlazione positiva che insiste laddove il grado di rischio incendi è elevato, come ci si poteva aspettare dalle analisi di letteratura. La bassa correlazione della classe Intermedia, sia in periodo invernale che estivo, è data dalla limitata presenza di coperture del suolo con caratteristiche di incendiabilità tali da ricadere all'interno della sopracitata classe.

Distanza dalla rete sentieristica

Dalle analisi di letteratura emerge come gran parte degli eventi di incendio boschivo e di interfaccia siano profondamente influenzati dalle attività umane (Ricotta, Bajocco, Guglietta, & Conedera, 2018). Questo aspetto emerge anche dalle prime analisi effettuate sul territorio dell'area di studio, in cui per il decennio 2009-2018 il 60% degli eventi registrati sono riconducibili a comportamenti negligenti o dolosi. Dallo studio condotto da Fasciani e Mastroieni nella tesi di laurea sull'Analisi di suscettività da incendio boschivo transfrontaliero, dove vengono analizzate tutte le tipologie di strade in relazione alle aree percorse dal fuoco e ai punti di innesco, si evince come la prossimità alle strade, in particolare sentieri e strade forestali, è un aspetto che va considerato nello studio di suscettività da incendio boschivo (Fasciani & Mastroieni, 2020).

Si è dunque scelto di analizzare solo i sentieri e le strade forestali, come analizzato da Fasciani e Mastroieni, andando a classificare il dato secondo sei differenti classi. Nei grafici sottostanti vengono riportate le correlazioni dei pixel bruciati in funzione alle classi di distanza dalle strade nel periodo invernale ed estivo.

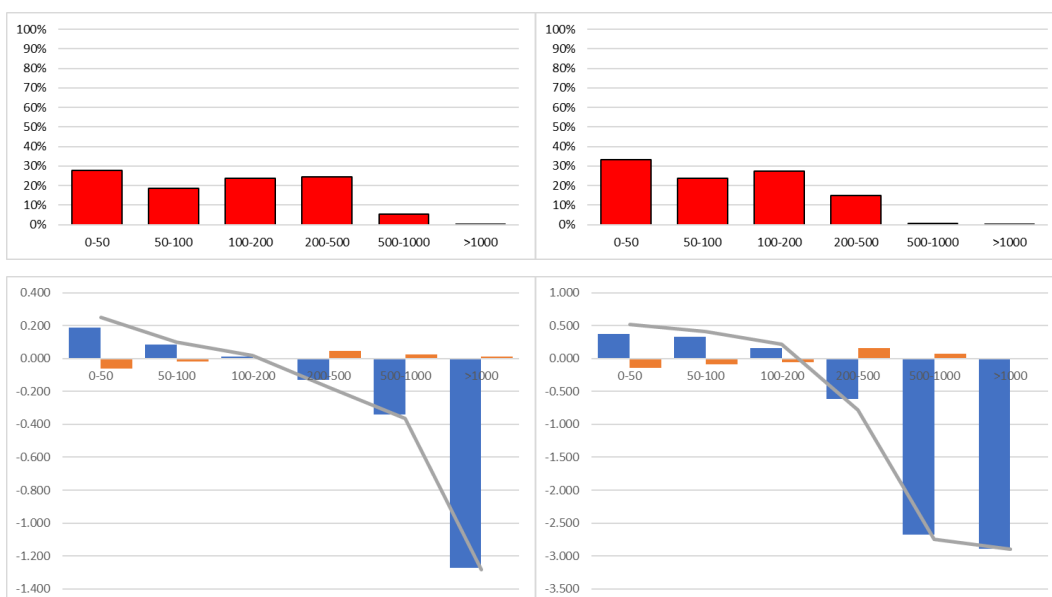


Figura 41. Ripartizione dei pixel bruciati per classi di distanza dai sentieri (alto) e calcolo dei pesi dei pesi positivi (W+) in blu e negativi (W-) in arancione (basso). A sinistra per l'inverno, a destra per l'estate

Si può dunque notare come sussista una moderata correlazione fino ad una distanza di 200m dalle strade sia in periodo invernale che estivo. Aumentando la distanza l'anticorrelazione aumenta notevolmente fino a raggiungere valori molto bassi oltre il chilometro di distanza.

Distanza da urbanizzato e seminativi

Come la distanza dalla rete stradale, anche la vicinanza al tessuto urbanizzato e ai seminativi è un fattore determinante per tenere in considerazione l'influenza dell'uomo sugli incendi boschivi.

Andando a identificare quelle zone che, secondo il Corinne Land Cover, ricadono in queste due tipologie di uso del suolo, si è potuto classificare la distanza euclidea da essi in cinque differenti classi.

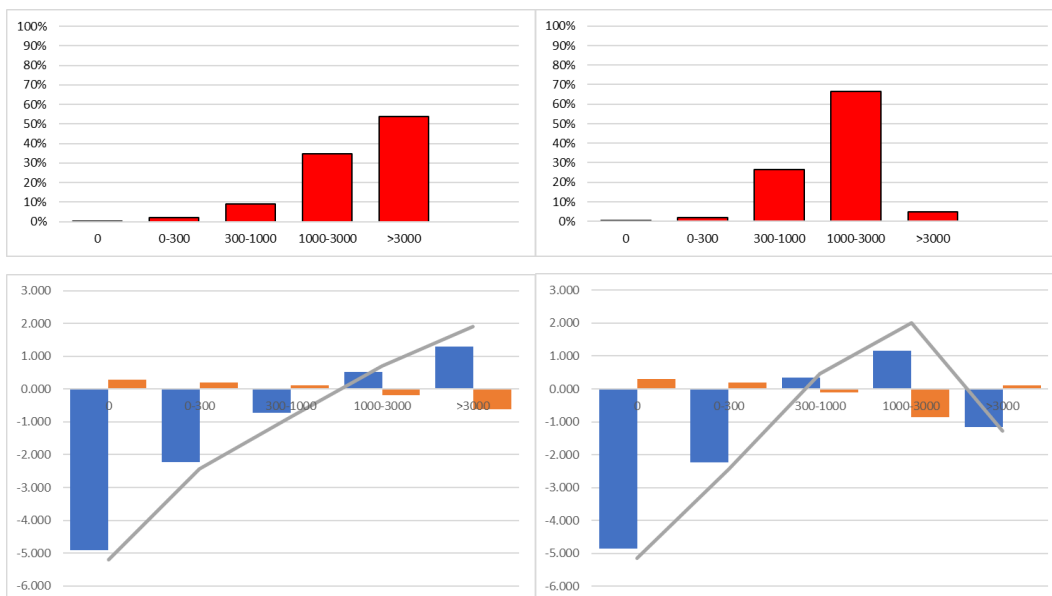


Figura 42. Ripartizione dei pixel bruciati per classi di distanza dai centri abitati e dalle zone seminative (alto) e calcolo dei pesi dei pesi positivi (W+) in blu e negativi (W-) in arancione (basso).

Come si può notare da questi grafici la correlazione positiva è molto evidente, specialmente in periodo invernale, oltre i 1000 m di distanza. Questo significa come in prossimità di suoli urbanizzati e seminativi la correlazione è pressoché nulla.

Distanza dai laghi

L'ultimo fattore predisponente che è stato considerato è quello della distanza dai laghi. È noto, infatti, come la presenza di un lago generi, a causa della maggiore inerzia termica delle masse d'acqua

rispetto alla terraferma, effetti locali su microclima e soprattutto venti di brezza¹². La correlazione tra brezze marine o lacuali ed incendi è documentata in letteratura, seppure ancora con un numero limitato di lavori. A titolo di esempio, si può citare un lavoro abbastanza recente formulato per la Florida (Hanley, Cunningham, & Goodrick, 2013). Ma è un fenomeno insidioso, che muta la direzione dei venti con l'alternarsi del giorno e della notte e alimenta di nuovo ossigeno le fiamme, rendendo gli incendi boschivi più violenti e imprevedibili e quindi meno facili da contrastare (e di conseguenza più duraturi e pericolosi per le comunità e gli abitanti); tale situazione nel particolare territorio del progetto GESTISCO va a sommarsi agli effetti delle brezze di monte e di valle, presenti ovunque un territorio sia caratterizzato da orografia marcata, generando una situazione di variabilità anemometrica più accentuata che in altri territori alpini (come ben sanno gli esperti di vela che frequentano i nostri laghi).

¹² Poiché l'acqua ha un maggiore calore specifico rispetto al terreno, essa si riscalda e si raffredda più lentamente rispetto al suolo che, invece, tende a cedere il calore all'aria più velocemente. Di conseguenza, l'effetto è che il terreno di giorno si scalda, e riscalda l'aria che lo sovrasta e questa tende a espandersi e innalzarsi. Questo fenomeno implica una variazione della pressione al livello della superficie terrestre, di conseguenza l'aria che si trova sopra la superficie delle masse d'acqua (lacuali), più fresca si sposta verso la terraferma inducendo un vento, per quanto generalmente debole. Durante la notte la situazione si inverte. Il terreno si raffredda più velocemente delle masse d'acqua (lacuali) e questa situazione genera un vento dalla terraferma verso le masse d'acqua, detta brezza di terra.



Figura 43 Incendio nei boschi sopra Brusino Arsizio (CH), Lago di Lugano, le cui cronache raccontano di vento che imperversava sulla zona rendendo le operazioni piuttosto complicate (<https://www.cdt.ch/ticino/lugano/incendio-nei-boschi-sopra-brusino-arsizio-HB239>)

Inoltre, lungo la linea di costa si concentrano le massime densità di tessuto abitato, turistico, viario ed edificato, comunque ancora una volta rilevanti nel territorio del progetto GESTISCO rispetto ad altre zone alpine e prealpine, fattore questo che può rendere interessante l'analisi della correlazione di questo fattore con la presenza o meno di pixel bruciati.

La classificazione è stata fatta su quattro classi, tra 0 e un chilometro, tra uno e due, tra due e quattro e poi oltre i quattro chilometri dalla linea di costa. Si tratta di una classificazione basata sull'osservazione del territorio, svolta in modo empirico. Un'analisi più accurata per la quantificazione del parametro “*breeze inland penetration*” (penetrazione nell'entroterra delle brezze) verrà svolta per sviluppi futuri del prodotto.

Si riportano ora in Figura 44 le distribuzioni dei pixel bruciati per le diverse classi, e i relativi pesi.

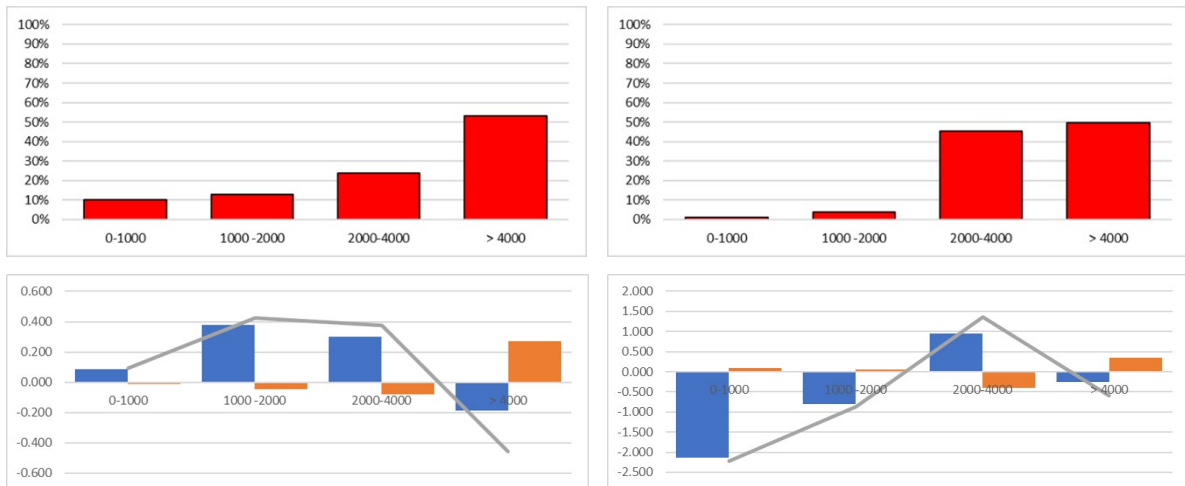


Figura 44 Ripartizione dei pixel bruciati per classi di distanza dai laghi (alto) e calcolo dei pesi dei pesi positivi (W+) in blu e negativi (W-) in arancione (basso). A sinistra per l'inverno, a destra per l'estate

È interessante osservare come, pur risultando per entrambe le stagioni che le fasce più lontane dalla superficie lacuale sono quelle più soggette agli incendi, i pesi per entrambe le stagioni mostrano degli andamenti caratterizzati da un picco in una classe intermedia (con un andamento diverso sulle due stagioni) seguito da un cambio di tendenza, che segna un ritorno all'anti correlazione.

6.4. Risultati

Tutti gli strati informativi dei fattori predisponenti sono stati pesati nell'analisi sulla base di quanto mostrato sino ad ora.

I quattro risultati che presentiamo in questo paragrafo sono, per entrambe le sezioni, la mappa per classi di suscettività e il *Wildfire Susceptibility Index*, caratterizzato da un campo di valori continuo.

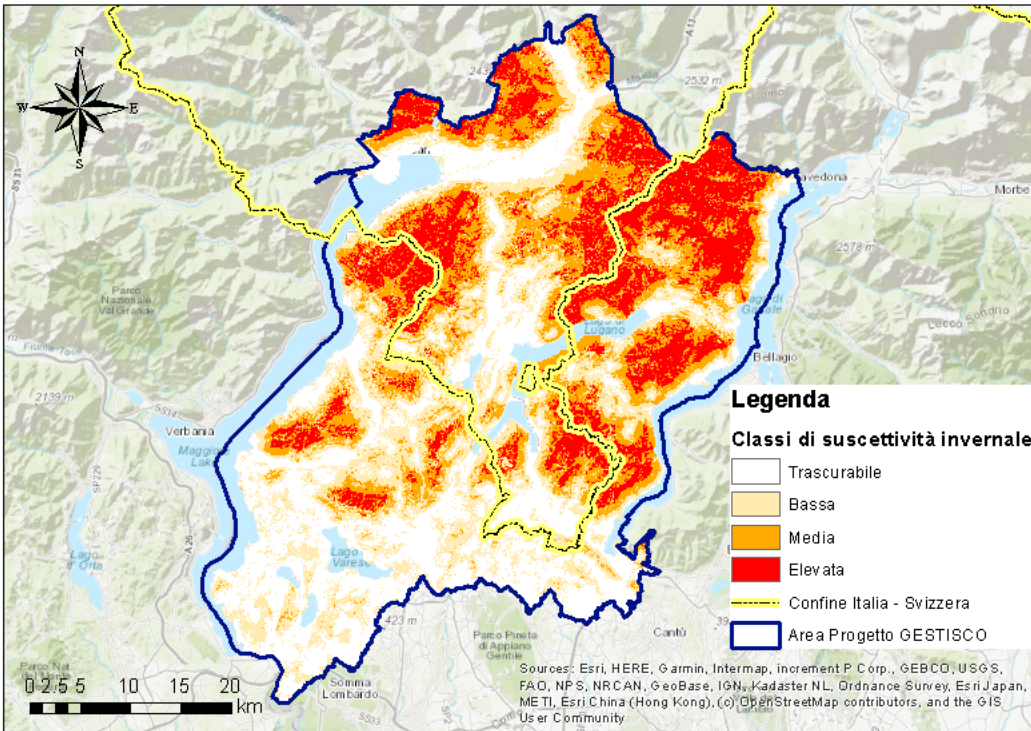


Figura 45. Mappa per classi di suscettività invernale

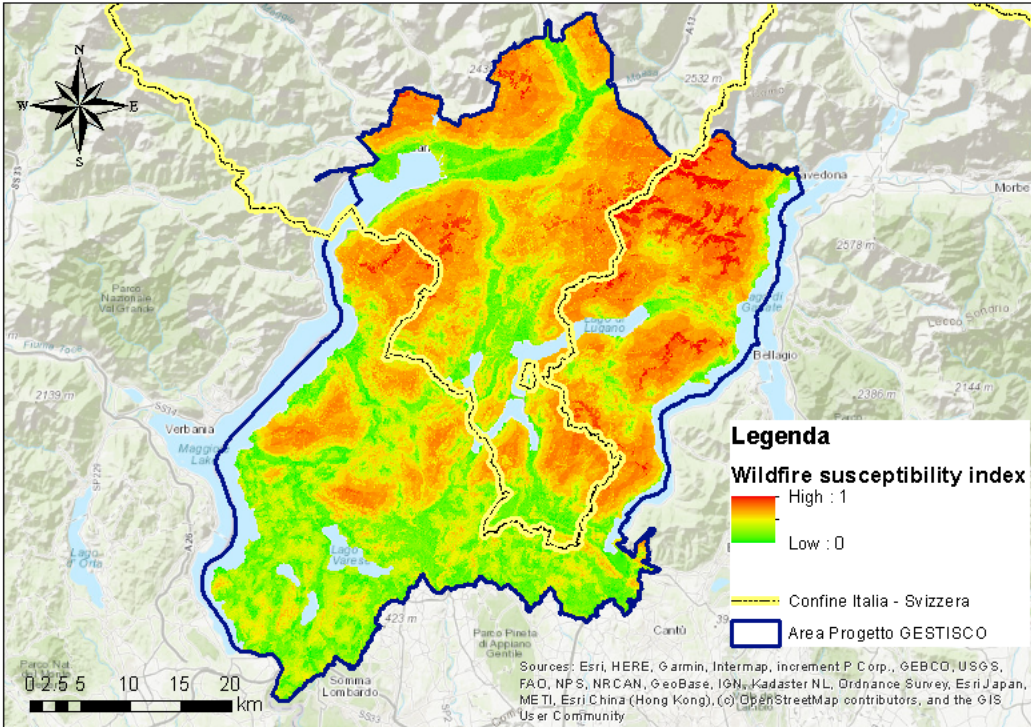


Figura 46. Wildfire susceptibility index invernale

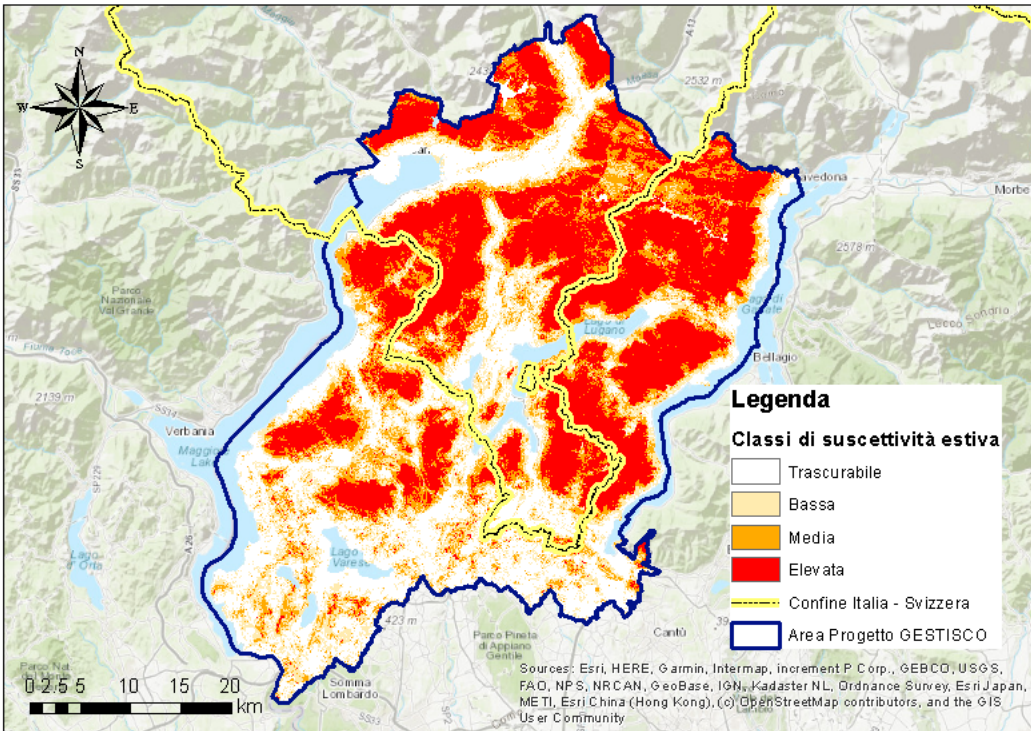


Figura 47. Mappa per classi di suscettività estiva

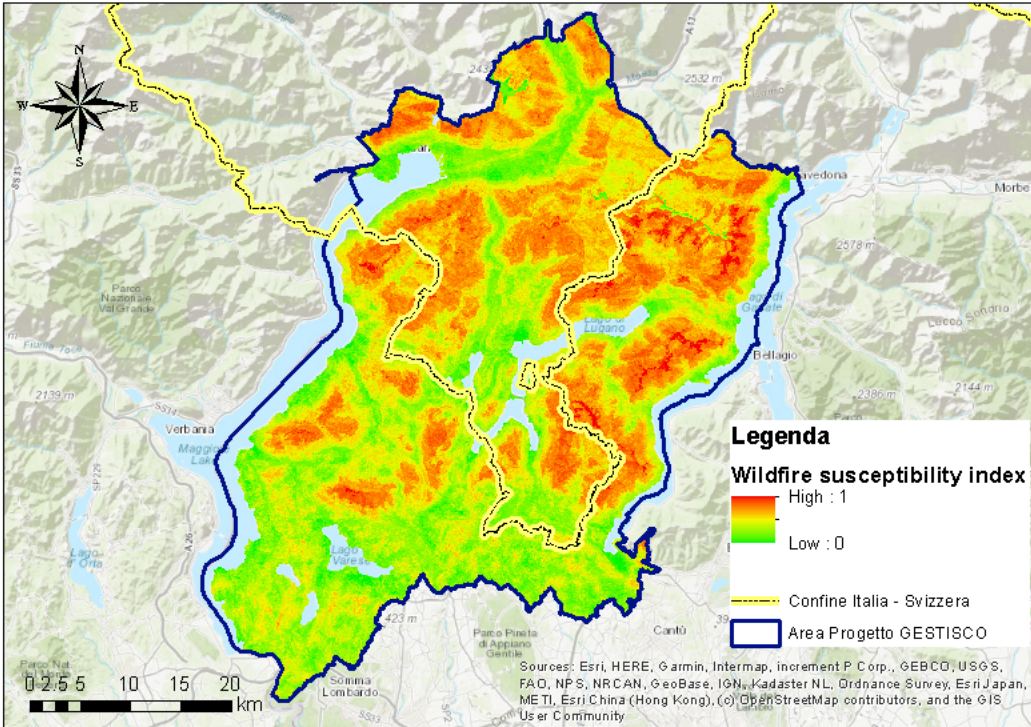


Figura 48. Wildfire susceptibility index estivo

Con l'obiettivo di valutare l'efficacia del metodo sin qui proposto, si riportano di seguito due differenti estrazioni dalle mappe di suscettività, che si configurano come dettagli per particolari sezioni dell'area di studio.

In particolare, in Figura 49, si vuole evidenziare una zona particolarmente colpita in passato da incendi boschivi. Tale zona, sita in territorio italiano in corrispondenza dei comuni dell'alto lago di Como, presenta una sostanziale coerenza tra i livelli di suscettività da incendio boschivo e le osservazioni degli effetti al suolo. In un contesto di questo tipo, i modelli sperimentali sono facilmente in grado di individuare le aree maggiormente suscettibili al passaggio del fuoco. Infatti, la potenzialità di tali metodi risiede proprio nella quantità di dati storici a disposizione: più ampio è il dataset, più affidabile è il risultato prodotto dall'analisi di suscettività.

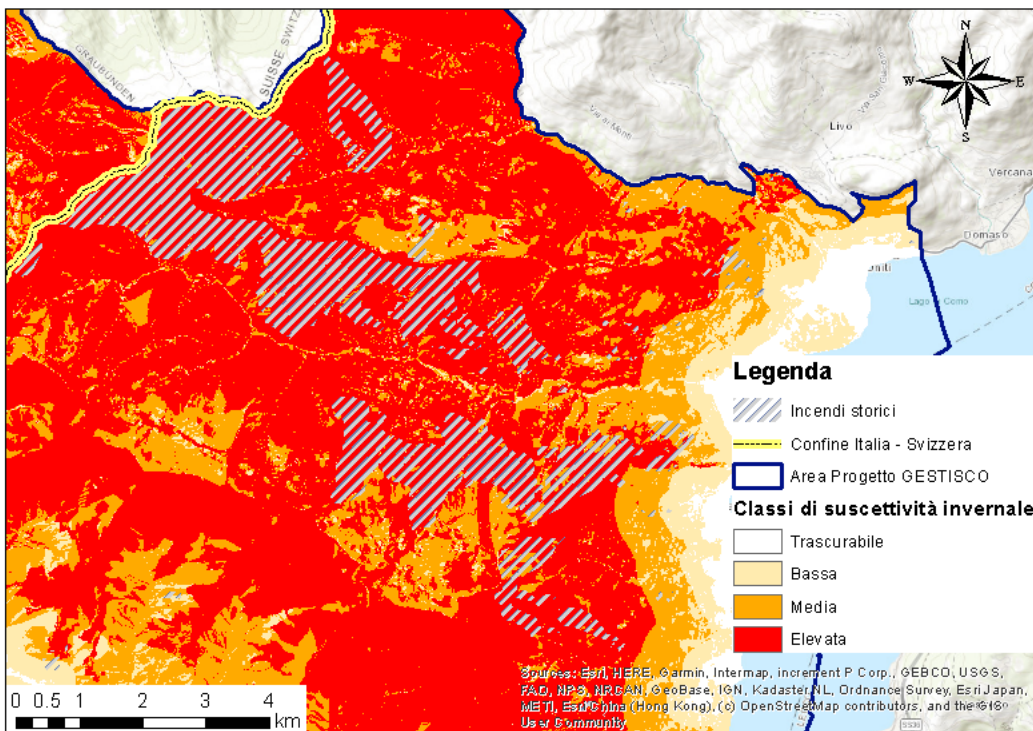


Figura 49. Serie di incendi storici nella zona dell'alto Lago di Como

La Figura 50 riporta un evento sviluppatosi a ridosso del confine italo-svizzero e inserito in entrambi i dataset. Come si può notare la superficie bruciata risulta essere suddivisa in due poligoni distinti e discontinui che fanno riferimento ad un unico episodio, avvenuto il 15 aprile 2017. Il punto di innesco è rilevato nel territorio italiano e, dalle informazioni disponibili, si evince che la causa è stata classificata come "dubbia/non classificabile".

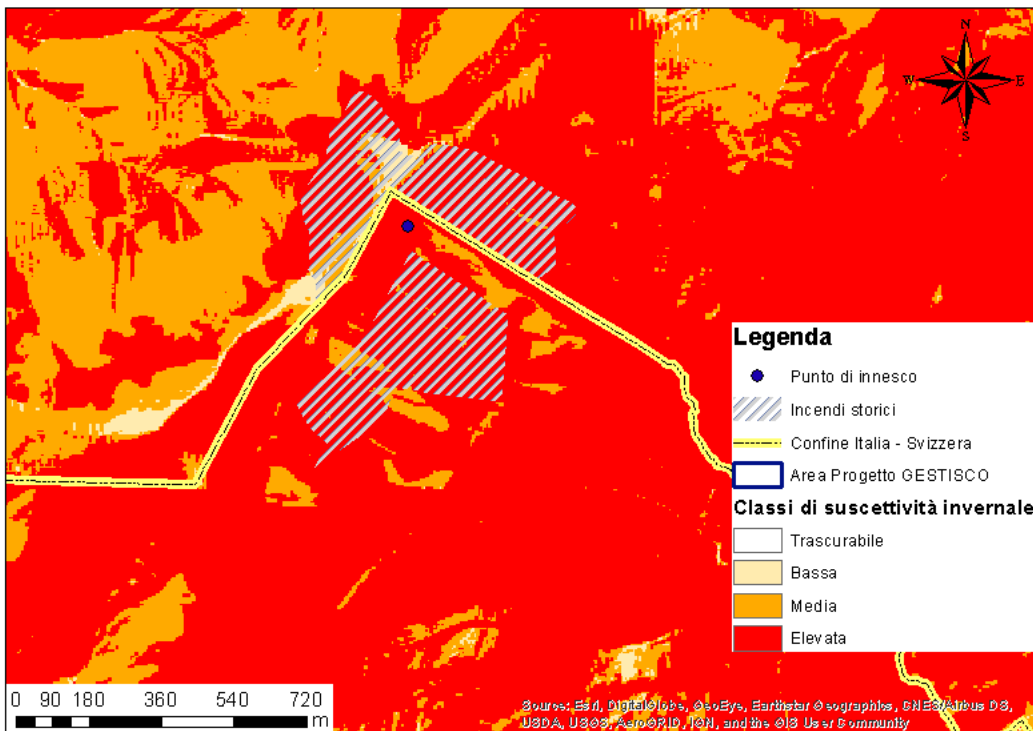


Figura 50. Particolare sull'evento transfrontaliero del 15 aprile 2017 tra il comune italiano di Maccagno con Pino e Veddasca e svizzero di Gambarogno

Dall'osservazione dell'incendio qui riportato, si possono notare le problematiche associate alla perimetrazione di casi che si verificano in corrispondenza del confine. La mappatura dell'evento, infatti, appare discontinua.

In tal senso, la mappa di suscettività da incendio boschivo, ottenuta utilizzando dati nativi del territorio, mostra le sue potenzialità soprattutto in ambito transfrontaliero, in quanto fornisce un'informazione continua sulla predisposizione del territorio nei confronti del rischio incendi.

6.5. Sviluppi futuri

Questi primi risultati della mappatura paiono promettenti, in quanto permettono, a fronte di un onere computazionale ridotto e di una metodologia concettualmente semplice, di avere una rapida delimitazione delle aree potenzialmente più soggette ai fenomeni. Questo grazie alla scelta di fattori predisponenti legati alla fisica del fenomeno, alcuni ampiamente discussi e documentati nella letteratura, altri più originali e specifici ma comunque sempre ricavati da un contesto scientifico di riferimento. Questo approccio appare particolarmente utile per un territorio di confine in quanto, come largamente discusso, consente di avere una zonazione omogenea e poco sensibile ai confini amministrativi. L'uniformità della legenda permette inoltre di agevolare il lavoro degli operatori.

I prossimi step potranno andare in diverse direzioni: una validazione “sul campo”, tramite interviste ad operatori coinvolti sul territorio, per identificare possibili aree di intervento per una “manutenzione correttiva” del prodotto e per la classificazione dei fattori. Come già evidenziato in precedenza, verrà inoltre approfondito lo studio del parametro distanza dal lago e la quantificazione del fattore *inland penetration*. Sarà infine attuato un tentativo di ampliamento del dataset degli eventi storici, con la ricerca di eventi per gli anni attualmente non coperti. Un’ulteriore linea di possibile sviluppo potrà prevedere il confronto con altri metodi statistici presenti in letteratura.



7. Frane superficiali

A cura di Giovanni Menduni, Manuel Bertulesi, Ilaria Boschini

(Politecnico di Milano – Polo di Lecco)

7.1. Introduzione

Lo strumento per la valutazione della propensione del territorio all'innescò di dissesti gravitativi della coltre detritica è particolarmente indicato per territori montani caratterizzati da versanti acclivi e quote non troppo elevate, caratteristiche riscontrabili anche nell'area di studio. Si considerano in particolare i movimenti di massa veloci che si sviluppano su versanti acclivi o mediamente acclivi in base a piogge brevi e intense, moderate e prolungate oppure dallo scioglimento nivale (Moser & Hohensinn, 1983) (Crosta G. , 1998) (Crosta & Frattini, 2002) (Carelli, Ceriani, & Valbuzzi, 2006). I fenomeni che interessano porzioni di versante sono chiamati frane superficiali o *soil slip*, mentre quelli per cui il materiale movimentato, anche attraverso frane superficiali, è convogliato in canali, impluvi molto acclivi di bacini secondari, sono chiamati colate, generalmente di detrito (*debris flow*) nei bacini alpini (Costa, 1984).

Come già sottolineato nel capitolo introduttivo del documento, per la mappatura dell'incidenza degli scivolamenti superficiali nell'area di studio si è adottata una metodologia differente rispetto agli altri fenomeni studiati, data anche la natura non ricorsiva del fenomeno. La mappa prodotta definisce, infatti, una predisposizione del territorio a tale tipologia di dissesto e non una suscettività, nell'accezione del termine definita nelle pagine precedenti. La differenza più sostanziale è che per mappare la predisposizione di un territorio al franamento superficiale non viene dato in input al modello alcun dataset di eventi storici, ma la valutazione viene fatta su una modellazione "fisicamente basata". Con tale tipo di approccio le caratteristiche fisiche sia dei depositi superficiali, sia dei processi idrologici e meccanici che regolano il fenomeno studiato vengono discretizzate a livello della dimensione del pixel e simulate in un modello numerico.

Rispetto ad altre metodologie applicate in letteratura per la mappatura degli scivolamenti superficiali (modelli empirici, analisi statistiche, analisi sulla probabilità di distacco con modelli di stabilità basati su simulazione idrologiche stocastiche), la modellazione fisicamente basata è in grado di considerare le variabili dinamiche (soprattutto il regime precipitativo) e i loro effetti nel breve e nel



lungo termine (Crosta & Frattini, 2003). Essi sono basati sull'accoppiamento della teoria della stabilità del pendio indefinito con modelli idrologici e ricevono in input sia variabili statiche (caratteristiche dei depositi superficiali, topografia, copertura del suolo) che dinamiche (precipitazione). Gli importanti vantaggi che si ottengono dall'applicare questa metodologia di analisi devono tuttavia far conto con la grande quantità di parametri fisici richiesti in input, spesso non facili da stimare se non attraverso indagini sul campo. Uno di questi è sicuramente lo spessore della coltre detritica superficiale, parametro, come si dirà in seguito, molto importante e sensibile a livello modellistico.

Sulla base di queste considerazioni, si è deciso di mappare la predisposizione agli scivolamenti superficiali per l'area di studio applicando il modello realizzato su due scale di dettaglio:

- a) Modellazione “a priori” o “speditiva”: modello stazionario che valuta e classifica la stabilità di ciascun pixel contenente depositi superficiali in tre categorie, a prescindere dal grado di saturazione S_r : “incondizionatamente instabile”, “incondizionatamente stabile” e “stabilità da valutare”. Non richiede in input lo spessore dei suoli e il regime precipitativo. L'obiettivo di tale modellazione è quello identificare le aree con “stabilità da valutare” più critiche a livello transfrontaliero, in quanto prossime a insediamenti o vie di comunicazione strategiche, e sulle quali condurre la modellazione di dettaglio in transitorio;
- b) Modellazione “in transitorio”: modello in transitorio, completo di tutte le variabili necessarie per la corretta simulazione fisica del processo. Il modello parte dalle considerazioni di quello “speditivo” e valuta nel tempo, a partire da mappe di pioggia con ietogrammi in ingresso, la stabilità delle aree precedentemente etichettate con “stabilità da valutare”, le aree cioè delle quali non è possibile stabilire a priori la stabilità.

Nelle pagine che seguono verranno dettagliatamente descritti i dati richiesti in ingresso (origine, risoluzione, elaborazioni effettuate), nonché, per ognuno dei modelli, le equazioni su cui si basa il funzionamento. Infine, verranno presentate le mappe ottenute, con opportuni focus sulle zone di maggior interesse.

7.2. Dati di input ai modelli

Per produrre la mappatura della propensione allo scivolamento superficiale i modelli richiedono in ingresso i seguenti strati informativi (o un sottoinsieme di essi nel caso del modello speditivo):

Dati topografici

Il modello digitale del terreno (DTM) impiegato è quello prodotto all'interno del progetto di ricerca, già ampiamente descritto nelle pagine precedenti. Il DTM ha una risoluzione di 5 m e si presenta pertanto adatto alla modellazione numerica del fenomeno in oggetto.

Dati geologici

Le frane superficiali o soil slip sono definite come frane per saturazione e fluidificazione dei terreni detritici superficiali, perciò riguardano solamente la coltre detritica di materiale non coeso che permette la filtrazione e il flusso subsuperficiale (Varnes D. J., 1978). L'analisi si è quindi concentrata solamente sui terreni sciolti quaternari, ignorando le aree per le quali nella mappa litologica non fosse esplicitata la copertura detritica, a maggior ragione sottolineando che le proprietà geomeccaniche di un suolo non dipendono unicamente dal substrato roccioso (Martignier, 2017).

A partire dalle carte geologiche disponibili per l'area di studio (Tabella 6), sono stati stimati i parametri caratterizzanti i depositi superficiali presenti, attraverso la letteratura presente in materia e la consulenza di un geologo (dott. Mattia Martinelli). Nello specifico, si sono determinati i seguenti parametri:

- a) indice dei vuoti e [-],
- b) conducibilità idraulica orizzontale k $\left[\frac{m}{s}\right]$
- c) angolo d'attrito φ [°],
- d) densità del materiale ρ_s $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$,

In Tabella 7 sono mostrati i valori assegnati a ciascun parametro in base al deposito superficiale considerato.

Occorre sottolineare come la risoluzione delle carte a disposizione sia molto diversa tra i due Paesi: lo strato informativo sul territorio elvetico ha una risoluzione 4 volte superiore rispetto a quella offerta dalla cartografia geologica italiana, come si può notare anche dalla Figura 51. A livello dell'area di studio, pertanto, ciò comporta una diversa risoluzione nella mappatura della predisposizione al fenomeno di interesse tra i due Paesi.

Tabella 6. Carte geologiche utilizzate per l'identificazione dei depositi superficiali nell'area di studio.

Dataset cartografico geologico				
Paese	Nome prodotto	Fogli	Fonte	Risoluzione
Italia	CARG	16, 17, 31, 32	ISPRA	1:100.000

Svizzera	GeoCover V2	11, 39, 66, 69, 145, 152, 159, 1292, 1293, 1332	Ufficio federale di topografia swisstopo	1:25.000
----------	-------------	---	--	----------

Tabella 7. Valori assegnati ai parametri di ciascuna tipologia di deposito superficiale identificata sull'area di studio.

Legenda	φ [°]	ρ_s [kg/m ³]	k [m/s]	e []
Conoide alluvionale	36	1900	0.01	0.5
Conoidi fluvio-glaciali	37	1900	0.0001	0.5
Copertura morenica sottile/till indifferenziato	33	2000	0.00001	0.7
Depositi detritici, senza granulometria	35	2000	0.0001	0.7
Depositi di palude	25	2000	1.00E-10	1.5
Depositi dislocati da fenomeni gravitativi	28	1800	0.0001	1
Deposito di colata torrentizia	30	1900	0.000000001	0.7
Deposito di contatto glaciale	33	2000	0.00001	0.7
Deposito di debris flow	35	1900	0.00001	0.7
Deposito di spiaggia a sabbie prevalenti	25	1800	0.0001	0.5
Deposito fluvioglaciale	35	2000	0.00001	0.7
Deposito fluvioglaciale cementato	42	2100	0.000000001	1
Deposito fluvioglaciale con coltre alteritica mista	35	2000	0.00001	0.7
Deposito fluvioglaciale con massi erratici	35	1900	0.00001	0.7
Deposito glacio-lacustre	33	1900	0.00001	0.8
Deposito lacustre	25	1800	0.0000001	0.9
Deposito morenico/till indifferenziato	33	2000	0.00001	0.7
Deposito-fluviale	37	1900	0.0001	0.5
Deposito-fluviale cementato	42	2100	0.000000001	1
Detrito di falda	40	1900	1	0.4
Detrito di frana di crollo a componenti grossolani	40	1900	1	0.3
Detrito di versante	40	1900	1	0.3
Detrito di versante a blocchi	43	1900	1.5	0.3
Detrito di versante a componenti grossolani	40	1900	1	0.4
Detrito/coltre alteritica	35	2000	0.0001	0.7
Detrito/coltre alteritica cementata	45	2100	0.000000001	1
Detrito/coltre alteritica con massi erratici	35	2000	0.0001	0.7
Morena	33	2000	0.00001	0.7
Morena con molti massi erratici	36	1900	0.0001	0.6
Morena con coltre detritica mista	33	1900	0.00001	0.7



Morena con massi erratici e coltre detritica mista	33	1900	0.00001	0.7
Scivolamento di materiale sciolto	40	1900	1	0.4
Terreni alluvionali	36	1900	0.00001	0.7
Terreni alluvionali: ghiaia precalente	37	1900	0.0001	0.5
Terreni alluvionali: limo prevalente	30	1800	0.000001	0.9
Terreni alluvionali: sabbia prevalente	33	1900	0.00001	0.8
Terreni alluvionali: silt prevalente	30	1800	0.000001	0.9
Torba	25	2000	1.00E-10	1.5
Travertino	90	2700	1	0.3
Sabbia di Novazzano	25	1800	0.0001	0.5
Valanga di roccia	43	1900	1.5	0.3

Si può notare la presenza della formazione Travertino nella tabella dei parametri dei depositi (Tabella 7), sebbene sia una roccia calcarea, in quanto presente nella mappa dei depositi consultata. Si è deciso di conservare le aree catalogate come Travertino nella lista dei depositi in quanto, a differenza delle altre rocce affioranti, permette la filtrazione di acqua e la creazione di un flusso subsuperficiale, tuttavia si è attribuito un angolo d'attrito molto alto in modo da evitare il franamento degli elementi corrispondenti, che infatti risultano incondizionatamente stabili.

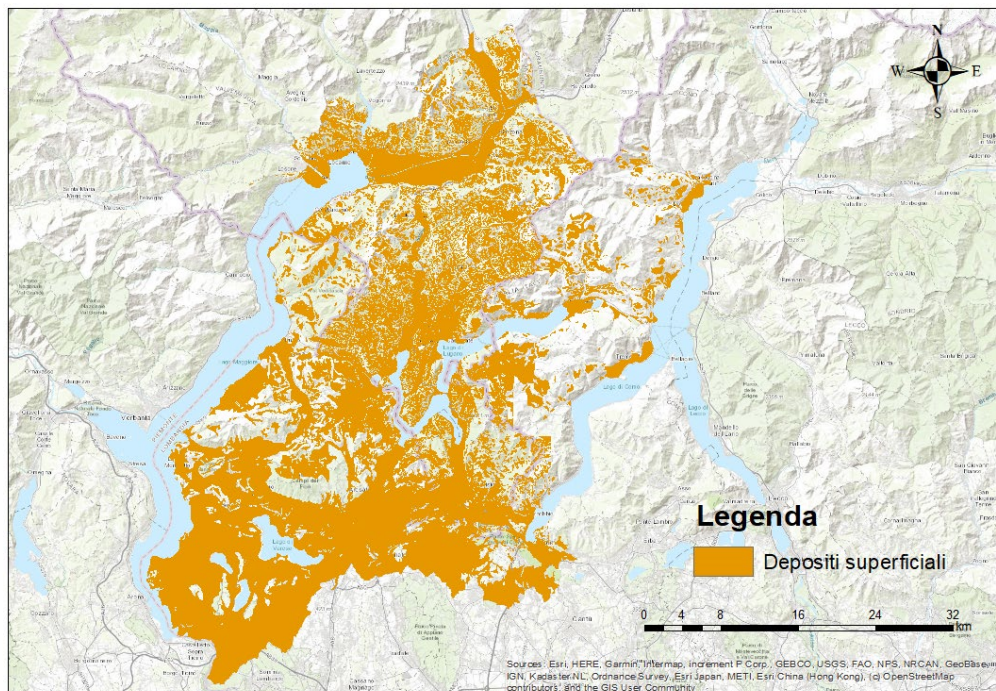


Figura 51. Distribuzione dei depositi superficiali nell'area transfrontaliera di studio sulla base della cartografia disponibile.

Un discorso a parte deve invece essere fatto per quanto riguarda la stima dello spessore dei depositi. Lo spessore z [m] dello strato di sedimenti non è infatti funzione del tipo di materiale, ma la sua definizione necessiterebbe di indagini approfondite in loco in vari punti dell'area di progetto. Tuttavia, esistono in letteratura modelli in grado di stimare lo spessore dello strato superficiale dei depositi basati su parametri come lo spessore massimo ammissibile z_{max_i} , la pendenza locale θ_i , la quota H_i (Saulnier, Beven, & Obled, 1997). Il modello ritenuto più adatto alla morfologia del territorio in esame e alle finalità del lavoro è una funzione decrescente linearmente con la pendenza, infatti pendenze maggiori hanno maggior potenziale di erosione e quindi lo strato di deposito tenderà ad assottigliarsi:

$$z_i = z_{max_i} \cdot \left[1 - \frac{\tan(\theta_i) - \tan(\theta_{min})}{\tan(\theta_{max_i}) - \tan(\theta_{min_i})} \left(1 - \frac{z_{min_i}}{z_{max_i}} \right) \right]$$

L'angolo di pendenza θ_i della singola cella è derivabile dal DTM, mentre la pendenza massima θ_{max_i} è impostabile pari all'angolo d'attrito del materiale in quanto per pendenze superiori all'angolo d'attrito non si ha deposito superficiale. La pendenza minima θ_{min_i} è impostata a zero (piano orizzontale). Rimane tuttavia il problema della definizione dello spessore massimo dello strato z_{max} . Si vedrà in seguito come si è affrontato il problema nel caso applicativo proposto.

Dati di copertura del suolo

Ai fini della valutazione della predisposizione di un territorio allo scivolamento superficiale, la presenza di aree boscate lungo i versanti riveste un ruolo incisivo nella stabilità della coltre detritica (Cohen & Schwarz, 2017).

Ci sono casi in cui la presenza di vegetazione favorisce infatti la sedimentazione di sottili strati di deposito anche con pendenze molto alte, grazie all'incremento della resistenza al taglio fornito dall'apparato radicale. Per questo motivo, per gli elementi che si trovano in aree boscate, l'angolo d'attrito è stato maggiorato del 40% (Schmidt, et al., 2001) (D'Odorico & Fagherazzi, 2003).

Nel presente studio, si sono considerati gli strati informativi sulle aree boscate dei due Paesi alla massima risoluzione disponibile, al fine di intervenire poi il più precisamente possibile sui valori degli angoli d'attrito dei depositi. In Tabella 8 sono riportati i dataset utilizzati per ricavare la distribuzione delle aree boscate. Per quanto riguarda il territorio italiano, dalla banca dati DUSAF sono stati estratti tutti i poligoni aventi codice *Corine Land Cover* (terzo livello) tra 311 e 314, estremi inclusi. Dal geodatabase SwissTLM3D si sono invece considerati i poligoni etichettati come "foresta" e "foresta aperta". La risoluzione di quest'ultimo dato non è dichiarata esplicitamente nei metadati, ma viene comunque indicato che la precisione geometrica dello strato è tra 1-3 m. L'unione dell'informazione

proveniente dai due dataset permette di ottenere la distribuzione delle aree boscate sul territorio di studio (Figura 52).

Tabella 8. Carte di copertura del suolo utilizzate per estrarre lo strato informativo sulle aree boscate.

Dataset cartografico copertura aree boscate			
Paese	Nome prodotto	Fonte	Risoluzione
Italia	DUSAF 6.0	Regione Lombardia	1:10.000
Svizzera	swissTLM3D	Ufficio federale di topografia swisstopo	N.D.

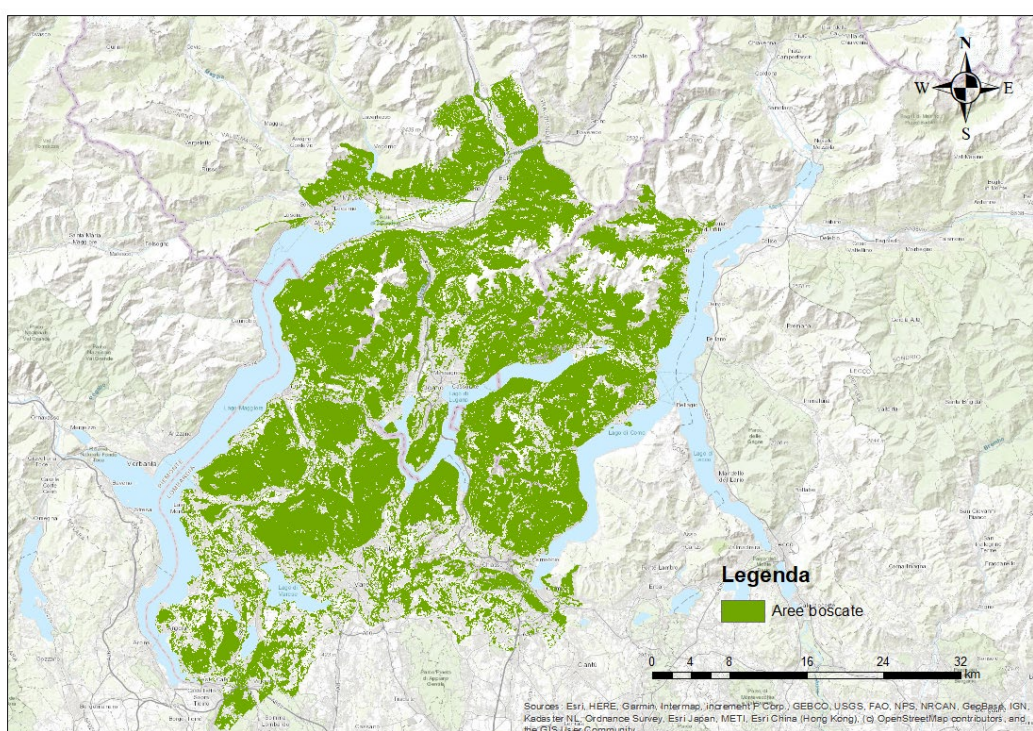


Figura 52. Distribuzione delle aree boscate nell'area di studio.

Dati pluviometrici

Per quanto riguarda il dato pluviometrico, sono stati generati ietogrammi sintetici a partire dalle curve di possibilità pluviometrica utilizzando il tempo di ritorno della precipitazione come proxy per la suscettività al franamento, superando quindi il concetto puramente idrologico.

In base all'estensione dell'area su cui operare un focus, la pioggia può essere considerata uniforme oppure può ritenersi necessaria un'operazione di interpolazione operata sugli ietogrammi generati per tutte le stazioni pluviometriche presenti all'interno o nelle vicinanze dell'area.

In questo ultimo caso, la modellazione del campo precipitativo è affidata al metodo dell'inverse-distance weighting (IDW, distanza inversa ponderata), un modello deterministico di interpolazione spaziale per cui l'informazione in un punto di cui non si conosce la misura del parametro è la media pesata dei punti a informazioni note nelle vicinanze con pesi inversamente proporzionali alle distanze (principio di autocorrelazione). Per trovare un valore interpolato u per un punto x , basandosi sul valore noto u_i nel punto x_i , $u_i = u(x_i)$ con $i = 1, 2, \dots, N$, si utilizza la funzione di interpolazione

$$\begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^N w_i(x) u_i}{\sum_{i=1}^N w_i(x)} & \text{se } d(x, x_i) \neq 0 \text{ per ogni } i \\ u_i & \text{se } d(x, x_i) = 0 \text{ per almeno una } i \end{cases}$$

dove $d(x, x_i)$ è la distanza tra il punto x e il punto noto x_i , N il numero totale di punti noti usati per l'interpolazione, $w_i = \frac{1}{d(x, x_i)^p}$ il peso, inversamente proporzionale alla distanza, e p il parametro di potenza, un numero reale positivo. Per grandi valori di p i valori sono fortemente influenzati dai valori noti più vicini al punto interpolato. Si è scelto di utilizzare $p = 2$ in quanto è un valore accettabile per le interpolazioni in due dimensioni e non attribuisce troppa importanza ai valori nei punti vicini al punto di interpolazione.

È necessario sottolineare che, dati i presupposti del metodo, i valori di massimo e minimo nella mappa interpolata possono manifestarsi solo nei punti a informazioni note. Nella realtà invece il centro di scroscio di una cella temporalesca può essere localizzato in qualsiasi punto, non necessariamente in corrispondenza di una stazione di misura. La mappa di pioggia riporterà dati sottostimati se la perturbazione ha la sua massima intensità lontano da punti noti.

La mappa di pioggia che si è in grado di ottenere ha una risoluzione spaziale basata su celle regolari di 5x5 m ed è creata in modo che ad ogni cella dell'area di interesse corrisponda una cella della mappa di pioggia, così che l'informazione pluviometrica sia univocamente attribuita a una sola cella di computazione.

7.3. Modello speditivo

Il modello speditivo è un modello stazionario che consente di mappare le aree che, per via della morfologia e delle caratteristiche dei depositi ivi presenti, sono incondizionatamente stabili o instabili a prescindere dal grado di saturazione S_r della coltre detritica. Allo stesso tempo, permette di identificare le parti di territorio che non possono essere classificate a priori e su cui occorre applicare il modello in transitorio per valutarne la stabilità a seguito di un evento precipitativo.

Entrambi i modelli si basano sulla teoria del pendio indefinito. Si consideri la schematizzazione del pendio proposta in Figura 53: la superficie del versante è assunta parallela alla superficie di taglio, così come la superficie satura, al di sotto della quale avviene il moto di filtrazione stazionario.

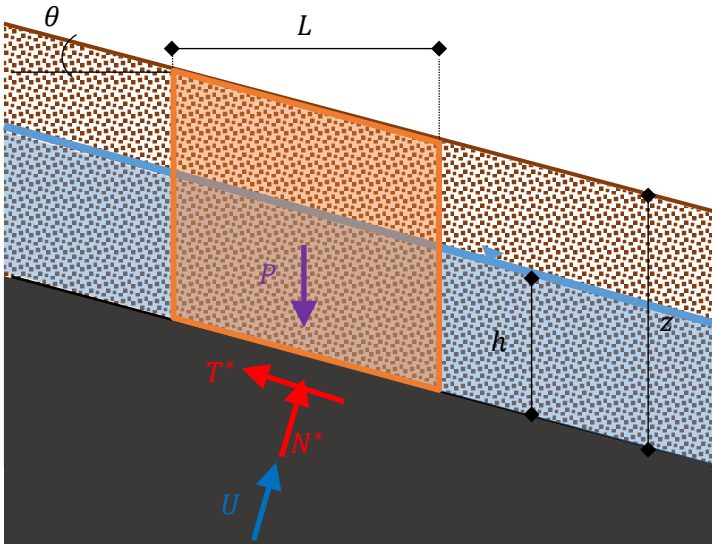


Figura 53. Schema delle forze su un elemento di strato superficiale con contributo idraulico

Si definisce ω come il rapporto tra l'altezza dello strato saturo h , visto in senso dunniano come da Figura 53, e la profondità della coltre detritica z . Assumendo che tutta l'acqua sia contenuta nella matrice solamente al di sotto della linea della superficie satura, si ha che:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{Ahn}{Az n} = \frac{h}{z} = \omega$$

Dove V_w è il volume d'acqua, V_v è il volume dei vuoti e n la porosità della matrice definita come $n = \frac{V_v}{V_t} = \frac{e}{1+e}$.

L'aumento del grado di saturazione all'interno dello strato superficiale comporta un alleggerimento dello stesso dovuto alla sottospinta dell'acqua U in corrispondenza dell'interfaccia tra substrato roccioso e manto superficiale (Megahan, 1983) e può portare all'instabilità dello strato.

La stabilità di un pendio, generalmente espressa dal Fattore di Sicurezza (FS) viene valutata rapportando le azioni stabilizzanti con quelle sollecitanti.

La resistenza a taglio in corrispondenza del potenziale piano di rottura, considerando un terreno non coesivo ($c' = 0$), è

$$\tau_f = (\sigma - u) \tan(\varphi)$$

con $\sigma = [(z - h)\gamma_s + h\gamma_{sat}] \cos^2(\theta)$ sforzo totale in direzione normale al piano di rottura, $u = h\gamma_w \cos^2(\theta)$ pressione neutra dell'acqua e $\varphi =$ angolo d'attrito del materiale dell'elemento.

Il fattore di sicurezza del pendio considerato, definendo lo sforzo di taglio come

$$\tau = [(z - h)\gamma_s + h\gamma_{sat}] \sin(\theta) \cos(\theta)$$

è dato da

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{(z - h)\gamma_s + h\gamma' \tan(\varphi)}{(z - h)\gamma_s + h\gamma_{sat} \tan(\theta)}$$

Introducendo la gravità specifica del solido $G_s = \frac{\rho_s(1+e)}{\rho_w}$, il grado di saturazione S_r , il quale è definito come h/z secondo le ipotesi iniziali e l'indice dei vuoti e , si possono sostituire le seguenti espressioni

$$\frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{G_s + eS_r}{1 + e} \quad \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w} = \frac{G_s + e}{1 + e} \quad \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$$

e quindi il fattore di sicurezza si può scrivere come

$$FS = \frac{G_s + eS_r - S_r(1 + eS_r) \tan(\varphi)}{G_s + eS_r - S_re(1 - S_r) \tan(\theta)}$$

dove θ è la pendenza locale della cella, ricavata nel modello dalla percentuale di variazione dell'elevazione rispetto alle otto celle circostanti, con semplici formule trigonometriche. Data una cella (i, j) di area A e quota $q(i, j)$, la sua pendenza $\theta(i, j)$ è, infatti, data da:

$$\theta(i, j) = \text{atan} \left(\sqrt{\frac{(dz/dx)^2}{(dz/dy)^2}} \right)$$

con

$$\frac{dz}{dx} = \frac{(q(i + 1, j + 1) + 2q(i + 1, j) + q(i + 1, j - 1)) - (q(i - 1, j + 1) + 2q(i - 1, j) + q(i - 1, j - 1))}{8\sqrt{A}}$$

e

$$\frac{dz}{dy} = \frac{(q(i - 1, j - 1) + 2q(i, j + 1) + q(i + 1, j + 1)) - (q(i - 1, j - 1) + 2q(i, j - 1) + q(i + 1, j - 1))}{8\sqrt{A}}$$

Considerando $S_r = \omega = 0$ ($h = 0$) e imponendo $FS \leq 1$, si ottiene la condizione per cui il pendio (nel modello il pixel) è "incondizionatamente instabile":



$$\frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \geq 1$$

Se invece si considera $S_r = \omega = 1$, quindi $h = z$, e si impone $FS \geq 1$, si ricava invece la condizione soddisfatta la quale il pixel può essere definito “incondizionatamente stabile”:

$$\frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \leq \frac{G_s - 1}{G_s + e}$$

I pixel che non soddisfano le precedenti condizioni non possono essere valutati senza considerare la componente idraulica del processo e vengono pertanto etichettati con “stabilità da valutare”. Si noti come entrambe le condizioni necessarie per valutare in maniera incondizionata la stabilità o l’instabilità di una cella siano indipendenti sia da S_r che dallo spessore dello strato z . I dati richiesti in ingresso al modello speditivo sono pertanto un sottoinsieme di quelli necessari al modello in transitorio, ovvero:

- a) DEM dell’area di studio;
- b) Angolo di attrito φ , densità ρ_s e indice dei vuoti e per ogni tipologia di deposito superficiale individuata;
- c) Copertura aree boscate sul territorio di studio.

Risultati

Nelle pagine seguenti vengono mostrati gli output ottenuti dalla modellazione speditiva. Per permettere una migliore visualizzazione dell’informazione, l’area di studio è stata suddivisa in due mappe: in Figura 54 è rappresentata la porzione settentrionale dell’area di studio (da Bellinzona a Lugano), mentre in Figura 56 l’area meridionale.

A un primo sguardo, si può notare fin da subito come tutti i rilievi dell’area prealpina tra il Verbano e il Lario siano potenzialmente predisposti al fenomeno degli scivolamenti superficiali.

I depositi identificati come incondizionatamente stabili si concentrano invece perlopiù nei fondivalle elvetiche e nelle aree pianeggianti delle province di Como e Varese; tuttavia è possibile apprezzare nelle mappe la presenza di tali aree anche in corrispondenza delle zone montuose, grazie anche al contributo offerto dalla vegetazione.

Le aree incondizionatamente instabili si dispongono infine lungo i versanti più impervi, dove le pendenze locali assumono valori importanti.

Il grafico di Figura 55 sintetizza i risultati ottenuti riguardo la predisposizione del territorio di studio agli scivolamenti superficiali: quasi il 15% dell’area coperta da depositi superficiali richiede una

valutazione della stabilità di dettaglio attraverso il modello in transitorio. Occorre ricordare che la modellazione, e quindi di conseguenza anche i risultati, risentono della risoluzione della cartografia geologica disponibile: se il territorio elvetico è coperto da carte geologiche alla risoluzione 1:25.000, per il territorio italiano non si scende sotto la scala 1:100.000, con importanti conseguenze sulla mappatura dei depositi superficiali. Tale differenza è chiaramente percepibile anche nelle mappe di output.

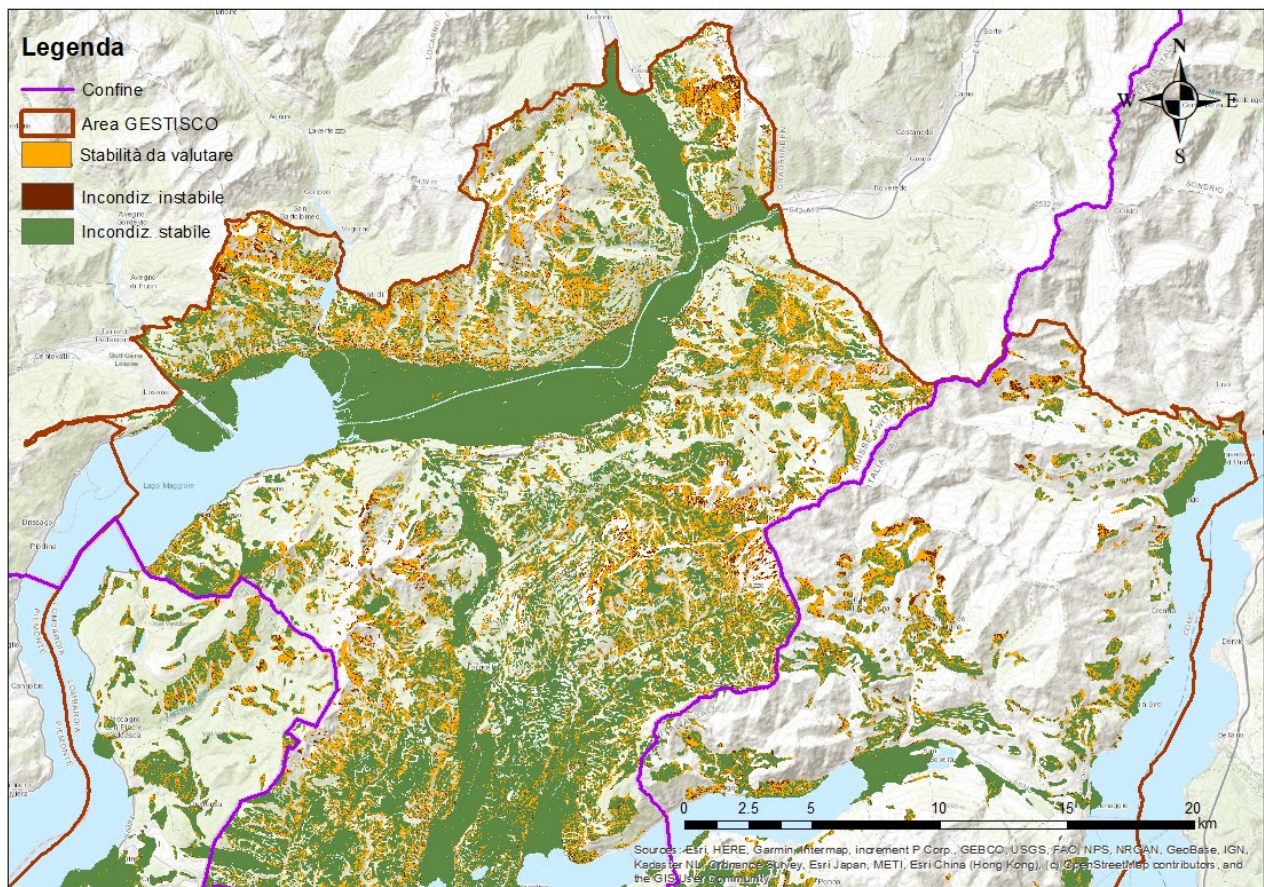


Figura 54. Risultato della mappatura speditiva della stabilità – area GESTISCO Nord.

Stabilità dei depositi superficiali - area di studio GESTISCO

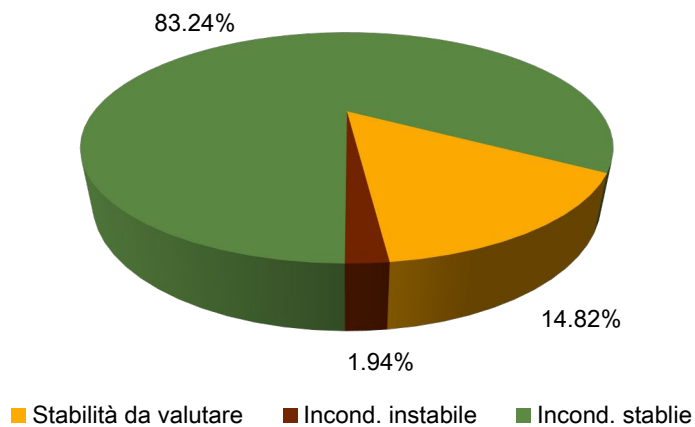


Figura 55. Stabilità dei depositi superficiali nell'area di studio in base ai risultati della modellazione speditiva.

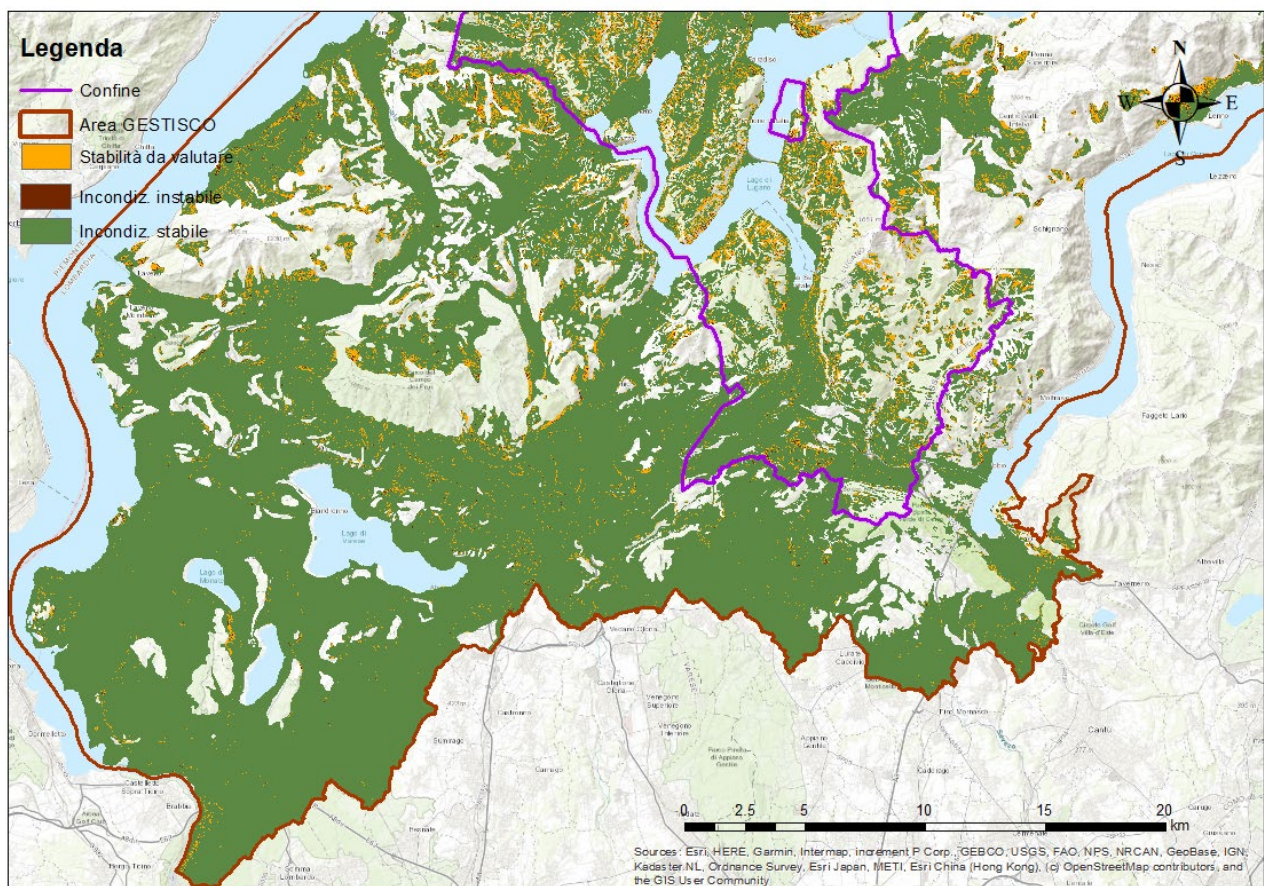


Figura 56. Risultato della mappatura speditiva della stabilità – area GESTISCO Sud.

Come dichiarato nella sezione introduttiva, la finalità principale del modello speditivo è quella di identificare le zone dove concentrare l'analisi con il modello in transitorio. Aree più o meno estese, non classificabili a priori e situate in corrispondenza di insediamenti o di infrastrutture strategiche a livello transfrontaliero costituiscono infatti il naturale target dello studio. Focalizzando l'area di studio su territori di estensione molto limitata, è possibile infatti superare in parte le criticità presenti nell'adottare un modello fisicamente basato che richiede, come si è detto più volte, diversi parametri in ingresso.

Sulla base dei risultati ottenuti dalla modellazione speditiva, si è andati quindi a ricercare le aree più critiche alla scala transfrontaliera attraverso l'intersezione con gli strati informativi di OpenStreetMap della rete ferroviaria, autostradale e stradale principale. Sono stati individuati due scenari transfrontalieri su cui concentrare l'analisi nei prossimi mesi: l'area tra Como e Chiasso (Figura 57), nodo di comunicazione strategico per i due Paesi, e l'area rivierasca dell'alto Verbano (Figura 58).

Entrambe le aree presentano una linea ferroviaria e una strada principale di rilevanza internazionale. Nelle mappe sono riportati anche gli eventi verificatisi in passato e raccolti nell'inventario dei fenomeni franosi (IFFI) per l'Italia e nel catasto degli eventi naturali StorMe per la Svizzera.

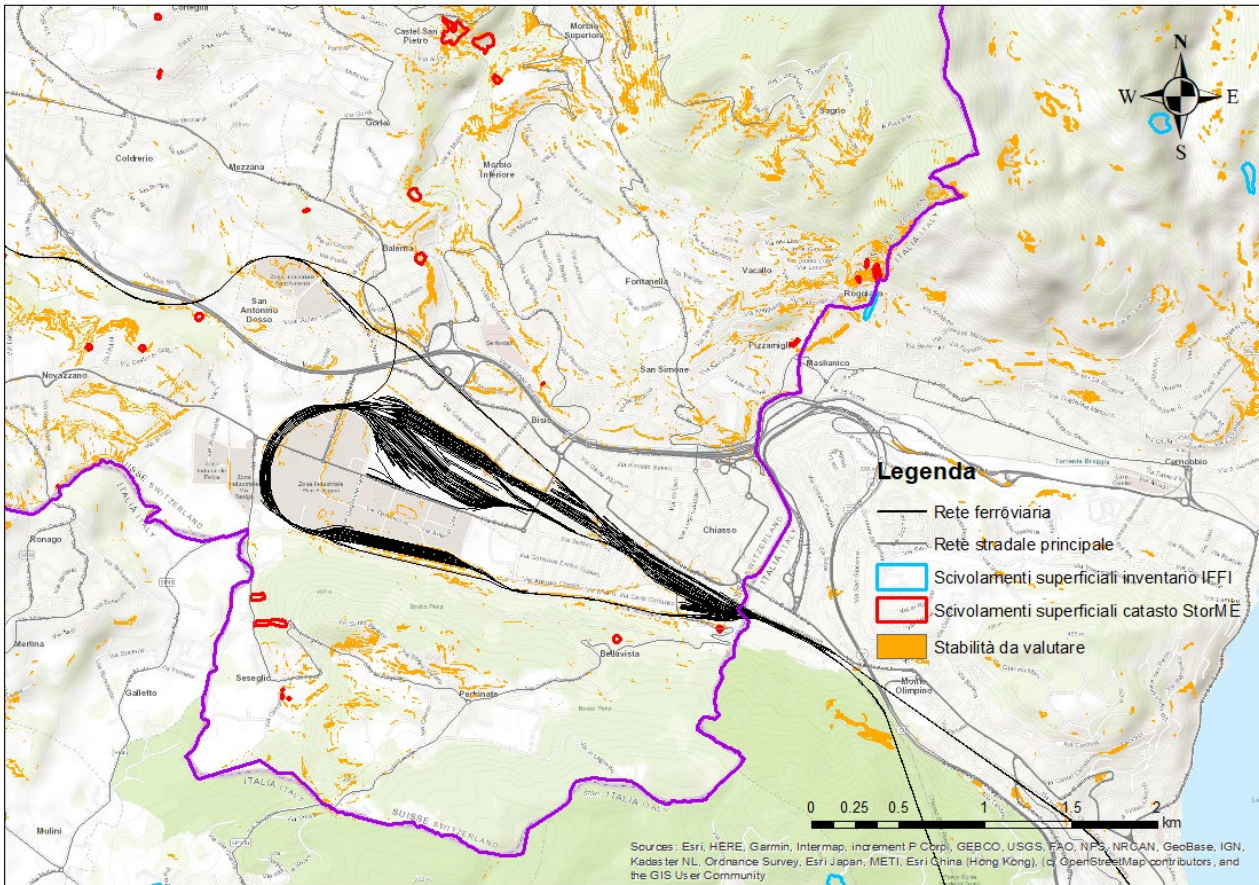


Figura 57. . Focus dei risultati su area transfrontaliera Como-Chiasso.

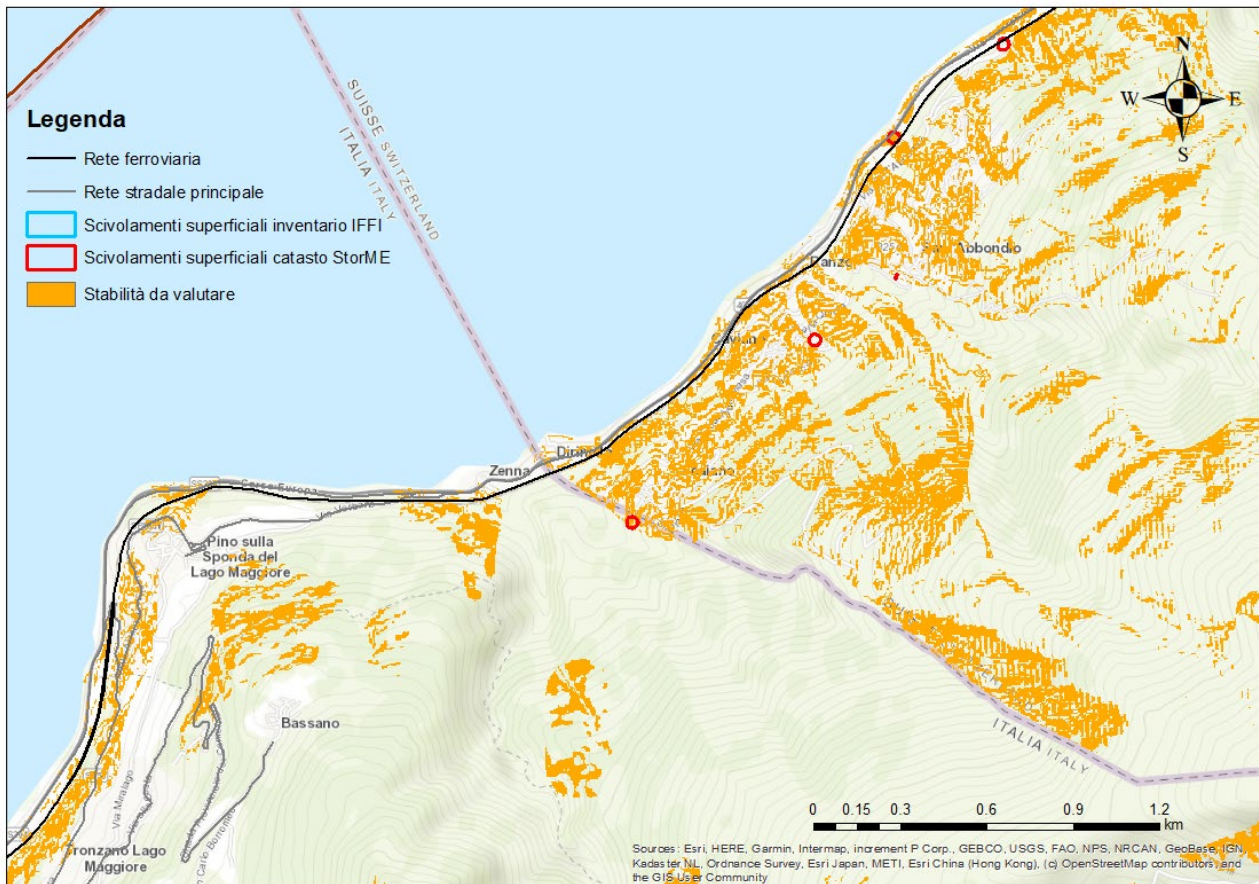


Figura 58. Focus su area transfrontaliera dell'alto Verbano.

7.4. Modello in transitorio

L'approfondimento sulle aree con stabilità da valutare è stato fatto considerando i moti di filtrazione nello strato alteritico. Infatti, la presenza d'acqua nel terreno modifica l'equilibrio degli strati superficiali del versante andando ad incrementare il grado di saturazione e di conseguenza a diminuire la resistenza al taglio all'interfaccia tra la coltre detritica superficiale e il bedrock sottostante.

La predisposizione del versante al franamento è correlata alla convergenza del flusso sotterraneo (Montgomery & Dietrich, 1994), ma la direzione del flusso subsuperficiale non è l'unico fattore che influenza l'accumulo di flusso. È necessario considerare la composizione fisica del materiale, in particolare la sua conduttività idraulica orizzontale, per comprendere le dinamiche del flusso subsuperficiale. Come esplicitato nella parte introduttiva, il modello considera solamente le aree con copertura detritica, in quanto il fenomeno fisico descritto, il dissesto per saturazione e fluidificazione della copertura superficiale, avviene in presenza di materiale detritico.

Anche in questo caso il modello è DEM-based e si basa sulla teoria del pendio indefinito, facendo corrispondere ad ogni cella in pianta un elemento di volume. Per ogni elemento necessario conoscere:

- a) pendenza θ_i ,
- b) direzione del flusso subsuperficiale,
- c) caratterizzazione del materiale (densità ρ_i , angolo d'attrito φ_i , coesione c'_i , conduttività idraulica K_i , indice dei vuoti e_i),
- d) spessore dello strato di coltre detritica z_i .

Per quanto riguarda la pendenza, valgono le considerazioni esposte già per il modello speditivo. La direzione del flusso in uscita da una cella è invece calcolata scegliendo, tra le otto celle circostanti, quella con la caduta massima, ovvero il maggior rapporto tra la variazione massima di elevazione e la lunghezza del percorso tra i centri delle due celle considerate, con un modello di flusso a otto direzioni (D8) (Greenlee, 1987). Il flusso di cui si vuole conoscere l'andamento nell'area di interesse è però quello subsuperficiale, il quale varia per ogni istante temporale di computazione in quanto dipende dalla altezza di saturazione h_i di ogni elemento. Il flusso subsuperficiale non segue infatti la linea di massima pendenza del terreno superficiale, ma si ipotizza, con una concezione dunniana, che segua la direzione di massima pendenza della superficie individuata dalle altezze di saturazione dello strato, h (Figura 59). Per ogni intervallo temporale è necessario quindi riconsiderare la superficie di riferimento e calcolare la direzione del flusso utilizzando i metodi sopra esplicitati, sostituendo al DTM la superficie delle altezze sature.

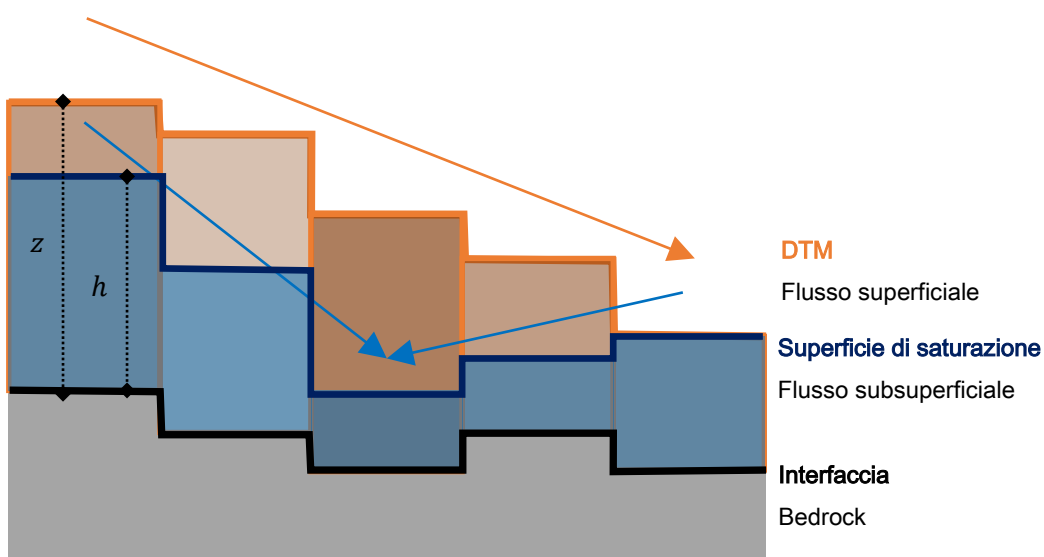


Figura 59. Schematizzazione della differenza tra la direzione del flusso subsuperficiale e superficiale.

Il grado di saturazione S_{r_i} e l'altezza dello strato saturo h_i dell'elemento di volume sotteso ad ogni "pixel" o "cella", dipende dai seguenti contributi idrici in ingresso:

- precipitazione, ipotizzando che la quantità precipitata si infiltri completamente nello strato di terreno, trascurando quindi l'evapotraspirazione e lo scorrimento superficiale;
- afflussi laterali, dipendenti dal volume idrico presente negli elementi circostanti e dalla trasmissività del suolo saturo che è funzione della permeabilità orizzontale del materiale, dello spessore dello strato e della pendenza locale dell'elemento.

Per il calcolo dell'altezza dello strato saturo h al tempo t per l'elemento i è quindi necessario conoscere il contributo meteorico per il singolo elemento p_i , espresso in intensità di precipitazione [m/s] e il contributo del flusso sotterraneo in entrata, che è la somma dei flussi in uscita degli elementi j a monte di quello considerato, individuati tramite la *flow direction* della superficie delle altezze sature, al tempo $t - 1$:

$$q_{in_i}(t) = \sum_0^n q_{out_j}(t)$$

$$q_{out_j} = K_j \sqrt{A} h(t - 1) \xi_j$$

Il contributo di flusso subsuperficiale è funzione del grado di saturazione degli elementi a monte all'istante precedente, della conduttività idraulica del terreno, delle dimensioni dell'elemento e del gradiente ξ che si crea tra la cella in considerazione e la cella in cui drena.

Laddove l'elemento non presenti copertura detritica, si assume che non ci sia nessuna portata in uscita e che la precipitazione caduta su quell'elemento non dia luogo a deflusso subsuperficiale.

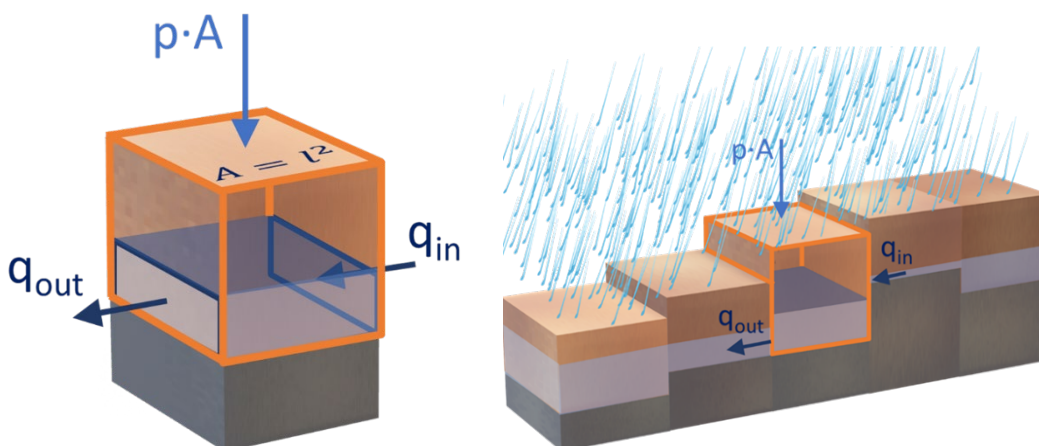


Figura 60. Schema del bilancio idrico sull'elemento di volume

Considerando il bilancio come da schema di Figura 60, per $S_r < 1$ si ha:

$$\frac{dW_i}{dt} = p_i A + q_{in_i} - q_{out_i}$$

$$\frac{d\left(h_i A \frac{e_i}{1+e_i} (1 - S_{r_i})\right)}{dt} = p_i A + q_{in_i} - q_{out_i}$$

Operando una discretizzazione temporale:

$$\frac{\Delta h_i}{\Delta t} = (p_i A + q_{in_i} - q_{out_i}) \frac{1+e_i}{e_i} \frac{1}{A(1-S_{r_i})}$$

Quindi, l'altezza dello strato saturo al tempo t è data da

$$h_i(t) = h_i(t-1) + (p_i A + q_{in_i} - q_{out_i}) \frac{1+e_i}{e_i} \frac{1}{A(1-S_{r_i})} \Delta t$$

Per $S_r \geq 1$, $h_i(t)$ è posto uguale all'altezza dello strato z_i

$$h_i(t) = z_i$$

Per ogni istante temporale, il calcolo dell'equilibrio su ogni elemento in relazione al grado di saturazione $S_{r_i}(t) = h_i(t)/z_i$, consente infine di ottenere una valutazione della sua stabilità.

Qualora il pixel non sia stato valutato incondizionatamente stabile o instabile col modello precedentemente descritto e $0 \leq h_i(t) \leq z_i$, l'equilibrio limite ($FS_i(t) = 1$) avviene quando l'altezza dello strato saturo $h_i(t)$ assume un valore critico, $h_{CR_i}(t)$ che è definito come

$$h_{CR_i}(t) = \frac{z_i \left(G_{S_i} + e_i S_{r_i}(t) \right) \left(1 - \frac{\tan(\theta_i)}{\tan(\varphi_i)} \right)}{1 + e_i - e_i \left(1 - S_{r_i}(t) \right) \left(1 - \frac{\tan(\theta_i)}{\tan(\varphi_i)} \right)}$$

Grazie alla definizione dell'altezza critica dello strato saturo h_{CR} è possibile definire la stabilità di ogni elemento in base all'altezza dello strato saturo in ogni istante temporale $h_i(t)$:

- Stabilità $h_i(t) < h_{CR_i}(t)$
- Instabilità $h_i(t) \geq h_{CR_i}(t)$

Si nota il grande peso del fattore z , spessore dello strato superficiale. Essendo, come largamente discusso, un parametro di difficile stima, l'analisi ha in questo punto una debolezza.

Caso di studio – Bacino del Cassarate, Val Colla, Canton Ticino

Il modello presentato, per via dei motivi già espressi, non è applicabile a vasta scala. Attraverso il modello speditivo è possibile individuare le aree di maggiore interesse per un'analisi più approfondita, considerando:

- la vastità delle superfici “da valutare” secondo il modello speditivo
- il carattere transfrontaliero
- l'intersezione con l'esposto

Tra le zone individuate per l'analisi con il modello in transitorio si riporta qui il caso della Val Colla (Lugano, Svizzera). Situata nella parte alta del bacino del fiume Cassarate, è stata selezionata non tanto per la perfetta rispondenza ai criteri, quanto per l'elevata propensione del territorio a fenomeni di questo tipo, con eventi registrati e studiati (Scapozza, 2017), portando a una grande quantità di dati di qualità a disposizione, soprattutto per quanto riguarda lo spessore dei suoli.

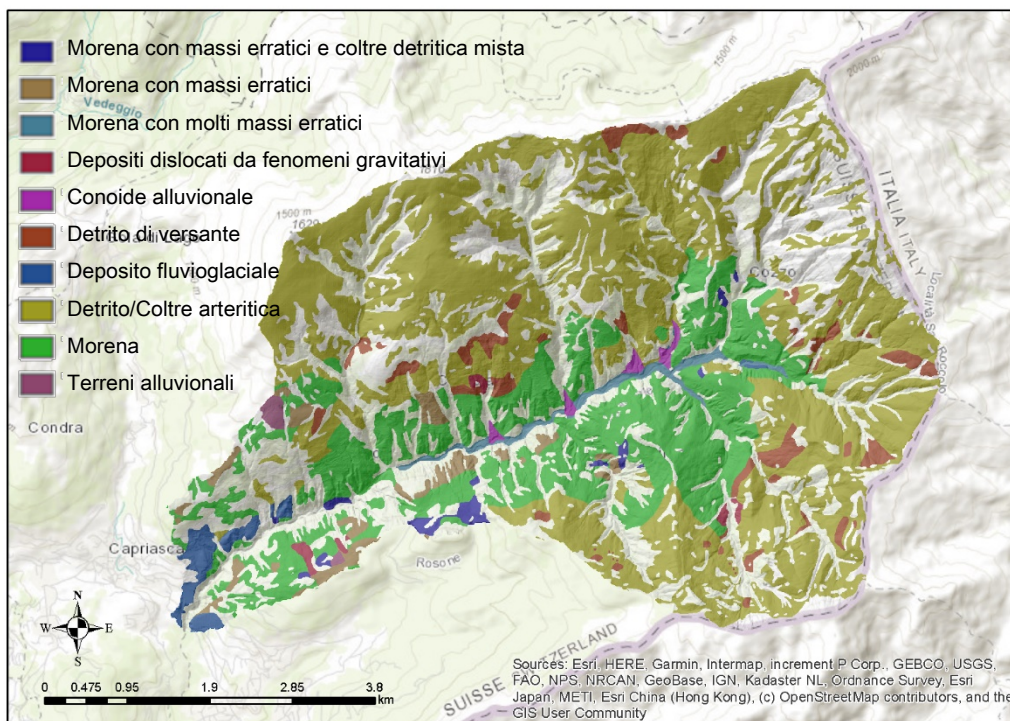


Figura 61. Mappa dei depositi della Valcolla

L'analisi operata su questo bacino ha come obiettivo l'impostazione di una metodologia di indagine applicabile ad altre aree all'interno del territorio di progetto, laddove si evidenzi una necessità particolare. La zona della Val Colla ha infatti permesso di ottenere una conoscenza più approfondita del modello in transitorio.

Le fasi di lavoro sono state:

1. Individuazione dei dati territoriali in ingresso
2. Generazione di piogge sintetiche per la sollecitazione idraulica del modello
3. Applicazione del modello fisicamente basato

4. Discussione dei risultati e predisposizione di una mappatura delle zone ad alta predisposizione

Per quanto riguarda le informazioni specifiche sul territorio sono stati utilizzati i dati provenienti dalle operazioni precedentemente esposte in questo capitolo, supportati dagli studi approfonditi effettuati e condivisi da SUPSI-IST.

La carta geologica dei depositi della Val Colla (Figura 61) mostra una composizione pressoché omogenea dei versanti, che si diversifica nel fondovalle. Si nota che gli impluvi secondari non hanno una copertura detritica: si ipotizza che l'azione erosiva dei torrenti abbia assottigliato lo strato al punto che lo stesso non venisse riconosciuto nella mappatura dei detriti di GeoCover 1:25.000.

I parametri relativi ai depositi presenti in mappa sono riportati nella

Tabella 9. Il modello di elevazione superficiale utilizzato è il DTM transfrontaliero ottenuto con le modalità definite nel capitolo introduttivo.

Tabella 9. Parametri dei depositi della Valcolla

Legenda	φ [°]	ρ_s [kg/m ³]	k [m/s]	e []
Morena con massi erratici e coltre detritica mista	33	1900	0.00001	0.7
Morena con massi erratici	33	1900	0.00001	0.7
Morena con molti massi erratici	36	1900	0.0001	0.6
Depositi dislocati da fenomeni gravitativi	28	1800	0.0001	1
Conoide alluvionale	36	1900	0.01	0.5
Detrito di versante	40	1800	1	0.3
Deposito fluvioglaciale	35	2000	0.00001	0.7
Detrito/Coltre alteritica	35	2000	0.0001	0.7
Morena	33	2000	0.00001	0.7
Terreni alluvionali	36	1900	0.00001	0.7

In questa applicazione si considera una pioggia uniforme sull'intera area poiché, data la scarsa estensione territoriale, non è stato necessario procedere all'interpolazione per ottenere una mappa di pioggia.

Per la sollecitazione pluviometrica sono stati generati ietogrammi sintetici a partire dalle curve di intensità di pioggia, per i diversi tempi di ritorno ($T = 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500$ anni) e le diverse durate ($d = 1, 3, 6, 12, 24$ ore). Si evidenzia che in questo caso l'utilizzo dei tempi di ritorno non ha una valenza probabilistica ma vuole essere un indicatore di propensione al franamento, facendo

corrispondere intensità pluviometriche crescenti a maggiori predisposizioni all'insorgere di fenomeni di fluidificazione dei depositi superficiali.

I parametri e le formule per la definizione delle curve di intensità di pioggia sono stati individuati dal documento di Raccomandazione per il Cantone Ticino (Beltraminelli, Kaufmann, & Wyler, 2002), considerando la regione di riferimento di Lugano, facente riferimento all'omonimo pluviometro, in attività dal 1978. L'intensità di pioggia i , funzione di durata d e tempo di ritorno T è data da

$$i(d, T) = d^n (\mu + \sigma \ln(T))$$

con $n = -0.756$, $\mu = 36.43$ e $\sigma = 9.72$ per la regione di riferimento di Lugano, tralasciando la differenziazione alle brevi durate.

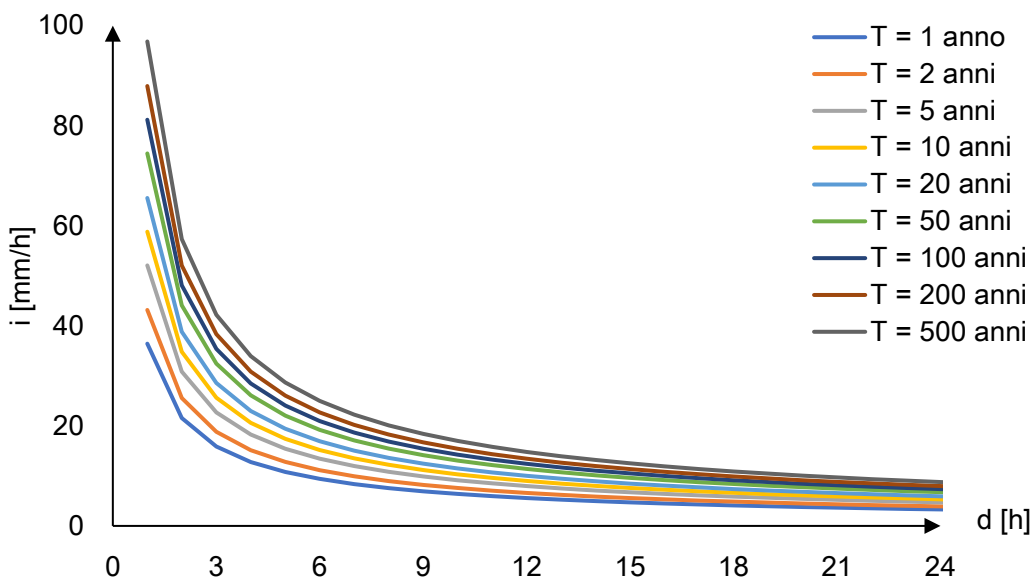


Figura 62. Curve di intensità pluviometrica per la regione di riferimento di Lugano

Grazie ai valori di intensità di pioggia alle diverse durate e per i diversi tempi di ritorno è possibile definire gli ietogrammi sintetici. Si è deciso di utilizzare ietogrammi rettangolari con l'ipotesi che l'andamento temporale dell'intensità di pioggia sia costante in tutta la sua durata (durata 1 h in Figura 63, 3 h in Figura 64, 6 h in Figura 65, 12 h in Figura 66 e 24 h in Figura 67).

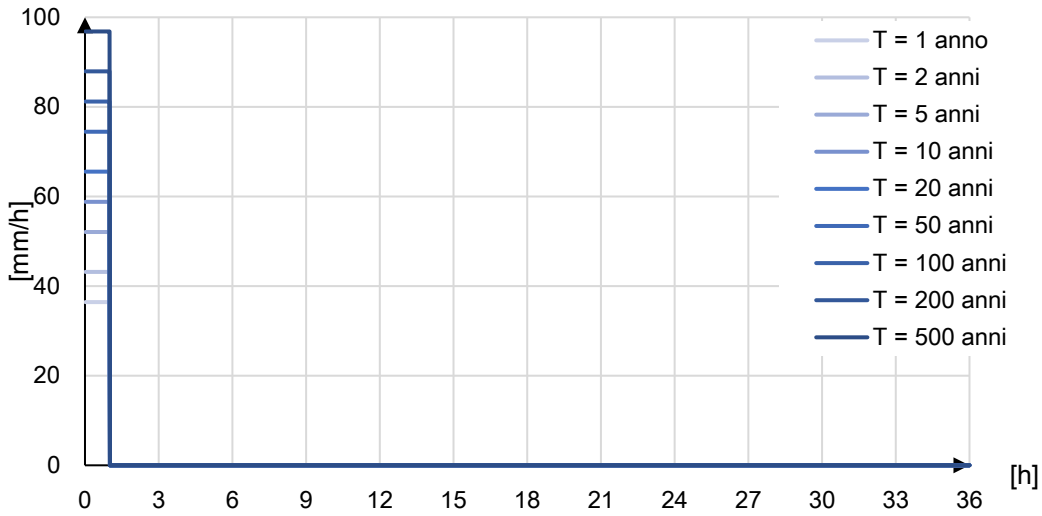


Figura 63. Ietogramma rettangolare per la durata di 1 ora

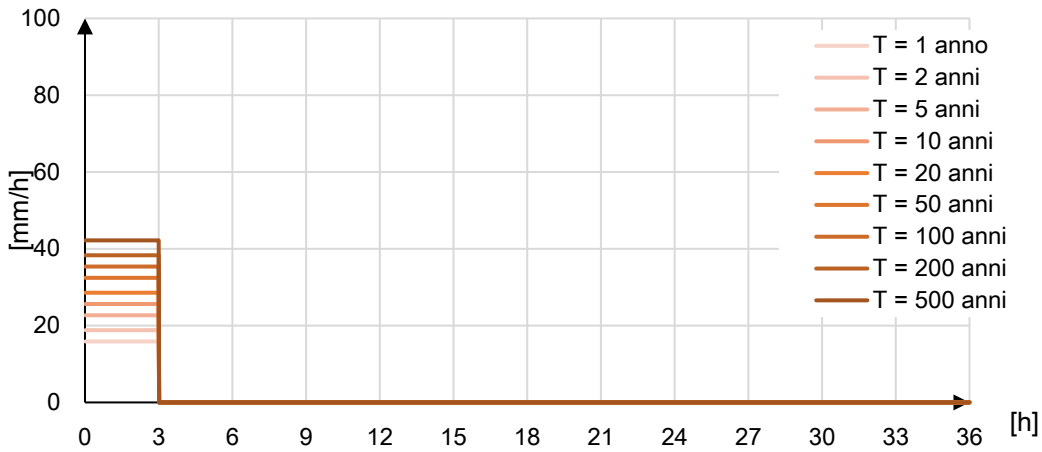


Figura 64. Ietogramma rettangolare per la durata di 3 ore

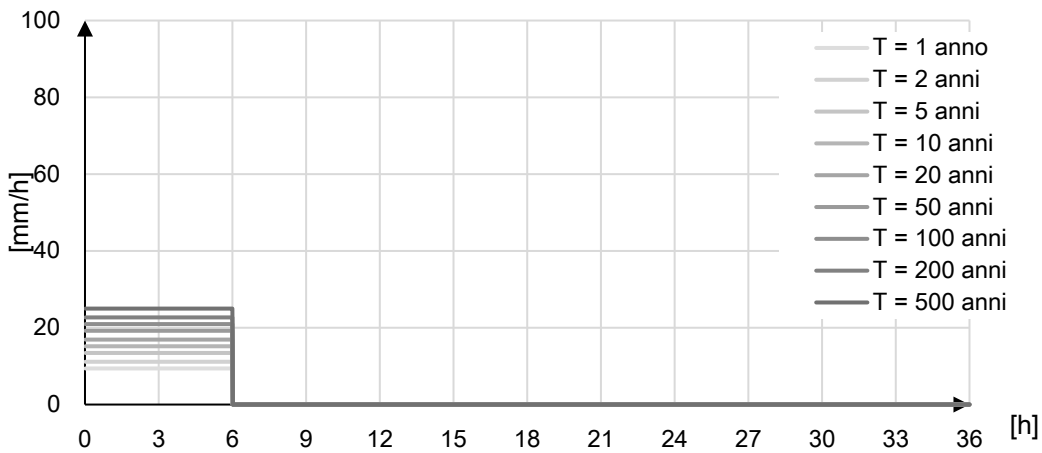


Figura 65. Ietogramma rettangolare per la durata di 6 ore

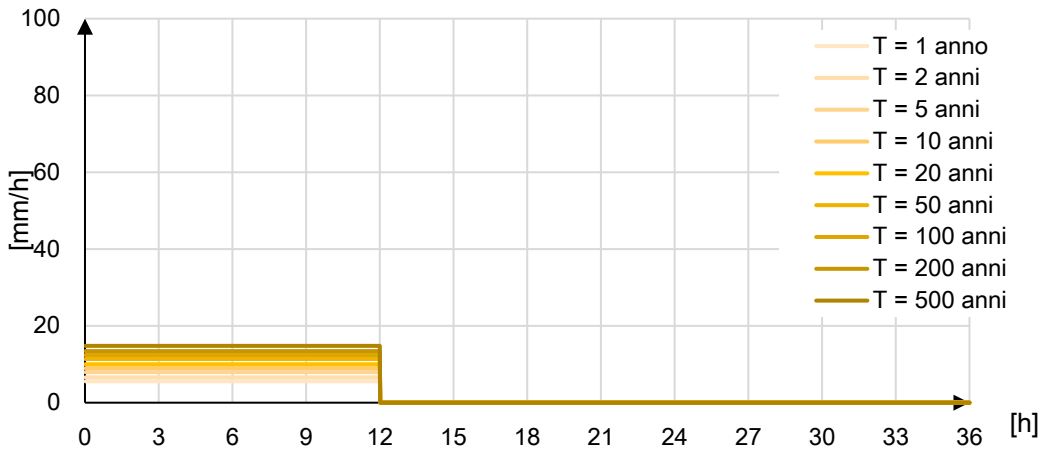


Figura 66. Ietogramma rettangolare per la durata di 12 ore

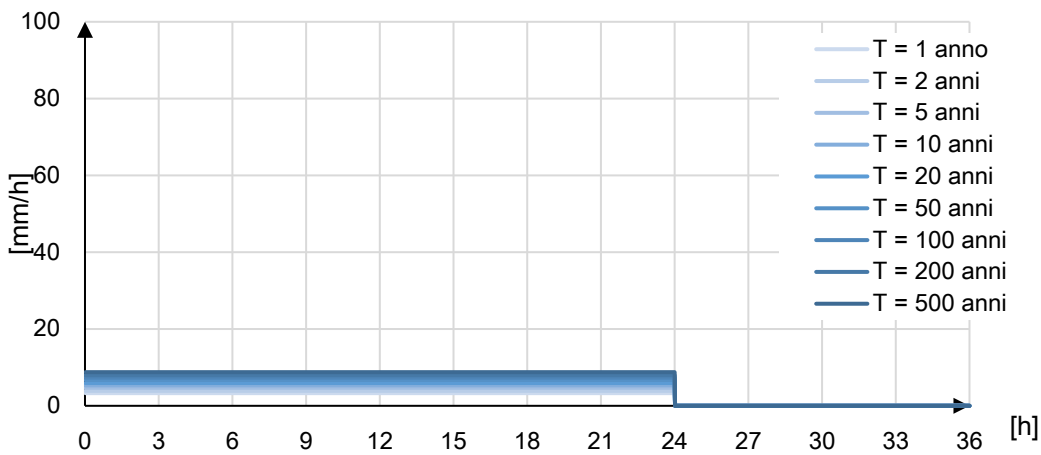


Figura 67. Ietogramma rettangolare per la durata di 24 ore

Il modello è stato lanciato per tutte le cinque durate e i nove tempi di ritorno, per un totale di 45 volte, in modo da ottenere per ogni combinazione dei due parametri il numero di elementi instabili e poter fare considerazioni in merito alla propensione al franamento superficiale.

I risultati ottenuti sono visibili, rispettivamente per la durata di 1 h, 3 h, 6 h, 12 h e 24 h, nelle nei grafici in Figura 68, Figura 69, Figura 70, Figura 71 e Figura 72. Da questi grafici si può vedere come l'andamento della percentuale di celle che si instabilizza progressivamente con il passare delle ore dall'inizio della precipitazione è simile per i diversi tempi di ritorno, considerando una durata di precipitazione.

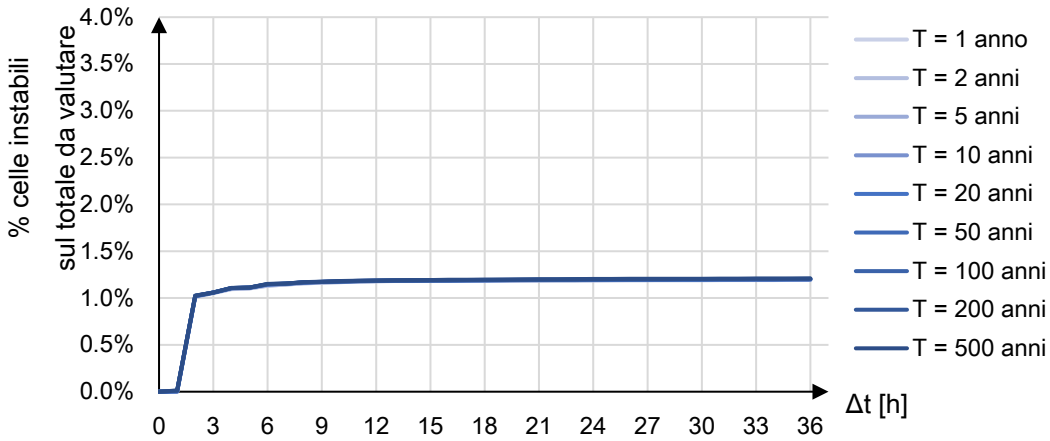


Figura 68. Percentuale di celle instabili sul totale di celle da valutare per la precipitazione di durata 1 ora

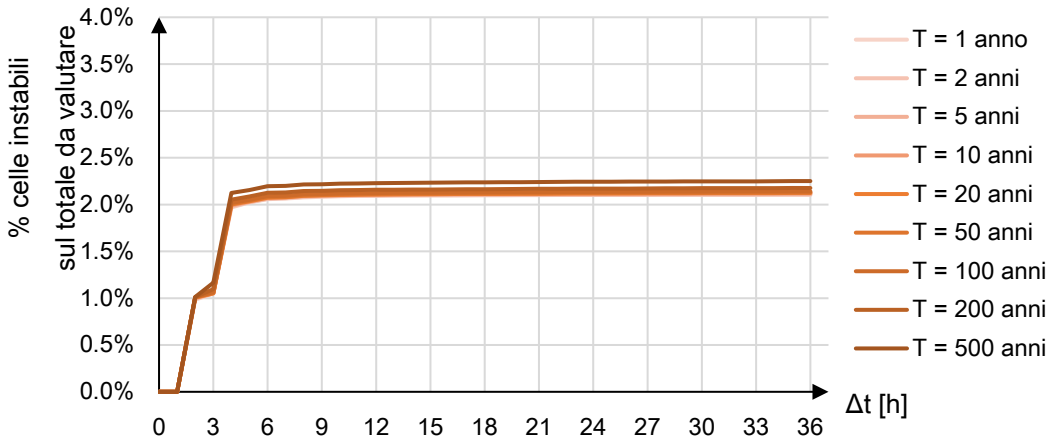


Figura 69. Percentuale di celle instabili sul totale di celle da valutare per la precipitazione di durata 3 ore

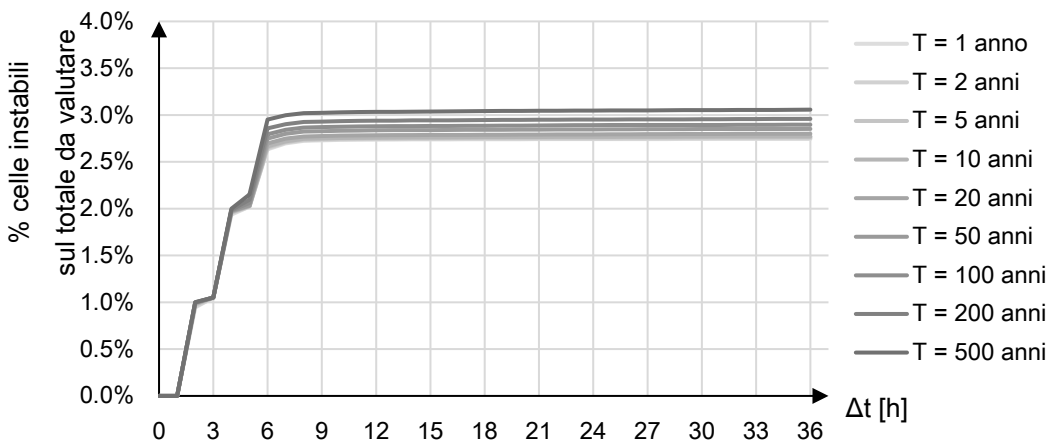


Figura 70. Percentuale di celle instabili sul totale di celle da valutare per la precipitazione di durata 6 ore

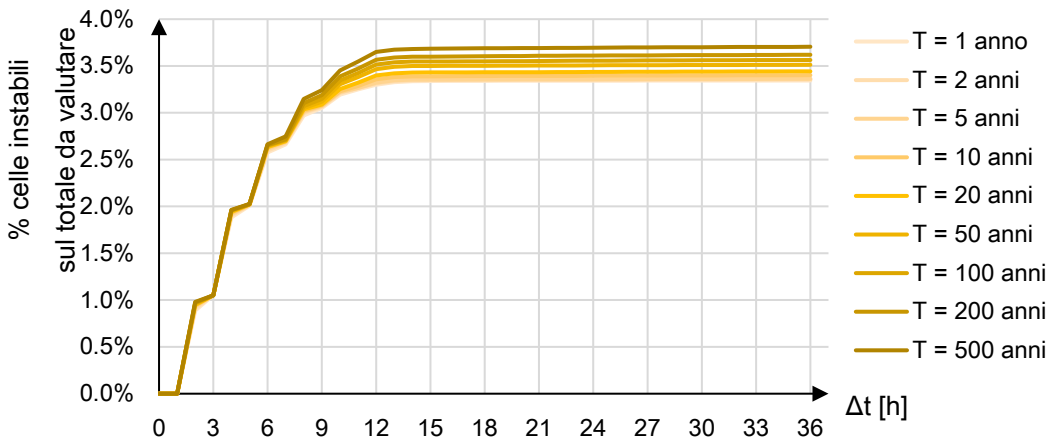


Figura 71. Percentuale di celle instabili sul totale di celle da valutare per la precipitazione di durata 12 ore

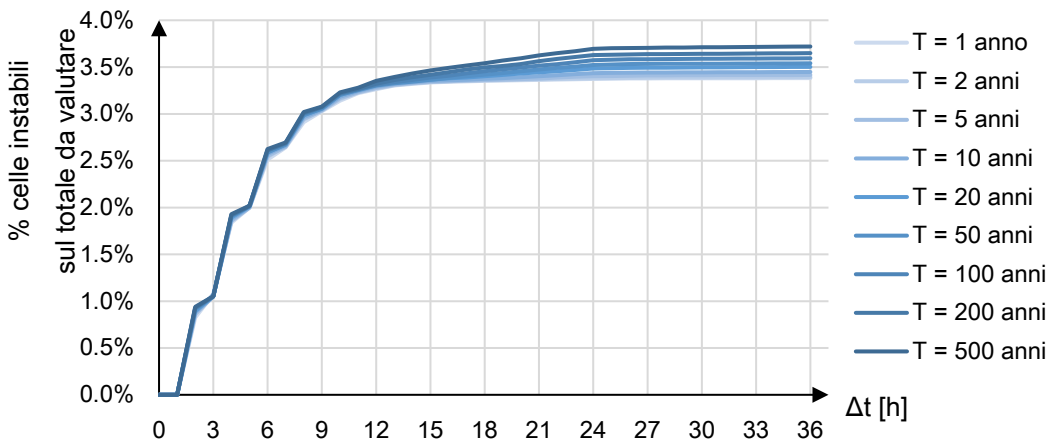


Figura 72. Percentuale di celle instabili sul totale di celle da valutare per la precipitazione di durata 24 ore

Prendendo i risultati per un tempo di ritorno, ad esempio $T = 10$ anni, si nota inoltre che per le diverse durate, la percentuale di celle che raggiunge l'instabilità è pressochè identica, finchè piove. Per comprendere meglio questa affermazione si fa riferimento alla Figura 73, in cui si può notare come dopo la prima ora di pioggia, qualsiasi sia l'intensità (nel caso $T = 10$ anni per la durata di un'ora si hanno 59 mm/h , per la durata di tre ore 26 mm/h , per sei 15 mm/h , per dodici 9 mm/h e per precipitazioni di un giorno 5 mm/h) si registra un aumento significativo di celle instabili, arrivando all'1% del totale di celle da valutare.

Successivamente, se la precipitazione cessa, come nel caso dello ietogramma della durata 1 h, il numero di celle instabili cresce leggermente finché si stabilizza su un valore percentuale che nel caso di $T = 10$ anni è attorno all'1.2%, mentre se la precipitazione continua, dopo un'ora in cui si registra comunque un lieve aumento, dopo la terza ora di precipitazione si vede un altro aumento deciso, raddoppiando la percentuale di celle instabili.

Questo fenomeno si registra nuovamente, con un aumento più contenuto, dopo la quinta ora di precipitazione, per precipitazioni con durate di 6, 12 e 24 ore, mentre nelle successive ore, se la precipitazione prosegue (durate 12 e 24 ore), si hanno aumenti più contenuti e la tendenza sembra assestarsi univocamente intorno al valore percentuale 3.4%.

Le medesime osservazioni si possono fare sui grafici per i diversi tempi di ritorno, Figura 74 per $T = 20$ anni, Figura 75 per $T = 50$ anni, Figura 76 per $T = 100$ anni, Figura 77 per $T = 200$ anni e Figura 78 per $T = 500$ anni. Si nota che al crescere del tempo di ritorno, quindi dell'intensità di pioggia, c'è un discostamento più marcato tra le curve della precipitazione 12 ore e della precipitazione 24 ore e un generale aumento percentuale delle celle instabili, anche se poco percettibile.

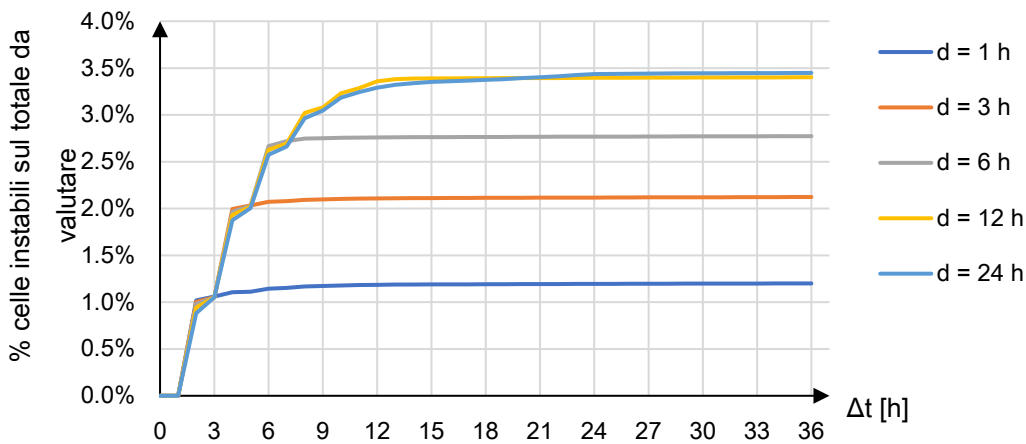


Figura 73. Percentuale di celle instabili sul totale da valutare per le diverse durate, tempo di ritorno 10 anni

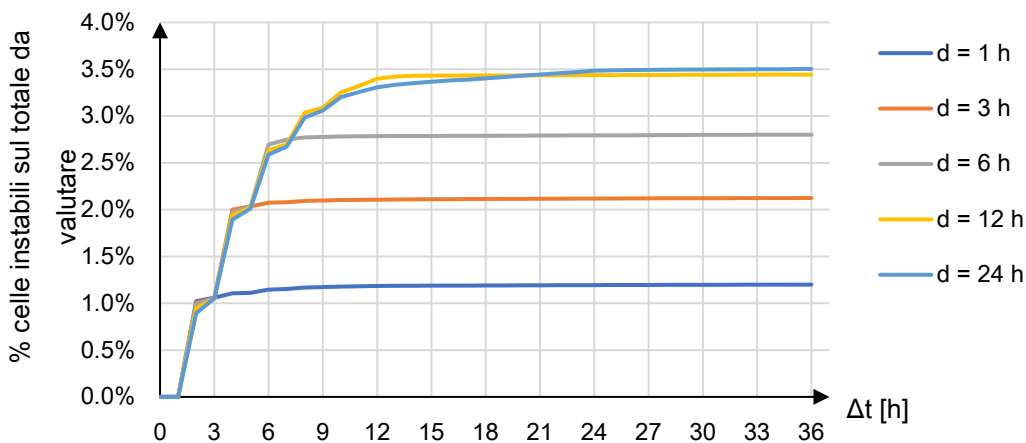


Figura 74. Percentuale di celle instabili sul totale da valutare per le diverse durate, tempo di ritorno 20 anni

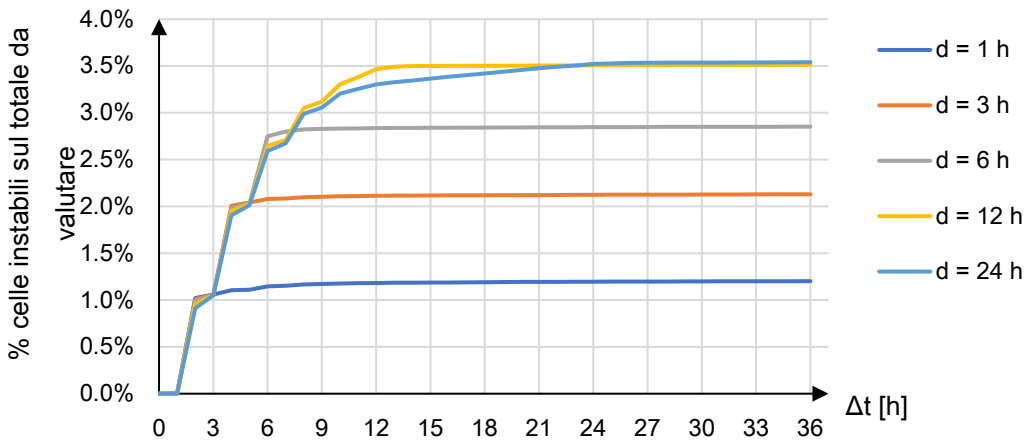


Figura 75. Percentuale di celle instabili sul totale da valutare per le diverse durate, tempo di ritorno 50 anni

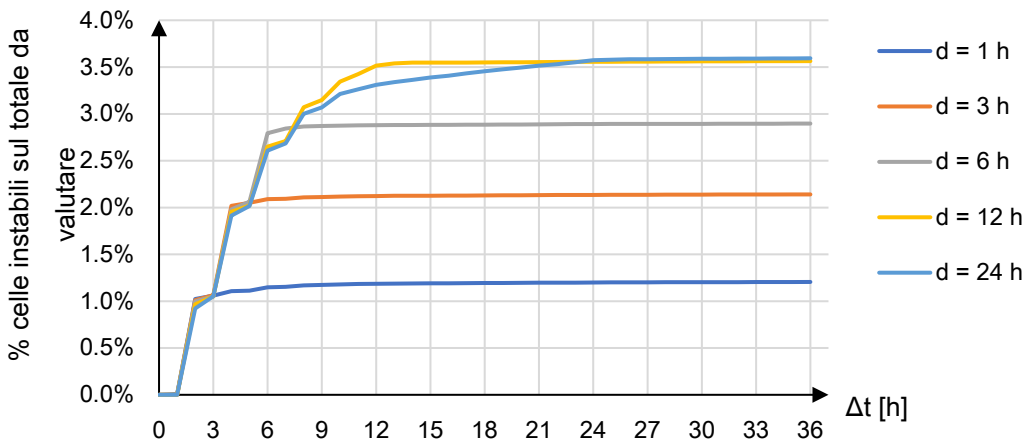


Figura 76. Percentuale di celle instabili sul totale da valutare per le diverse durate, tempo di ritorno 100 anni

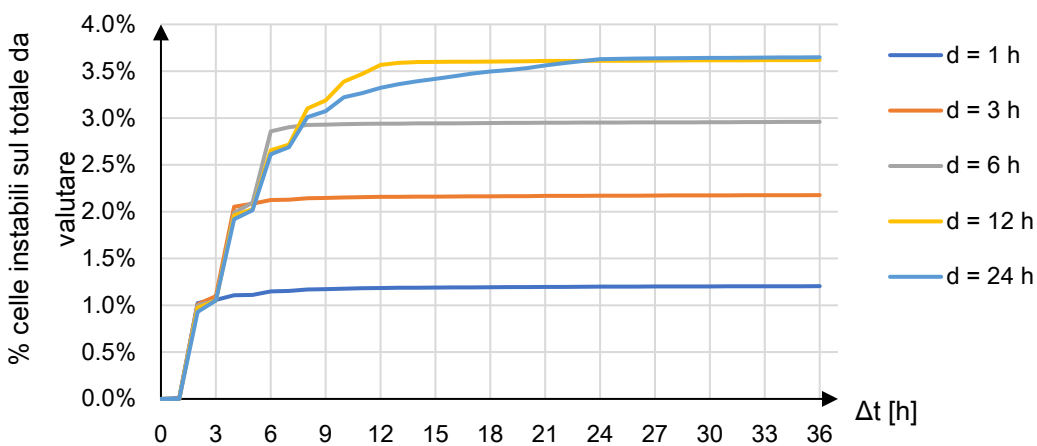


Figura 77. Percentuale di celle instabili sul totale da valutare per le diverse durate, tempo di ritorno 200 anni

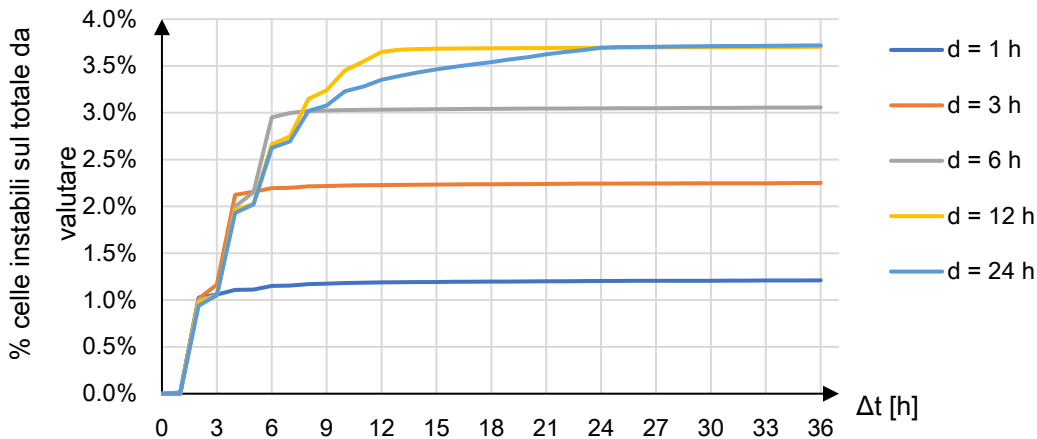


Figura 78. Percentuale di celle instabili sul totale da valutare per le diverse durate, tempo di ritorno 500 anni

Localizzando le celle instabili si evidenzia inoltre che le percentuali molto simili sono dovute al medesimo set di celle che diventano instabili nello stesso istante.

Come facilmente comprensibile, tutti i grafici riportano che la situazione peggiore si ottiene con la pioggia id tempo di ritorno cinquecentennale, con le intensità maggiori. Quello che caratterizza il bacino della Val Colla è invece l'andamento crescente in base alla durata dell'evento, che raggiunge un andamento asintotico simile per le durate di 12 e 24 ore.

Per spiegare la dinamica temporale, a titolo di esempio, si riportano le mappe originate con una pioggia di durata un'ora con tempo di ritorno 500 anni, di intensità 97 mm/h, nella prima ora di pioggia (Figura 79), dopo due ore dall'inizio dell'evento (Figura 79), dopo tre ore (Figura 80) e dopo 36 ore (Figura 81). L'input pluviometrico è tutto concentrato nella prima ora, ma si può notare che non rileva importanti cambiamenti in mappa.

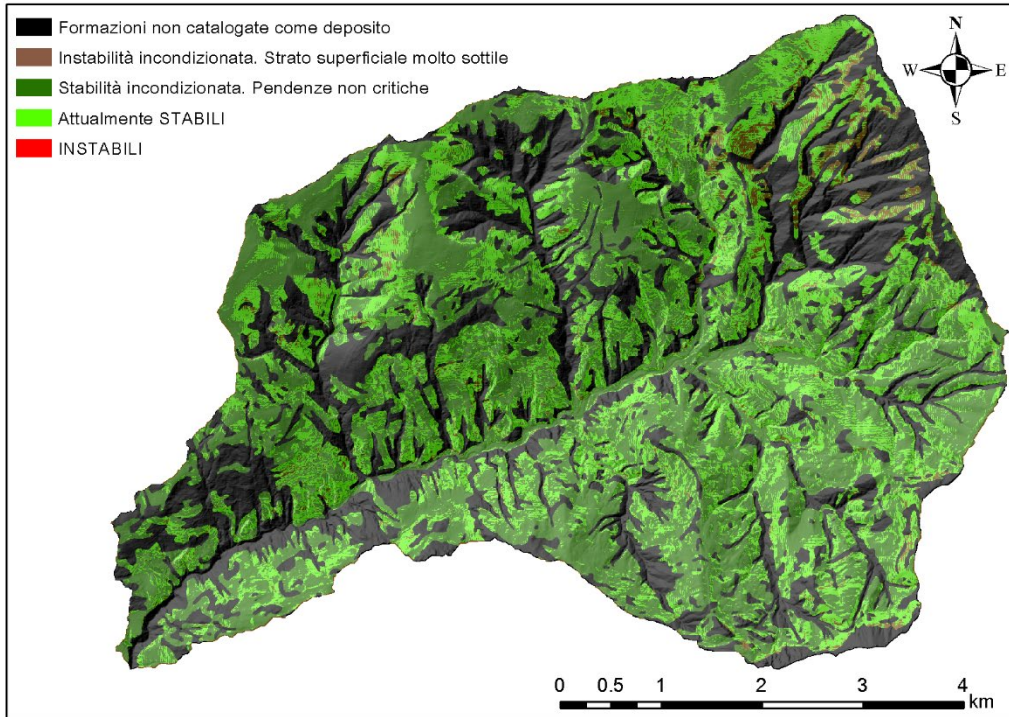


Figura 79. Mappa della stabilità con pioggia di durata 1 h e $T = 500$ anni, a 1 h dall'inizio dell'evento

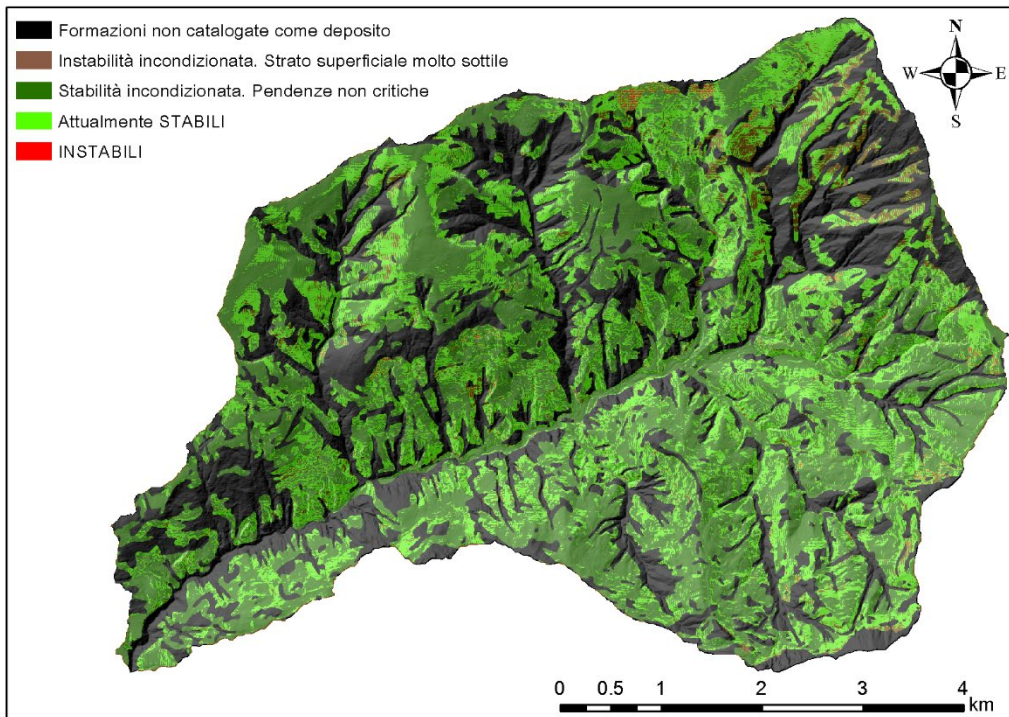


Figura 80. Mappa della stabilità con pioggia di durata 1 h e $T = 500$ anni, a 2 h dall'inizio dell'evento

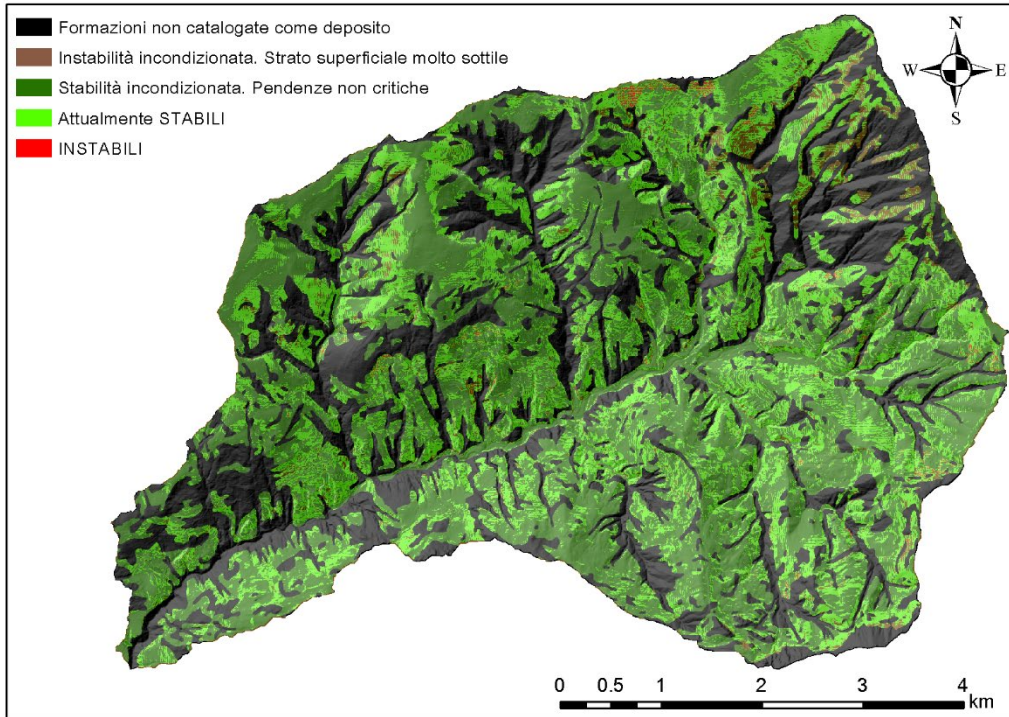


Figura 81. Mappa della stabilità con pioggia di durata 1 h e $T = 500$ anni, a 3 h dall'inizio dell'evento

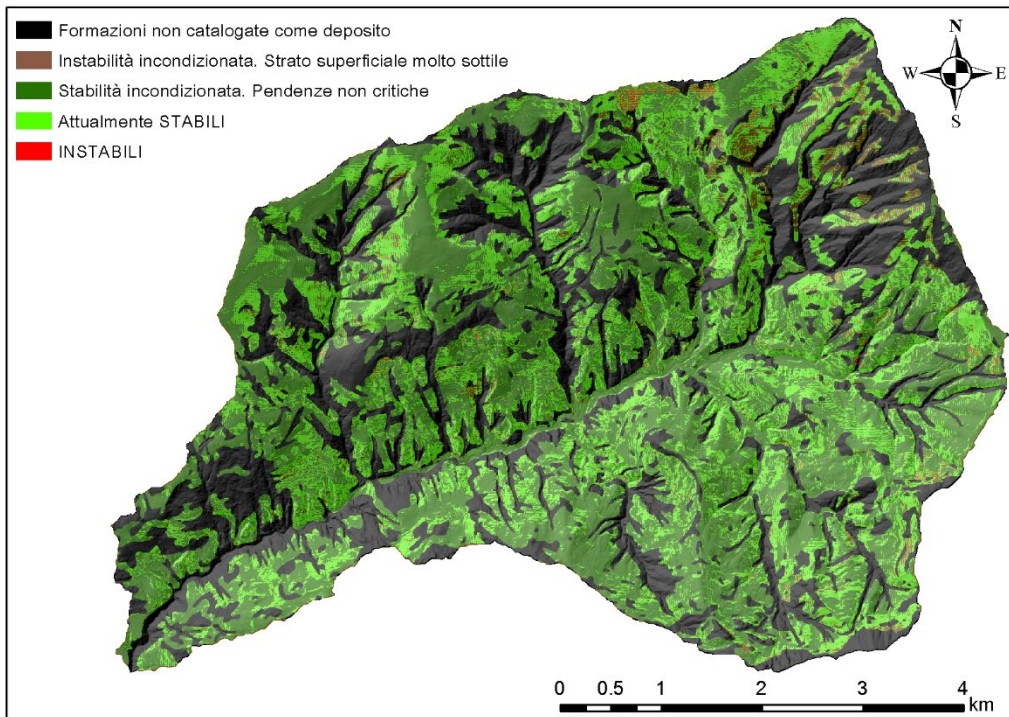


Figura 82. Mappa della stabilità con pioggia di durata 1 h e $T = 500$ anni, a 36 h dall'inizio dell'evento

Due ore dopo l'inizio dell'evento, quando ormai l'episodio precipitativo è cessato, si iniziano a percepire sensibili cambiamenti nella stabilità degli elementi. Facendo riferimento alla mappa di Figura 80, si nota in particolare sulla parte settentrionale del bacino, nelle vicinanze dello spartiacque, una macchia evidente di celle rosse, identificanti l'instabilità. Il fenomeno è già stato descritto commentando i grafici della percentuale di celle instabili, e si è ora in grado di localizzare l'1% di celle che in seguito alla prima ora di pioggia raggiunge l'instabilità. Si nota che per i successivi intervalli temporali, non avendo apporto meteorico, la situazione rimane pressoché invariata (Figura 80 e Figura 82).

Per le caratteristiche del bacino, tuttavia, lo stesso comportamento che è stato mostrato con una pioggia di intensità di 97 mm/h si ha in modo sorprendentemente simile con piogge di intensità anche di un ordine di grandezza inferiore. Il modello, applicato al bacino della Val Colla, sembra quindi essere molto più sensibile alla durata della precipitazione che alla sua intensità.

Per la mappa finale della predisposizione dei versanti al franamento si è quindi considerata la pioggia che provoca, sul lungo termine (36 ore dopo l'inizio dell'evento), gli effetti peggiori sulla stabilità dei versanti in termini di numero di celle instabili: la pioggia cinquecentennale con durata di un giorno.

In Figura 83 è pertanto fornita la mappa della stabilità per la pioggia con $T = 500$ anni e durata 24 ore, a 36 dall'inizio dell'evento, mentre nella Figura 84 è proposta la mappa definitiva della propensione al franamento per il bacino della Val Colla, ottenuta con il metodo sopra descritto e il modello fisicamente basato che considera il transitorio del flusso subsuperficiale.

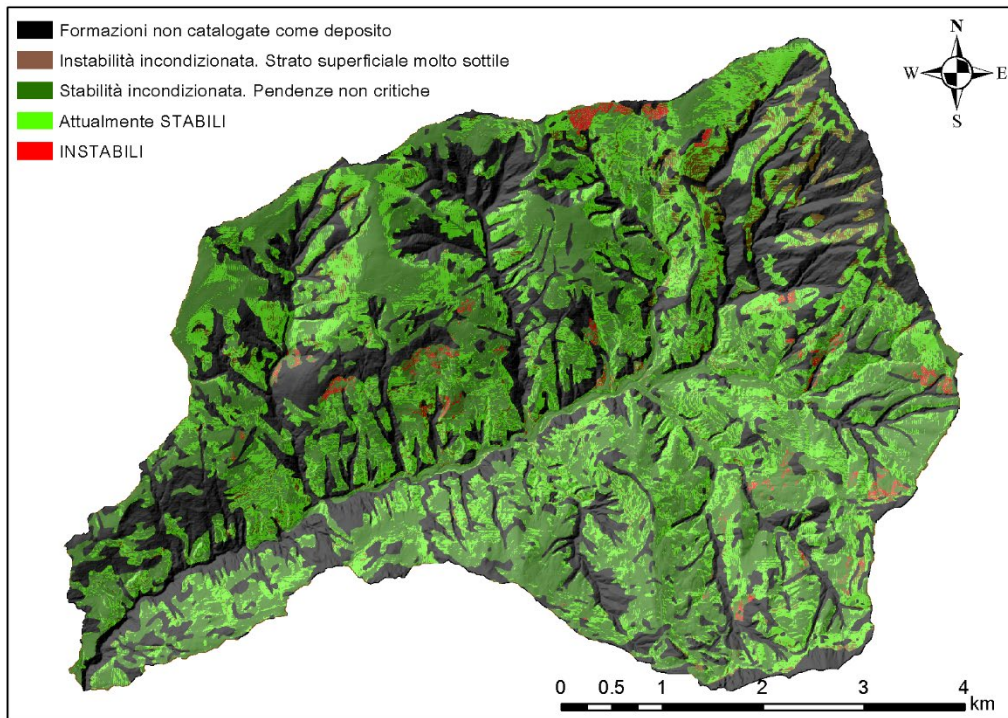


Figura 83. Mappa della stabilità con pioggia di durata 24 h e $T = 500$ anni, a 36 h dall'inizio dell'evento

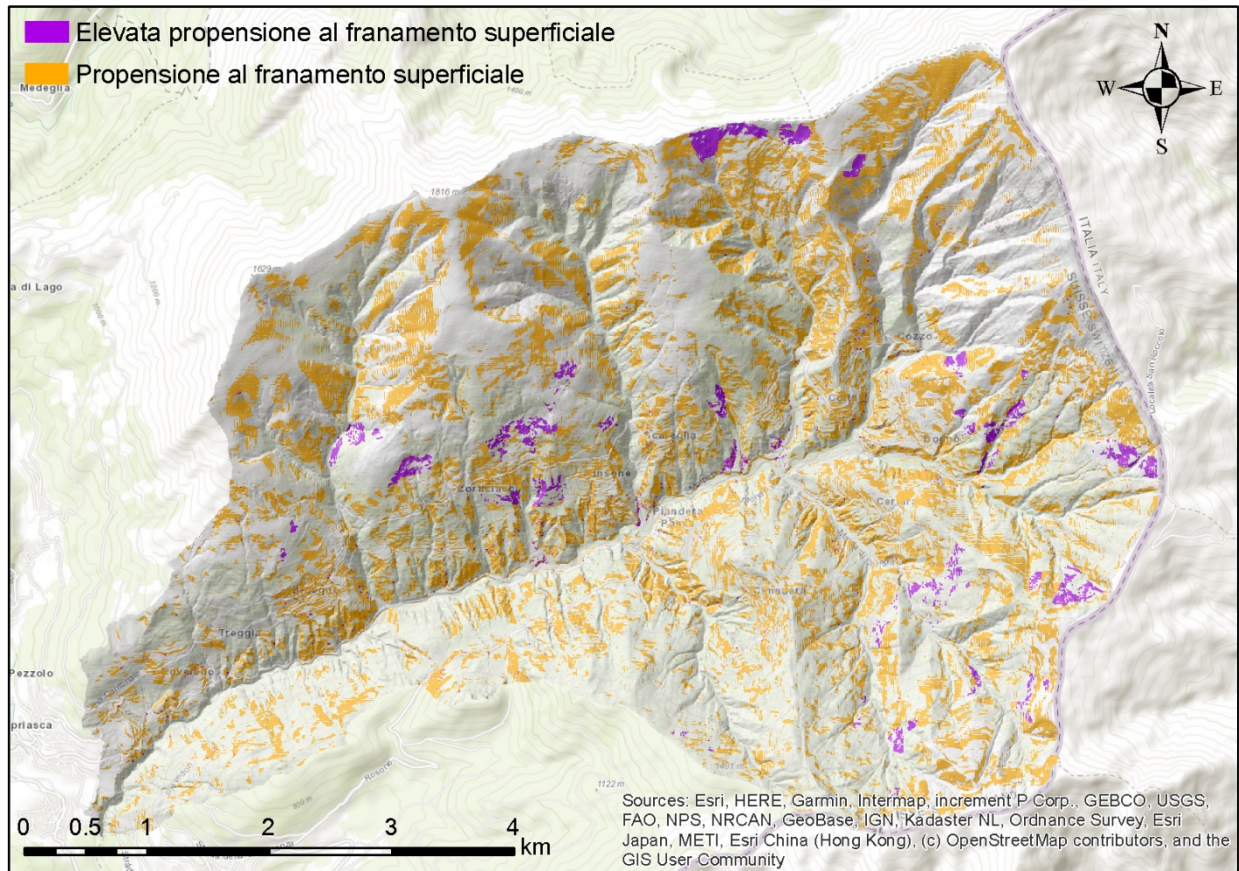


Figura 84. Mappa di propensione al franamento superficiale per il bacino della Valcolla

È stata operata una valutazione qualitativa della mappa di propensione al franamento superficiale (Figura 85), confrontando le aree individuate con la mappatura dei piani zone di pericolo (PZP), selezionando i poligoni appartenenti alla categoria dei dissesti superficiali di versante. Si nota la perfetta corrispondenza di alcune aree caratterizzate da alta propensione al franamento, mentre altre aree dei PZP rientrano in aree non mappate dal nostro metodo, per lo più a causa della mancanza di informazione circa la tipologia di detrito superficiale, cadono infatti in quelle aree non catalogate come deposito e quindi trasparenti al nostro modello. Sono stati riportati anche gli eventi di soil slip avvenuti nell'area, mappati nel catalogo StorMe. Si nota che i punti forniti sono prevalentemente nel fondovalle, in quanto è verosimile che venga catalogato uno scivolamento che interessa una zona antropizzata, mentre è più difficile che rientri uno scivolamento avvenuto in quota, in una zona lontana dai sentieri, anche se di importante estensione. Tuttavia, considerando anche la morfologia del versante, si nota che a monte dei punti StorMe si hanno zone ad elevata propensione al franamento, che verosimilmente provocano effetti di danno nel fondovalle o sulle vie di comunicazione che tagliano il versante.

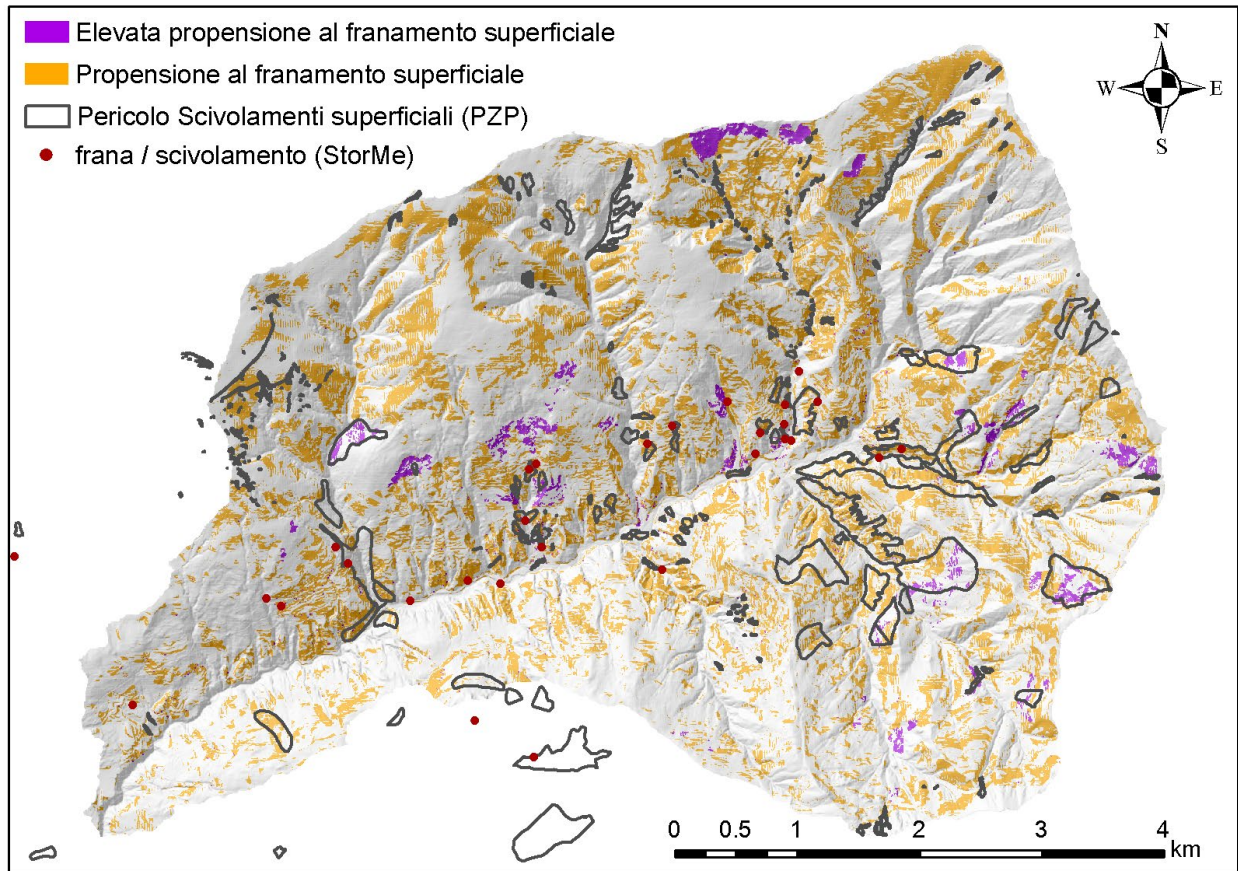


Figura 85. Confronto tra la mappa di predisposizione al franamento superficiale i Piani Zone di Pericolo (PZP) e gli eventi StorMe identificanti i fenomeni di franamento superficiale

7.5. Sviluppi futuri

Attraverso il modello speditivo sono state individuate due aree a carattere prettamente transfrontaliero (Como-Chiasso e Alto Verbano varesino) su cui l'applicazione del modello in transitorio potrà portare risultati proficui per le finalità del WP. Quest'ultimo, prodotto all'interno del lavoro di ricerca del progetto, è stato testato per la prima volta sulla Val Colla, restituendo risultati sicuramente promettenti ma che necessitano di ulteriori approfondimenti anche alla luce di quanto verrà ottenuto con l'applicazione dello stesso su altre aree. In ogni caso, il grado di dettaglio dei risultati ottenuti dipende, come detto, dalla risoluzione dei dati di input: carte geologiche a risoluzioni più alte per il territorio italiano (minori o uguali di 1:50.000) permetterebbero di migliorare anche la simulazione modellistica e quindi, di conseguenza, anche la mappatura delle aree predisposte agli scivolamenti superficiali data una determinata precipitazione in ingresso.

8. Frane da crollo

*A cura di Alessandro De Pedrini, Dorota Czerski, Christian Ambrosi, Maurizio Pozzoni
(ISTITUTO DI SCIENZE DELLA TERRA – SUPSI)*

8.1. Premessa e obiettivi dello studio

Le carte di suscettibilità relative ai processi di crollo individuano sulla totalità del territorio oggetto di studio, le porzioni territoriali più favorevoli al verificarsi di fenomeni di crollo. In assenza di carte di pericolo, questo strumento mira ad identificare le zone antropizzate potenzialmente a rischio.

Sul territorio svizzero, il Dipartimento del Territorio (DT) ha commissionato a Terranum Sàrl, spin-off dell'Istituto di Scienze della Terra dell'Università di Losanna, uno studio di suscettibilità relativa ai processi di crollo, scivolamenti spontanei e flussi di detrito su tutto il Canton Ticino (Terranum, 2019). La mappatura della suscettibilità ultimata nel 2020, viene utilizzata nell'ambito delle domande di costruzione fuori zona edificabile per valutazione/validazione di situazioni di pericolo particolari e come dato di base negli studi PZP redatti dagli specialisti su mandato del Dipartimento del Territorio. Lo studio di Terranum esclude la necessità di condurre studi ulteriori su lato svizzero e costituisce la base per la realizzazione della carta di suscettibilità a processi di crollo sul territorio di studio italiano. Il software di modellazione numerica Flow-R (Horton, Jaboyedoff, Rudaz, & Zimmermann, 2013) sviluppato da Terranum, si presenta di semplice utilizzo e può essere utilizzato secondo i dati disponibili su territorio italiano.

L'obiettivo del presente elaborato è quindi di fornire un'analisi di suscettibilità ai processi di crollo sul lato italiano dell'area di studio di GESTI.S.CO, puntando a fornire un dato il più possibile simile tra i due paesi.

Le carte sono composte da un'analisi di suscettibilità delle zone di distacco e suscettibilità a propagazione dei crolli.

8.2. Dati di base

La composizione delle carte ed elaborazione del modello numerico svolto con l'ausilio del software Flow-R (Horton et al. 2013), hanno necessitato di un set di dati utilizzabili in forma originale ed altri richiedenti modifiche.

Dati non trattati

- Digital Terrain Model (DTM) della provincia di Varese e Como a risoluzione 5 metri (cfr. par. 3)
- Inventario dei Fenomeni Franosi Italiani, GEOIFFI (Regione Lombardia, 2017)

Dati trattati

- Digital Terrain Model (DTM) della provincia di Varese e Como, con risoluzione convertita da 5m a 10 metri. Nella modellazione numerica ottenuta con software Flow-R, si è reso necessario l'utilizzo di un DTM con una risoluzione spaziale che possieda un buon dettaglio e allo stesso tempo elaborabile dal software di modellazione numerica. Secondo P.Horton et al. (2013), il DEM a risoluzione 10 metri è un buon compromesso tra tempo di processo e qualità dei risultati. La procedura di ricampionamento è stata realizzata tramite il comando *resample* del software ArcGIS di Ensi, con tecnica *bilinear* attraverso cui la quota dei nuovi pixel ridimensionati è ottenuta dalla mediazione del valore della quota altimetrica dei quattro pixel adiacenti al pixel di nuova stesura. Questo metodo si configura adatto per l'applicazione a dati con continuità areale quindi adatto allo scopo ricercato.
- *Aree soggette a crolli/ribaltamenti diffusi* da inventario GEOIFFI. Per poter effettuare la mappatura della suscettibilità a distacco, il formato vettoriale originale del file GEOIFFI è stato convertito in formato raster con una risoluzione di 5. Questa risoluzione permette ha permesso una rappresentazione dettagliata delle classi di suscettibilità a distacco. La rasterizzazione del dato GEOIFFI con risoluzione a 10 metri è stata invece necessaria per la valutazione della suscettibilità a propagazione in Flow-R, necessaria in quanto il software richiede una risoluzione dei dati raster di input comune (uguale al modello DTM impiegato).

8.3. Criteri generali delle simulazioni di propagazione

Per modellizzare la suscettibilità di propagazione si è reso necessario l'utilizzo di un software di modellazione numerica idoneo all'utilizzo su scala regionale. A questo scopo si è deciso di adoperare il software Flow-R (2013), già utilizzato allo stesso scopo su lato svizzero da Terranum. Le elaborazioni del programma mostrano su base probabilistica, la massima espansione di un crollo avente come origine aree di distacco definite. La propagazione identificata dal modello, non è legato a singoli eventi ma un crollo dall'intera area sorgente prestabilita. Gli algoritmi che controllano la propagazione definiscono l'estensione laterale e la distanza di propagazione lungo il versante.

Regolazione dell'estensione laterale

Per regolare l'estensione laterale, il modello Flow-R utilizza l'equazione di Holmgren (1994), modificata da Horton et al. (2013) assieme ad un parametro di persistenza (Gamma 2000). Un esponente di potenza x regola l'estensione nell'equazione di Holmgren. Un esponente x prossimo a 1 porta ad un'estensione laterale accentuata mentre con valori maggiori, l'estensione risulterà più incanalata.

Horton et al. (2013) aggiunge all'equazione di Holmgren un parametro dh che considera l'altezza generica del fenomeno e irregolarità del DTM.

Regolazione della distanza di propagazione

Fahrböschung fisso

(Heim, 1932) (Scheidegger, 1973) (Toppe, 1987) (Evans & Hungr, 1993) (Corominas J. , 1996) (Jaboyedoff & Labiouse, 2011)

Il metodo del Fahrböschung fisso è stato sviluppato e ottimizzato in particolare negli studi su scala regionale (Jaboyedoff, Pedrazzini, & Horton, 2008). Nel metodo si imposta un angolo di propagazione del crollo, misurato sul piano passante tra la zona di distacco ed il punto di propagazione massimo del crollo. Aumentando l'ampiezza dell'angolo, quindi la verticalità del piano, si avrà una distanza di propagazione minore rispetto all'uso di un angolo di ampiezza ridotta.

Fahrböschung variabile

(Michoud & Horton, 2015)

Per tenere in considerazione la presenza o meno di boschi sui versanti che ridurrebbero la distanza di propagazione, si considerano due differenti angoli di *Fahrböschung*. Per il caso dei crolli, un angolo di 33° utilizzato generalmente per la propagazione senza boschi di protezione, viene portato a 38° per simulare la presenza dei boschi che riducano la propagazione (Dorren, Berger, & le Hir, 2005).

Simplified friction-limited model

(Horton, Jaboyedoff, Rudaz, & Zimmermann, 2013)

Seguendo la linea dei principi precedenti, con il modello SFLM viene impostata una soglia limite all'energia, controllata dalla velocità di propagazione massima.

8.4. Metodo dettagliato e comparazione con lo studio Terranum

Identificazione delle zone di distacco

L'identificazione delle zone di distacco secondo il modello di Terranum subisce in questo studio una netta semplificazione. Su lato svizzero, l'individuazione delle aree di distacco e successiva elaborazione delle *carte di suscettibilità a distacco* avviene secondo un procedimento a più passaggi. Il territorio cantonale è suddiviso in unità o facies geologiche comprendenti diverse formazioni geologiche che, per somiglianza delle caratteristiche intrinseche come discontinuità strutturali o sedimentarie maggiori, forze di deformazione o resistenza alla rottura, possiedono suscettibilità di crollo simili.

Sulla base delle carte Geocover 1:25000, dalla carta tettonica e petrografica delle Alpi Lepontine centrali (Berger, Mercolli, & Engi, 2006) e la carta geologica delle Alpi ticinesi (Preiswerk, et al., 1934), Terranum identifica cinque grandi unità geologiche omogenee.

A sud del Piano di Magadino, secondo questa semplificazione, l'areale è descritto da un'unica facies geologica chiamata Adria. L'unità Adria, insieme alla copertura morenica e quaternaria, definisce i limiti di pendenza attribuiti alle classi di suscettibilità a distacco.

Su questo macro-raggruppamento, sono state ricercate le aree con suscettibilità a crollo significativa attraverso l'analisi congiunta del DTM, carte geologiche e ortofoto.

Sul lato italiano per la mappatura delle aree di distacco ci si avvale dei dati presenti nell'inventario dei fenomeni franosi in Lombardia GEOIFFI (Carelli, Ceriani, & Valbuzzi, 2006), focalizzandosi sulle aree soggette a crolli e ribaltamenti diffusi, derivanti dalla mappatura dettagliata dei fenomeni franosi (fotointerpretazione, raccolta ed analisi dati storici, rilievi, controlli e verifiche sul terreno).

Le aree soggette a crolli/ribaltamenti diffusi, sono definite nell'inventario GEOIFFI come "tutti quei settori che, soprattutto in aree montuose, caratterizzano la base di pareti e le pareti stesse o versanti molto ripidi, dove si ripetono fenomeni di caduta e scendimento di singoli elementi lapidei o crolli di piccoli ammassi rocciosi, generalmente conseguenti ad uno stato di significativa fratturazione dell'ammasso roccioso e al susseguirsi di cicli stagionali caratterizzati da forte escursione termica". Tra tutti i dati mostrati, si è scelto di utilizzare i crolli di stato attivo/riattivato/sospeso e di tralasciare quindi i fenomeni di stato quiescente.

Una volta chiare le aree di distacco, in entrambi gli studi si è passato ad un processamento e scomposizione del DTM sotteso alle aree di distacco in 3 classi di suscettibilità basate sulla

pendenza del versante. Per l'unità geologica "Adria", le classi di suscettibilità di distacco sono differenziate secondo il seguente grado di acclività: Classe 1 tra 42° e 52°, Classe 2 tra 52° e 65° e Classe 3 sopra i 65° di pendenza.

Nel dettaglio, le classi di suscettibilità presentate da Terranum in accordo con il Dipartimento del Territorio (DT) sono così descritte:

- *“La classe 1 di tipo Rimobilizzazione di blocchi è considerata per tutta la zona derivata da crolli recenti, non (o poco) ricoperti dalla vegetazione, la cui pendenza è superiore al modo di distribuzione della famiglia di versanti e la cui suscettibilità di distacco è superiore a 0.5%. Questa soglia bassa definisce gli angoli considerati come limite di stabilità apparente di una conoide di detrito, al di sopra del quale, un blocco può rimobilizzarsi, filtrando al contempo le suscettibilità di distacco molto basse.”*
- *“La classe 2 di tipo Crolli derivanti dal distacco di blocchi nelle prime pareti rocciose è considerata per ogni parete rocciosa mediamente ripida, cioè per ogni pendenza superiore all'intersezione tra le distribuzioni delle famiglie “versante” e “parete rocciosa”, che segna il limite morfologico tra queste due famiglie.”*
- *“La classe 3 di tipo Crolli derivanti dal distacco di blocchi nelle seconde pareti rocciose è considerata per ogni parete rocciosa molto ripida, cioè per ogni pendenza la cui suscettibilità teorica di distacco è superiore a 75%.”*

Un'ulteriore differenza tra dato italiano e svizzero sta nella sua risoluzione spaziale degli elementi esposti, impostata a 5 m su dato italiano e 2 m su lato svizzero, seguendo per entrambi la rispettiva risoluzione base del DTM.

Modello di propagazione

Il modello di propagazione utilizza i parametri presentati nel capitolo Criteri generali delle simulazioni di propagazione 8.3. In particolare, il modello Flow-R, si basa sul metodo empirico e prevede l'inserimento dei parametri di *Fahrböschung* variabile limitato da una velocità massima SFLM e modello digitale del terreno DTM a risoluzione 10 m anziché di 6 m da Terranum.

Regolazione estensione laterale

Da rapporto Terranum (2019) “Le traiettorie dei crolli possono essere molto caotiche, generando una dispersione laterale potenzialmente importante, a seconda delle forme e delle reologie dei blocchi e delle superfici di rimbalzo (Ritchie, 1963) (Crosta & F., 2004). Per tenere conto di questo

comportamento caotico e limitare il più possibile un incanalamento sovrastimato delle traiettorie, l'esponente di Holmgren x è di 1 (cioè il più alto possibile). L'elevazione della cella centrale nell'equazione di Holmgren modificata dh è di 1 m per limitare l'influenza degli artefatti del MDT, soprattutto nelle aree boschive, per filtrare le irregolarità del terreno e per rappresentare meglio il comportamento dei blocchi.”

Regolazione angolo di propagazione del Fahrböschung

Nel modello di propagazione a crollo elaborato da Flow-R, viene scelto un angolo di propagazione per gli eventi estremi di 33° , in accordo con Jaboyedoff et al. (2008); Michoud et al. (2012); Michoud et Horton (2015), Michoud et Horton (2018). Un angolo di 38° invece, è stato utilizzato per modellare eventi con energie inferiori quindi per eventi più comunemente osservati. Lo stesso angolo viene utilizzato per rappresentare l'effetto dei boschi di protezione come consigliato dalla letteratura scientifica per le Alpi (Dorren, Berger, & le Hir, 2005).

Regolazione velocità limite del SFLM

Da rapporto Terranum (2019) “*La velocità limite che controlla la distanza di propagazione del modello SFLM per le propagazioni degli eventi estremi è di 30 m/s, in linea con le raccomandazioni federali per i crolli (UFAM 2016) e (2) feedback di lavori analoghi svolti nel Canton Vaud (Michoud & Horton, 2018). Per eventi a energie inferiori, più spesso, la velocità limite del modello SFLM è ridotta a 25 m/s, sempre in linea con le raccomandazioni dell'UFAM 2016.*”

8.5. Risultati

Le classi di suscettibilità a distacco risultanti su lato italiano sono: Classe1, Classe 2 e Classe 3. Queste corrispondono alle classi “Rimobilizzazione di blocchi”, “Crolli derivanti dal distacco di blocchi nelle prime pareti rocciose” e “Crolli derivanti dal distacco di blocchi nelle seconde pareti rocciose individuate nel rapporto Terranum (2019). La suscettibilità a distacco aumenta secondo la numerazione della classe. La mappatura della suscettibilità a distacco modellata sull'area di progetto italiana trova una buona continuità con la modellazione su territorio svizzero (Figura 86).

La mappatura della suscettibilità a propagazione dei crolli, è stata eseguita attenendosi al metodo utilizzato da Terranum nell'area di studio ticinese. Nella **Error! Reference source not found.**, tratta dallo stesso rapporto, sono mostrati i parametri utilizzati nel modello Flow-R. Per ogni classe di suscettibilità a propagazione è riportata la propria zona di distacco, lo scenario a cui essa fa riferimento (con o senza bosco di protezione), la probabilità dell'evento ed i parametri limite rappresentati dall'angolo di propagazione e la velocità limite secondo il metodo SFLM.



Le classi di suscettibilità a propagazione risultanti sono:

Classe 11 e Classe 21, per crolli non ostacolati da aree boschive, caratterizzati quindi da una propagazione molto estesa e velocità elevate. Nel modello numerico l'angolo di Fahrböschung è di 33° e la velocità massima 30 m/s. Questi eventi sono considerati estremamente rari.

Classe 12 e Classe 22, per crolli che incontrano durante la corsa verso valle aree boscate che ne limitano la propagazione. Nel modello numerico la propagazione è limitata da un angolo di Fahrböschung di 38° e una velocità massima di 30 m/s. Questi eventi sono da considerarsi rari.

Classe 13 e Classe 23, per crolli con propagazione su pendii boscati, caratterizzati da una corsa limitata rispetto alle classi precedenti. In Flow-R l'angolo di Fahrböschung utilizzato è di 38° e la velocità massima permessa è di 25 m/s. Le classi 13 e 23 rappresentano eventi comuni.

Da un confronto delle mappatura sui due paesi (Figura 87), si osserva una estensione delle aree suscettibili a distacco maggiore su lato Svizzero rispetto al lato Italiano. Questa differenza dipende dal metodo di individuazione delle aree di potenziale innesco dei crolli, descritta nel Capitolo 8.4, Identificazione delle Zone di Distacco.

La mappatura completa della suscettibilità di crollo a distacco e propagazione è riportata rispettivamente in Figura 88 e Figura 89, nonché nelle tavole 8.1 e 8.2.

Tabella 10. Parametri utilizzati nel modello di propagazione e classificazione dei risultati – modello Terranum.

Classe	11	21	12	22	13	23
Zona di distacco	Rimobilizzazione	Pareti 1 e 2	Rimobilizzazione	Pareti 1 e 2	Rimobilizzazione	Pareti 1 e 2
Scenario	Senza bosco di protezione		Con bosco di protezione			
Evento	Indicativo		Raro		Comune	
Angolo di propagazione senza bosco di protezione	33°		33°		38°	
Angolo di propagazione nel bosco di protezione	33°		38°			
Velocità limite del SFLM	30 m/s		30 m/s		25 m/s	

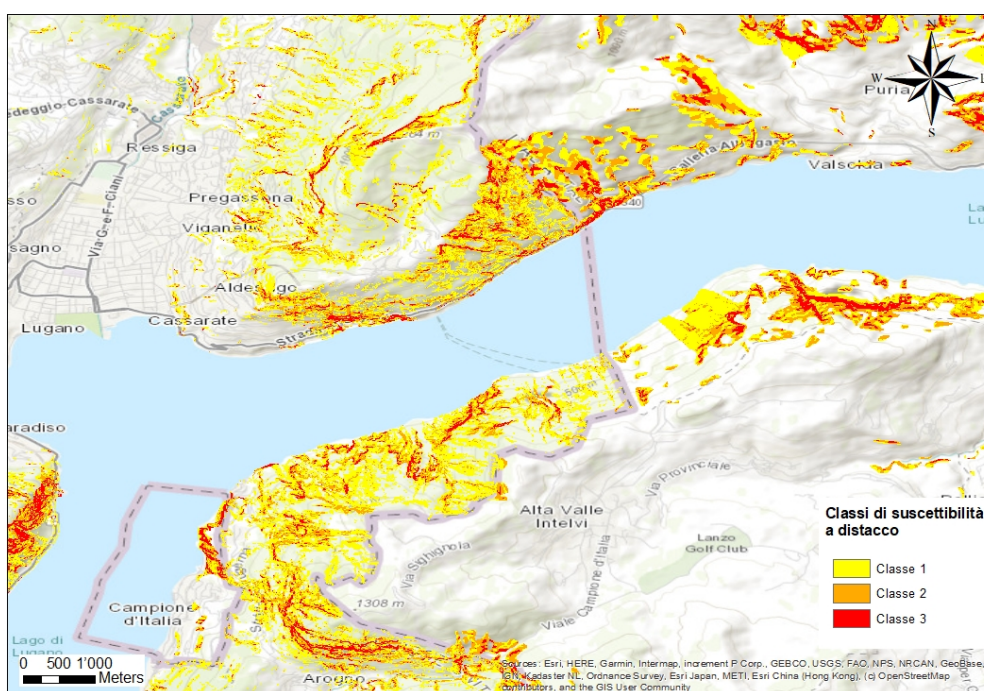


Figura 86. Comparazione delle carte di suscettibilità a distacco crolli tra Canton Ticino e Italia lungo il Lago Ceresio

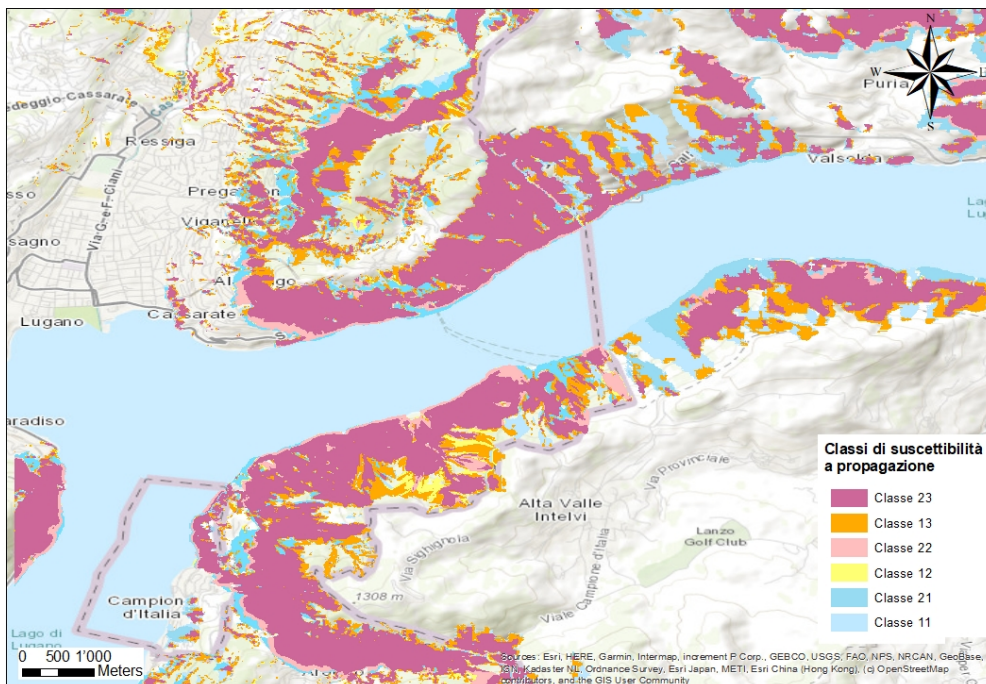


Figura 87. Comparazione delle carte di suscettibilità a propagazione crolli tra Canton Ticino e Italia lungo il Lago Ceresio.

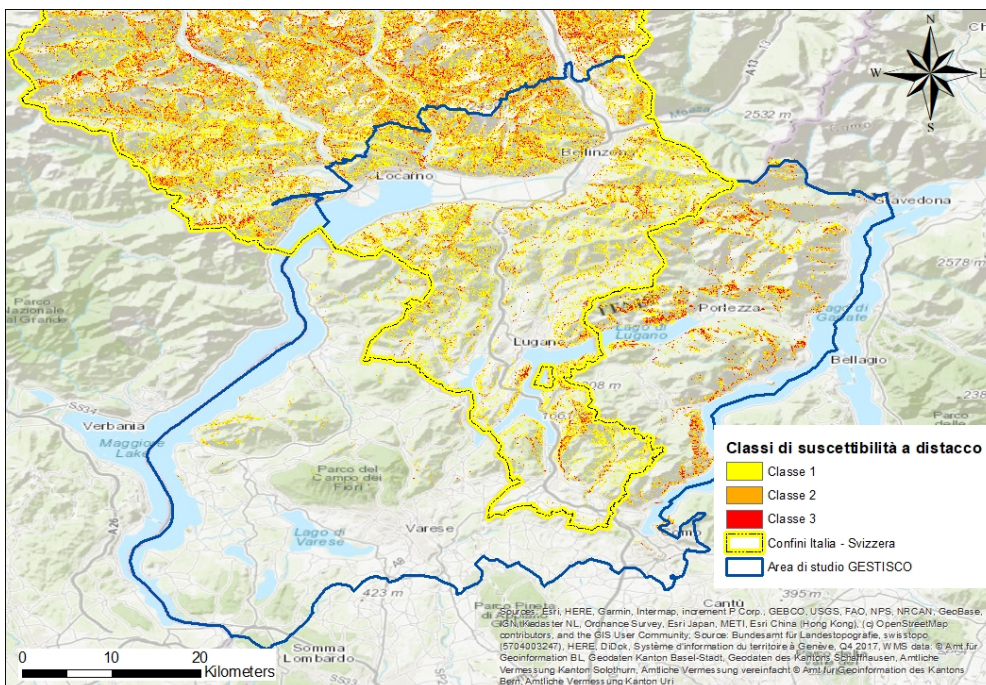


Figura 88. Carta di suscettibilità a distacco crolli per l'intera area di studio

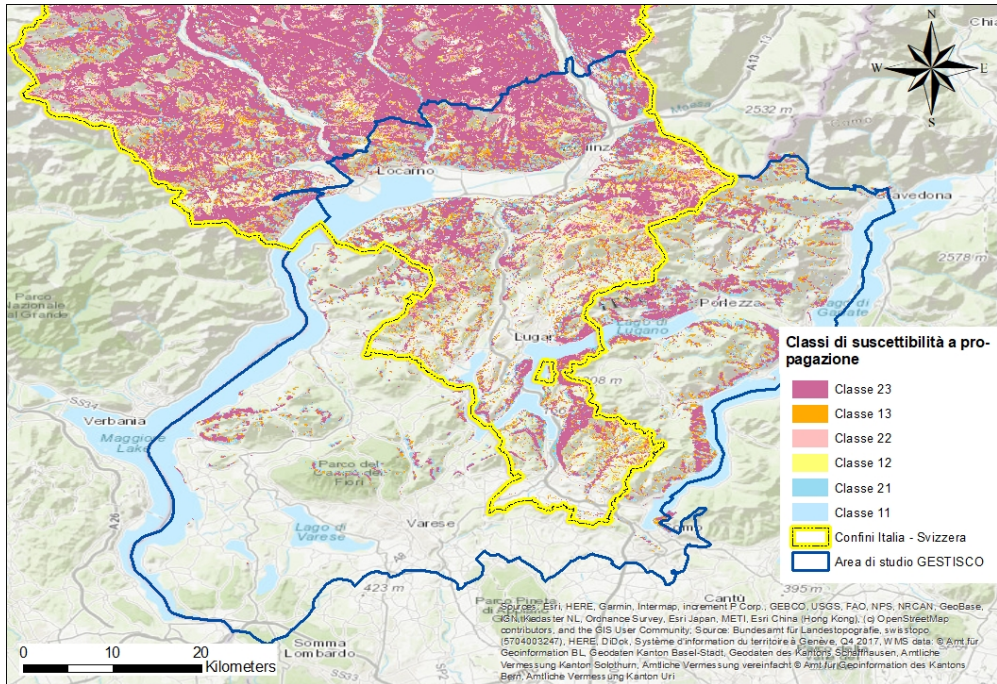


Figura 89. Carta di suscettibilità a propagazione crolli per l'intera area di studio

9. Allegati

9.1. Elenco delle tavole

- Tavola 5.1 – Carta dell'indice di suscettibilità da alluvione per il territorio di GESTI.S.CO, in scala 1:150.000 (formato A1);
- Tavola 5.2 – Carta delle classi di suscettibilità da alluvione per il territorio di GESTI.S.CO, in scala 1:150.000 (formato A1);
- Tavola 6.1 – Carta dell'indice di suscettibilità da incendio boschivo invernale per il territorio di GESTI.S.CO, in scala 1:150.000 (formato A1);
- Tavola 6.2 – Carta di suscettibilità da incendio boschivo estivo per il territorio di GESTI.S.CO, in scala 1:150.000 (formato A1);
- Tavola 6.3 – Carta delle classi di suscettibilità da incendio boschivo invernale per il territorio di GESTI.S.CO, in scala 1:150.000 (formato A1);
- Tavola 6.4 – Carta di suscettibilità da incendio boschivo estivo per il territorio di GESTI.S.CO, in scala 1:150.000 (formato A1);
- Tavola 7.1 – Carta della mappatura speditiva della propensione allo scivolamento superficiale per il territorio di GESTI.S.CO, in scala 1:150.000 (formato A1);
- Tavola 8.1 – Fenomeni da crollo, carta di suscettibilità a distacco, in scala 1:150.000 (formato A1);
- Tavola 8.2 – Fenomeni da crollo, carta di suscettibilità a propagazione, in scala 1:150.000 (formato A1);

9.2. ALLEGATO 1: Elenco comuni rientranti nell'area di studio dell'attività del WP 3.3

Provincia di Como

1	Albiolo	13	Cerano d'Intelvi	25	Garzeno	37	Musso	49	San Nazzaro Val Cavargna
2	Alta Valle Intelvi	14	Cernobbio	26	Grandate	38	Olgiate Comasco	50	San Siro
3	Argegno	15	Claino con Osteno	27	Grandola ed Uniti	39	Pianello del Lario	51	Schignano
4	Bene Lario	16	Colonno	28	Gravedona ed Uniti	40	Pigra	52	Solbiate con Cagno
5	Bizzarone	17	Colverde	29	Griante	41	Plesio	53	Stazzona
6	Blessagno	18	Como	30	Laglio	42	Ponna	54	Tremezzina
7	Brienno	19	Corrido	31	Laino	43	Porlezza	55	Uggiate- Trevano
8	Campione d'Italia	20	Cremia	32	Luisago	44	Rodero	56	Val Rezzo
9	Carate Urio	21	Cusino	33	Maslianico	45	Ronago	57	Valmorea
10	Carlazzo	22	Dizzasco	34	Menaggio	46	Sala Comacina	58	Valsolda
11	Cavargna	23	Dongo	35	Moltrasio	47	San Bartolomeo Val Cavargna	59	Villa Guardia
12	Centro Valle Intelvi	24	Faloppio	36	Montano Lucino	48	San Fermo della Battaglia		



Provincia di Varese

1	Agra	21	Buguggiate	41	Cugliate-Fabiasco	61	Leggiano	81	Sangiano
2	Angera	22	Cadegliano-Viconago	42	Cunardo	62	Luino	82	Sesto Calende
3	Arcisate	23	Cadrezzate con Osmate	43	Curiglia con Monteviasco	63	Luvinate	83	Taino
4	Azzate	24	Cantello	44	Cuveglia	64	Maccagno con Pino e Veddasca	84	Ternate
5	Azzio	25	Caravate	45	Cuvio	65	Malgesso	85	Travedona-Monate
6	Barasso	26	Casale Litta	46	Daverio	66	Malnate	86	Tronzano Lago Maggiore
7	Bardello	27	Casalzuigno	47	Dumenza	67	Marchirolo	87	Valganna
8	Bedero Valcuvia	28	Casciago	48	Duno	68	Marzio	88	Varano Borghi
9	Besano	29	Cassano Valcuvia	49	Ferrera di Varese	69	Masciago Primo	89	Varese
10	Besozzo	30	Castello Cabiaglio	50	Galliate Lombardo	70	Mercallo	90	Vergiate
11	Biandronno	31	Castelveccana	51	Gavirate	71	Mesenzana	91	Viggiù
12	Bisuschio	32	Cazzago Brabbia	52	Gemonio	72	Montegrino Valtravaglia		
13	Bodio Lomnago	33	Cittiglio	53	Germignaga	73	Monvalle		
14	Brescia	34	Clivio	54	Golasecca	74	Mornago		
15	Bregano	35	Cocquio-Trevisago	55	Grantola	75	Orino		



16	Brenta	36	Comabbio	56	Inarzo	76	Porto Ceresio
17	Brezzo di Bedero	37	Comerio	57	Induno Olona	77	Porto Valtravaglia
18	Brinzio	38	Cremonaga	58	Ispra	78	Rancio Valcuvia
19	Brissago- Valtravaglia	39	Crosio della Valle	59	Lavena Ponte Tresa	79	Ranco
20	Brusimpiano	40	Cuasso al Monte	60	Laveno- Mombello	80	Saltrio



Canton Ticino

1	Agno	21	Canobbio	41	Isonne	61	Monteggio	81	Sessa
2	Alto Malcantone	22	Capriasca	42	Lamone	62	Morbio Inferiore	82	Sorengo
3	Aranno	23	Capriasca	43	Lavertezzo	63	Morcote	83	Stabio
4	Arbedo- Castione	24	Caslano	44	Locarno	64	Muralto	84	Tenero- Contra
5	Arogno	25	Castel San Pietro	45	Locarno	65	Muzzano	85	Tenero- Contra
6	Ascona	26	Chiasso	46	Lugano	66	Neggio	86	Toricella -Taverne
7	Astano	27	Coldrerio	47	Lumino	67	Novaggio	87	Vacallo
8	Balerna	28	Collina d'Oro	48	Magliaso	68	Novazzano	88	Vernate
9	Bedano	29	Comano	49	Manno	69	Origlio	89	Vezia
10	Bedigliora	30	Comunanza Cadenazzo/Montecene ri	50	Maroggia	70	Orselina	90	Vico Morcote
11	Bedigliora	31	Comunanza Capriasca/Lugano	51	Massagno	71	Paradiso		
12	Bellinzona	32	Croglio	52	Melano	72	Ponte Capriasca		
13	Bioggio	33	Cugnasco-Gerra	53	Melide	73	Ponte Capriasca		
14	Bissone	34	Cureglia	54	Mendrisio	74	Ponte Tresa		
15	Breggia	35	Curio	55	Mergoscia	75	Porza		
16	Brione sopra Minusio	36	Curio	56	Mezzovico- Vira	76	Pura		
17	Brusino Arsizio	37	Gambarogno	57	Mezzovico- Vira	77	Riva San Vitale		
18	Cademario	38	Gordola	58	Migliieglija	78	Rovio		

19	Cadempino	39	Grancia	59	Minusio	79	Sant'Antonin o
20	Cadenazzo	40	Gravesano	60	Montecener i	80	Savosa



Bibliografia

- Agterberg, F. P., Bonham-Carter, G. F., & Wright, D. F. (1990). Statistical pattern integration for mineral exploration. *Computer applications in resource estimation*, Pergamon, 1-21.
- ArpaPiemonte, ArpaLombardia, & Repubblica e Cantone Ticino, D. d. (2012). *La difesa dalle alluvioninel territorio alpino - Report conclusivo del progetto FLORA*.
- Beltraminelli, P., Kaufmann, P., & Wyler, E. (2002). *Curve d'intensità di pioggia per il Cantone Ticino*.
- Berger, A., Mercolli, I., & Engi, M. (2006). *Tectonic and Petrographic Map of the Central Lepontine Alps. Carta geologica speciale N°127, Swisstopo*.
- Bignami, D. F., Dragoni, A., & Menduni, G. (2018). Assessing and Improving Flood and Landslide Community Social Awareness and Engagement via a Web Platform: The Case of Italy. . *International Journal of Disaster Risk Science*, 9(4), , 530-540.
- Bonham-Carter, G., & al. (1988). Integration of Geological Datasets for Gold Exploration in Nova Scotia.
- Bouwer, M., Bubeck, P., & Aerts, J. C. (2010). Changes in future flood risk due to climate and development in a Dutch polder area. *Glob. Environ. Change* 20 (3), 463-471.
- Caine, N. (1980). The Rainfall Intensity: Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography* 62, p. 23.
- Carelli, M., Ceriani, M., & Valbuzzi, E. (2006). *INVENTARIO DEI FENOMENI FRANOSI IN LOMBARDIA: PROGETTO IFFI - Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia, 96 pp*. Tratto da http://www.cartografia.regione.lombardia.it/metadata/PROGETTO_IFFI/DOC/iffi_doc.pdf.
- Chapi, K., Singh, V. P., Shirzadi, A., Shahabi, H., Bui, D. T., Pham, B. T., & Khosravi, K. (2017). A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment. *Environmental Modelling & Software*, Volume 95.
- Chen, W., Hong, H., Li, S., Shahabi, H., Wang, Y., Wang, X., & Ahmad, B. B. (2019). Flood susceptibility modelling using novel hybrid approach of reduced-error pruning trees with bagging and random subspace ensembles. *Journal of Hydrology*, Volume 575, Pages 864-873.
- Choubin, B., Moradi, E., Golshan, M., Adamowski, J., Sajedi-Hosseini, F., & Mosavi, A. (2019). An ensemble prediction of flood susceptibility using multivariate discriminant analysis;

classification and regression trees; and support vector machines. *Science of The Total Environment, Volume 651; Part 2*, Pages 2087-2096.

- Cohen, D., & Schwarz, M. (2017). Tree-root control of shallow landslides. *Earth Surface Dynamics* 5.3, 451-477.
- Corominas, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Cn. Geotech. J.*, 33: 260-271.
- Corominas, J., & al. (2003). Integrated Landslide Susceptibility Analysis and Hazard Assessment in the Principality of Andorra.
- Costa, J. E. (1984). Physical Geomorphology of Debris Flows. *Developments and applications of geomorphology.*, p. 268–317.
- Crosta, G. (1998). Regionalization of rainfall threshold: an aid to landslides hazard evaluation.
- Crosta, G. B., & Frattini, P. (2003). Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3(1/2), 81-93., 81-93.
- Crosta, G., & F., A. (2004). Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories. *Natural Hazards Earth Systems Science*, 4: 583-598.
- Crosta, G., & Frattini, P. (2002). Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow.
- De Moel, H., Alphen, J. v., & Aerts, J. C. (2009). Flood maps in Europe – methods, availability and use. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, , 289–301.
- Di Baldassarre, G., Schumann, G. J., & Bates, P. D. (2009). Near real time satellite imagery to support and verify timely food modelling. *Hydrol. Process.*, 23, 799-803.
- Dingman, S. L. (1978). Drainage Density and Streamflow: A Closer Look.
- Diozzi, I. (2018). *Proposta metodologica per l'analisi di suscettibilità da alluvione in aree non coperte da pianificazione di bacino: il caso del territorio pugliese.*
- D'Odorico, P., & Fagherazzi, S. (2003). *A probabilistic model of rainfall-triggered shallow landslides in hollows: A long-term analysis.*
- Domeneghetti, A., Carisi, F., Castellarin, A., & Brath, A. (2015). Evolution of Flood Risk Over Large Areas: Quantitative Assessment for The Po River. *J. Hydrol.*, 527, 809-823.
- Dorren, L., Berger, F., & le Hir, C. (2005). Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. *Forest Ecology and Management*, 215: 183-195.



- Evans, S., & Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*.
- Fasciani, C., & Mastroieni, M. (2020). *Analisi di suscettività da incendio boschivo: un caso di studio in area transfrontaliera*.
- Fenicia, F., Kavetski, D., Savenije, H., Clark, M., Schoups, G., Pfister, L., & Freer, J. (2013). Catchment properties, function, and conceptual model representation: is there a correspondence? *Hydrol. Process*.
- Ghobadi, J. G., Gholizadeh, B., & Dashliburun, O. M. (2012). Forest fire riskzone mapping from geographic information system in Northern Forests of Iran(Case study, Golestan province. *International Journal of Agriculture and Cop Sciences*.
- Greco, S., Girvetz, E., Larsen, E., Mann, J., Tuil, J., & Lowney, C. (2008). Relative Elevation Topographic Surface Modelling of a Large Alluvial River Floodplain and Applications for the Study and Management of Riparian Landscapes. *Landscape Research*. 33. , 461-486.
- Greenlee, D. D. (1987). Raster and Vector Processing for Scanned Linework. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*.
- Guzzetti, F., & al. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorol. Atmos. Phys.* 98 (3-4), 239–267.
- Hagemeyer-Klose, M., & Wagner, K. (2009). Evaluation of flood hazard maps in print and web mapping services as information tools in flood risk communication. . *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 9(2).
- Hanley, D. E., Cunningham, P., & Goodrick, S. L. (2013). Interaction between a Wildfire and the Sea-Breeze Front. In J. J. Qu, W. T. Sommers, & R. R. Yang, *Remote Sensing and Modeling Applications to Wildland Fires*. Springer.
- Heim, A. (1932). Bergsturz und Menschenleben. Beiblatt zur Vierteljahrschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zü-rich.
- Holmgren, P. (1994). Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: an empirical evaluation. *Hydrologic Process*.

- Horrit, M. S. (2000). Calibration and validation of a two-dimensional finite element flood flow model using satellite radar imagery. *Water Resour. Res.*, *36*(11), 3279–3291.
- Horritt, M. S., & Bates, P. D. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *J. Hydrol. (Amsterdam)*, *268*(1–4), 87–99.
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B., & Zimmermann, M. (2013). Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural Hazard Earth System Science*. doi:10.5194/nhess-13-869-2013
- Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura. (2003). *GUIDA alla classificazione della vegetazione forestale*.
- Jaboyedoff, M., & Labiouse, V. (2011). Technical Note: Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Natural Hazard Earth System Science*.
- Jaboyedoff, M., Pedrazzini, A., & Horton, P. (2008). Preliminary Slope Mass Movements Susceptibility using LiDAR DEM. *In Proceedings of the 2008 Geohazards Conference, Edmonton, Canada*.
- Keane, R. E., Drury, S. A., Karau, E. C., Hessburg, P. F., & Reynolds, K. M. (2010). A method for mapping fire hazard and risk across multiple scales and its application in fire management. *Ecological Modelling*.
- Lamovec, P., Veljanovski, T., Mikoš, M., & Oštir, K. (2013). Detecting flooded areas with machine learning techniques: case study of the Selška Sora river flash flood in September 2007. *J. Appl. Rem. Sens*, 073564–073564.
- Lee, S., Jaewon, C., & Kyungduck, M. (2002). Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model. *Environmental Geology*.
- Lee, S., Tehrany, M., & Pradhan, M. (2014). Flood susceptibility mapping using integrated bivariate and multivariate statistical models. *Environmental Earth Sciences* *72*(10), 1-15.
- Lettera, V. (2019). I laghi regolati all'incile. *RGA online*, *6*.
- Manfreda, S., Samela, C., Gioia, A., Consoli, G. G., Iacobellis, V., Giuzio, L., & Sole, A. (2015). Flood-prone areas assessment using linear binary classifiers based on flood maps obtained from 1D and 2D hydraulic models. *Natural Hazards*, *79*(2), 735-754.
- Marchetti, M., Bertami, R., & Scatarzi, I. (2007). Zonizzazione del territorio italiano in funzione del rischio di incendio.

- Martignier, L. (2017). Influence des formations superficielles sur l'évolution des sols du Jura Suisse: origines, composition et transformation minéral parental. *Mémoire de la SVSN*.
- Megahan, W. F. (1983). Hydrologic effects of clearcutting and wildfire on steep granitic slopes in Idaho. *Water Resources Research*, 19(3), 811-819.
- Merwade, V., Olivera, F., Arabi, M., & Edleman, S. (2008). Uncertainty in flood inundation mapping: current issues and future directions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(7), 608-620.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., & Thieken, A. .. (2010). Review article" Assessment of economic flood damage". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(8), 1697-1724.
- Michoud, C., & Horton, P. (2015). Cartographie des périmètres indicatifs d'atteinte de dangers naturels dans les Préalpes fribourgeoises. *Rapport technique pour la Commission des Dangers Naturels du canton de Fribourg*.
- Michoud, C., & Horton, P. (2018). ouvelles cartes indicatives de dangers de chutes de blocs, laves torrentielles et glissements superficiels spontanés sur le canton de Vaud. *Rapport technique pour l'Unité des Dangers Naturels du canton de Vaud*.
- Michoud, C., Derron, M., & Horton, P. (2012). Rockfall hazard and risk assessments along roads at a regional scale: example in Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*.
- Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2003). SCS-CN Method. In *Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology* (p. 84-146). Dordrecht.: Springer.
- Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1994). *A physically based model for the topographic control on shallow landsliding*.
- Moser, M., & Hohensinn, F. (1983). Geotechnical aspects of soil slips in alpine regions.
- Neuhäuser, B., & Terhorst, B. (2007). Landslide susceptibility assessment using "weights-of-evidence" applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany). *Geomorphology*, p. 12-24.
- Pal, S., & Roy, P. (2020). Threats of climate and land use change on future flood susceptibility. *Journal of Cleaner Production Volume 272*.
- Pezzatti, G. B., Reinhard, M., & Conedera, M. (2010). Swissfire: the new Swiss forest fire database. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*.

- Pourtaghi, Z. S., Pourghasemi, H. R., Aretano, R., & Semeraro, R. (2016). A method for mapping fire hazard and risk across multiple scales and its application in fire management. *Ecological Indicators*.
- Pradhan, B. (2010). Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing. *J. Spatial Hydrol.*, 9, 1-18.
- Pradhan, B. (2011). Use of GIS-based fuzzy logic relations and its cross application to produce landslide susceptibility maps in three test areas in Malaysia. *Environ. Earth Sci.*, 329-349.
- Pradhan, B., & Buchroithner, M. (2010). Comparison and validation of landslide susceptibility maps using an artificial neural network model for three test areas in Malaysia. *Environ. Eng. Geosci.*, 16, 107-126.
- Preiswerk, H., Bossard, L., Grütter, O., Niggli, P., Kündig, E., Ambühl, E., & et al. (1934). *Carta geologica delle Alpi ticinesi fra Valle Maggia e Val Blenio. Carta Speciale N°116, Swisstopo.*
- Provincia Autonoma di Trento, S. f. (2010). *Piano per la difesa dei boschi dagli incendi.*
- Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Zeinivand, H. (2016). Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. *Geocarto International*, 31(1), 42-70.
- Regione Lombardia. (2017, 03 20). *Inventario fenomeni franosi Lombardia (IFFI)*. Tratto da Metadati - Geoportale della Lombardia: https://www.geoportale.regione.lombardia.it/metadati?p_p_id=detailSheetMetadata_WAR_gptmetadataportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&_detailSheetMetadata_WAR_gptmetadataportlet_uuid=%7B1D4AAE9F-EB7B-4E3E-AB8A-EE29A2211593%7D#
- Regione Lombardia. (2020). *Piano regionale delle attività di previsione, prevenzione e lotta attiva contro gli incendi boschivi 2020-2022.*
- Regione Lombardia, D. G. (2016). *Piano di gestione del rischio di alluvioni Sezione B.*
- Ricotta, C., Bajocco, S., Guglietta, D., & Conedera, M. (2018, giugno 9). Assessing the Influence of Roads on Fire Ignition: Does Land Cover Matter? *Fire*.
- Ritchie, A. (1963). Evaluation of Rockfall and its Control. *Report for the Committee on Landslide Investigations.*



- Romero-Calcerrada, R., Novillo, C., Millington, J., & Gómez Jiménez, I. (2008). GIS analysis of spatial patterns of human-caused wildfire ignition risk in the SW of Madrid (Central Spain). *Landscape Ecology* 23, p. 341-354.
- Rosso, R., Rulli, M. C., & Vannucchi, G. (2006). A physically based model for the hydrologic control on shallow landsliding.
- Samela, C., Manfreda, S., Paola, F. D., Giugni, M., Sole, A., & Fiorentino, M. (2015). DEM-based approaches for the delineation of flood-prone areas in an ungauged basin in Africa. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21(2), 06015010.
- Samela, C., Troy, T. J., & Manfreda, S. (2017). Geomorphic classifiers for flood-prone areas delineation for data-scarce environments. *Advances in water resources*, 2017, 102, 13-28.
- Saulnier, G.-M., Beven, K., & Obled, C. (1997). Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL.
- Scapozza, C. (2017). *Analisi storica delle frane superficiali nel bacino del Cassarate*. ITS-SUPSI.
- Scheidegger, A. (1973). On the Prediction of the Reach and Velocity of Catastrophic Landslides. *Rock Mechanics*.
- Schmidt, K. M., Roering, J. J., Stock, J. D., Dietrich, W. E., Montgomery, D. R., & Shaub, T. (2001). *Root cohesion variability and shallow landslides susceptibility in the Oregon Coast Range*.
- Smith, k., & Ward, R. (1988). *Floods: Physical Processes and Human Impacts*. Chichester: Wiley.
- Tehrany, M., Pradhan, B., & Jebur, M. (2013). Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *J. Hydrol.*, 504, 69-79.
- Tehrany, M., Pradhan, B., & Jebur, M. (2014). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS.
- Terranum. (2019). *Carte di Suscettibilità relative ai processi di crollo, scivolamenti spontanei e ai flussi di detrito sulle zone test Leventina, Bellinzona e Malcantone*.
- Toppe, R. (1987). Terrain models – a tool for natural hazard mapping.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes.
- Varnes, D., & IAEG, C. o.-M. (1984). Landslide Hazard Zonation: a Review of Principles and Practice. The UNESCO Press, Paris, 63 pp. *The UNESCO Press, Paris*, 63 pp.

- Werner, M. G., Hunter, N. M., & Bates, P. D. (2005). Identifiability of distributed floodplain roughness values in flood extent estimation. *J. Hydrol. (Amsterdam)*, 314(1–4), 139–157.
- Yalcin, A. (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. *Catena*, 1-12.
- Zhao, G., Pang, B., Xu, Z., Yue, J., & Tu, T. (2018). Mapping flood susceptibility in mountainous areas on a national scale in China. *Science of The Total Environment, Volume 615*, Pages 1133-1142.