

CONVEGNO PROGETTARE I TERRITORI TRA RISCHIO E VALORIZZAZIONE

Sotto la superficie del dissesto: acque sotterranee, permeabilità ed eventi di piena

«Per capire il dissesto che vediamo, dobbiamo guardare ai processi che non vediamo»



HydroGEO Team

Stefania Da Pelo
sdapelo@unica.it



UNICA

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI CAGLIARI

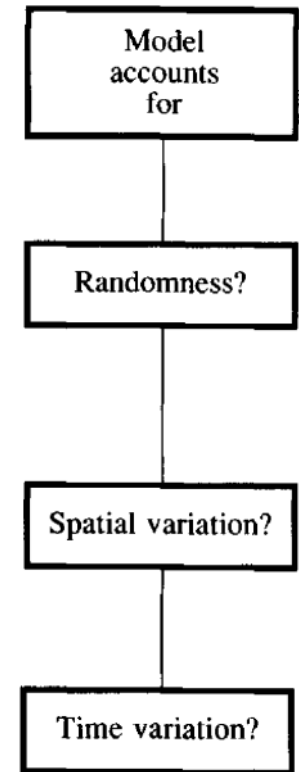
DSCG
DIPARTIMENTO
DI SCIENZE
CHIMICHE E
GEOLOGICHE

Perché parlare di insaturo e acque sotterranee in un convegno sulle alluvioni?

- PAI e PGRA regionale: strumenti necessari e consolidati per pericolosità da piena e frana.
- La maggior parte degli approcci metodologici si basano prevalentemente su:
 - pioggia,
 - idrogrammi,
 - modellazione idraulica 1D/2D.

Obiettivi dell'intervento

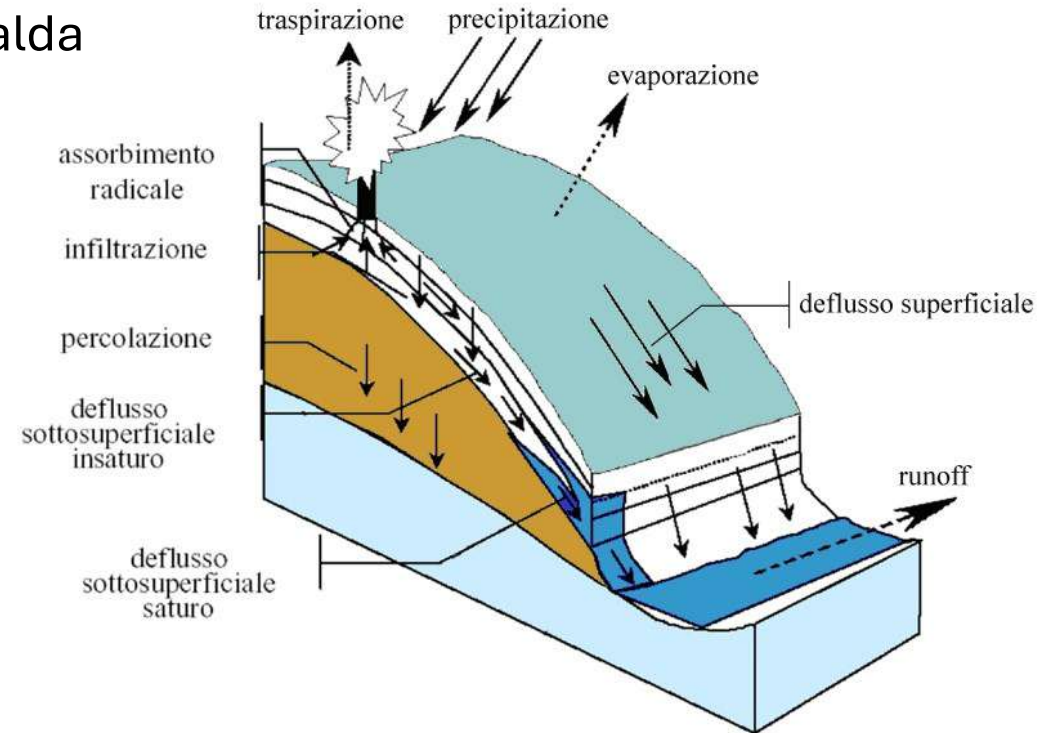
- mostrare che suoli, insaturo e falda governano eventi di piena, frane superficiali e trasporto solido;
- discutere modelli, vantaggi/limiti, incertezze;
- proporre come integrare le acque sotterranee in bacini strategici/vulnerabili.



Ven Te Chow et al., 1998

Dove va a finire la pioggia?

- stoccaggio nel suolo e nel sottosuolo (zona insatura + falda superficiale);
- deflusso superficiale (saturation-excess, Hortoniano);
- flusso sotterraneo rapido (subsurface stormflow, bank storage).



credits L. Piacenti

I fondamenti teorici

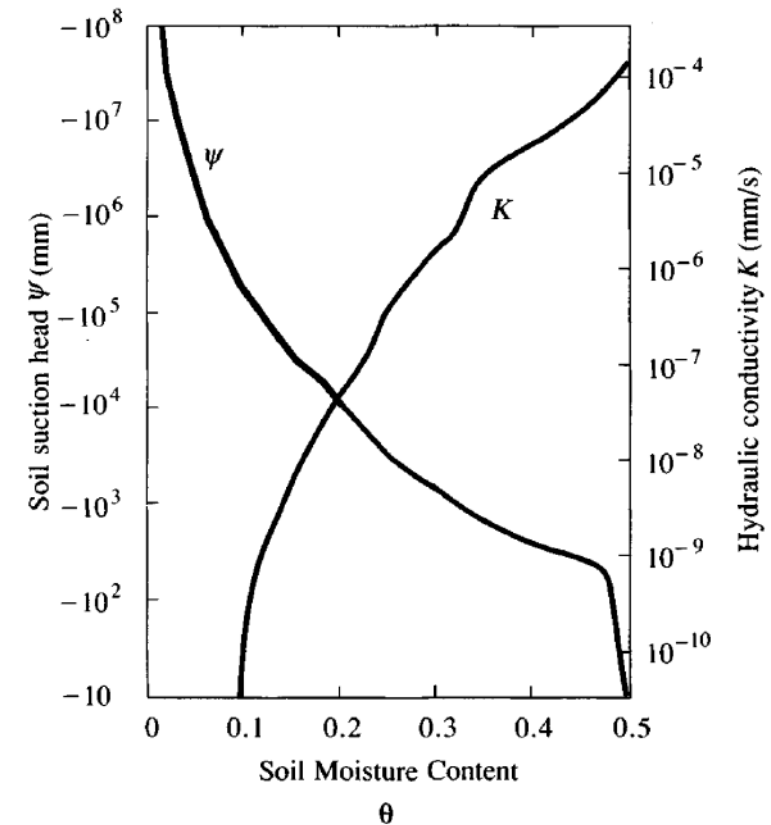
Equazione di Richards

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \text{ 1D semplificata - } z \text{ positivo verso l'alto}$$

la velocità con cui cambia il contenuto d'acqua lungo il profilo del suolo è determinata da come varia verticalmente il flusso d'acqua, e questo flusso dipende:

- dal potenziale (pressione + gravità)
- dal fatto che K cambia con θ (più il suolo è umido, più K è alta; se è secco, K diminuisce).

In pratica, è l'equazione che governa il “filling–storing–draining” nel profilo insaturo: determina come e in quanto tempo la pioggia riempie lo stoccaggio nel suolo, lo svuota e lo trasmette alla falda e al reticolo idrografico.



Raudkivi, 1979

I fondamenti teorici

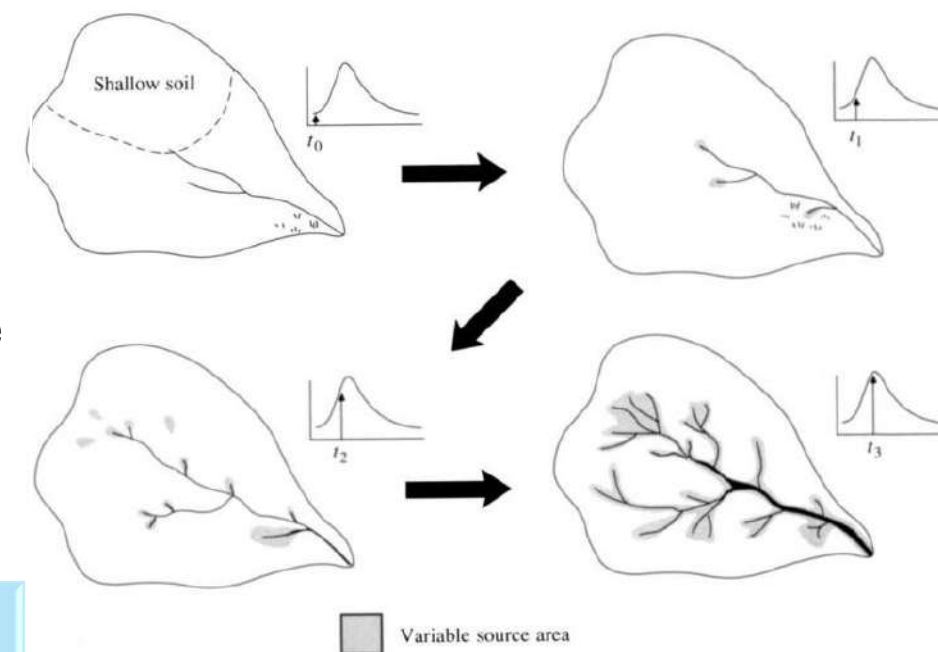
Deflusso superficiale: Horton vs Dunne

Hortoniano (infiltration-excess)

- intensità di pioggia > capacità infiltrativa superficiale;
- tipico di superfici compattate, aree urbanizzate

Dunne (saturation-excess)

- suolo già saturo e/o superficie freatica sub-affiorante → qualsiasi pioggia in più genera runoff;
- source area variabile: la zona che genera deflusso si espande e si restringe a seconda di pioggia e stato antecedente



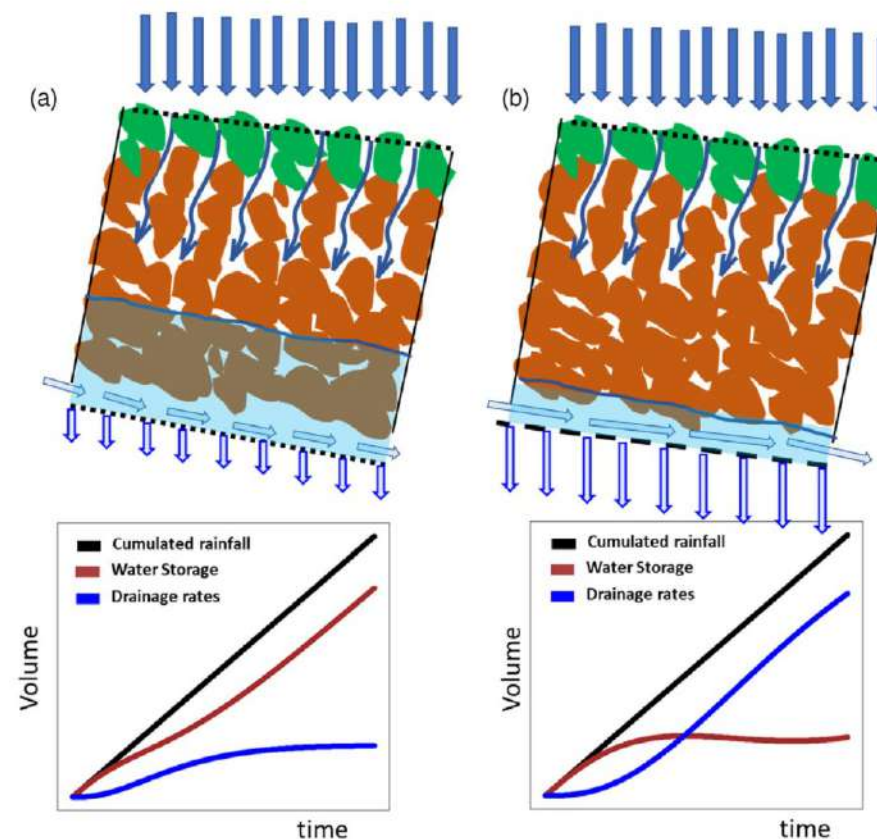
L'innescò del deflusso superficiale dipende tanto da K e stato di saturazione, quanto dalla pioggia in sé.

La stessa pioggia può produrre piene molto diverse a seconda di quanto il sistema era saturo/umido prima

Hewlett, 1982

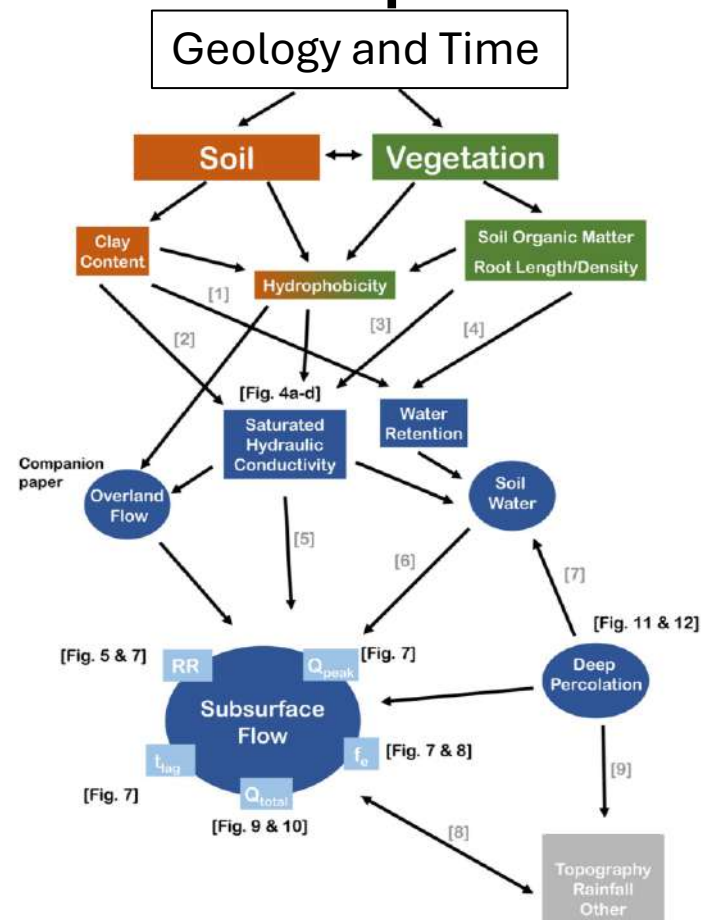
Dal sottosuolo alla piena: il ruolo invisibile di K e dell'immagazzinamento

- La permeabilità (K) e la capacità di immagazzinamento del suolo controllano quanta pioggia viene assorbita e quanta diventa deflusso rapido.
- Quando lo stock insaturo è quasi pieno, piccole variazioni di intensità di pioggia superano la soglia di innesco del deflusso.
- Oltre una certa combinazione di pioggia e saturazione antecedente, la pioggia non aumenta più lo stoccaggio ma si trasforma in deflusso rapido superficiale e sotterraneo.



Greco et al. 2022

Soglie di piena: non conta solo “quanta pioggia”, ma “su quale suolo”



Maier et al., 2022 - Modificato

- A parità di evento, un bacino con suoli più permeabili e più capaci di immagazzinare acqua genera colmi più bassi e ritardati.
- Suoli poco permeabili o già saturi raggiungono prima la soglia: la stessa pioggia produce piene più rapide e più intense.
- Le soglie pioggia + stato di saturazione sono quindi una proprietà del sistema suolo-falda, non solo del clima o delle condizioni meteo.

Dalla piena al dissesto



- La combinazione K + stoccaggio → soglia di piena determina quanta energia ha il sistema fluviale durante l'evento.
- Piene più concentrate e con colmi elevati aumentano erosione di versante, incisione d'alveo, instabilità di sponde e argini.
- Capire come il sottosuolo controlla le piene significa migliorare anche la stima del trasporto solido e del dissesto idrogeologico complessivo.

Le frane: un problema idrologico?



- Concetto di filling–storing–draining esteso al versante.
- Permeabilità, capacità di stoccaggio e condizioni antecedenti governano:
 - sovrappressioni nella zona di taglio;
 - tempi di risposta del versante

Gli stessi parametri che determinano se, per un evento di pioggia si verificherà una piena, determinano anche se un versante è vicino o lontano dall'innescare di frana



Importanza dell'assetto geologico

Dal processo ai modelli: modelli e metodi nei piani della Regione Sardegna (PAI, PSFF, PGRA)

Fase

Strumento / Modello

Analisi idrologica

serie storiche di precipitazione e portata
stima delle piene di progetto (curve di possibilità pluviometrica,
metodi afflusso–deflusso)

Modellazione idraulica fluviale

codice HEC-RAS (USACE) come modello idraulico di riferimento
per: Piano Stralcio Fasce Fluviali (PSFF), componente fluviale del
PAI, PGRA (mappe di pericolosità/alluvione)

Sperimentazioni operative

la Protezione Civile regionale ha testato in via sperimentale la
piattaforma MIKE 11 (valutazione di funzioni e limiti)

La scelta di HEC-RAS ha garantito una base omogenea e consolidata per la pericolosità idraulica regionale. Questo approccio è necessario e irrinunciabile per la pianificazione, ma molta fisica del sottosuolo viene compressa in pochi parametri*. Su questa base è possibile innestare, dove serve, informazioni geologiche più dettagliate su suoli, insaturo e acque sotterranee.

*eventuali perdite per infiltrazione in *rain-on-grid mode* (Curve Number / Green–Ampt ecc.).

Punti di forza e margini di miglioramento

Punti di forza

- descrizione dettagliata di livelli idrici, velocità e aree allagate per diversi tempi di ritorno
- coerenza metodologica su tutta la regione, utile per PAI e PGRA
- strumenti collaudati, con tempi di calcolo compatibili con la scala di piano

Aree da migliorare

- i modelli idraulici standard descrivono la risposta del bacino alla pioggia con parametri “medi” e non integrano i dati “geologici”, in quanto gli input chiave sono:
 - idrogrammi in ingresso (portate nel tempo);
 - geometria dell'alveo/piana (sezioni, DTM);
 - coefficienti di scabrezza (Manning n).

Cambiare il modello idraulico? Non necessariamente. Su aree critiche, però, si può migliorare la rappresentazione dei processi di infiltrazione, stoccaggio nel suolo e interazione fiume-falda nella catena di modellazione che porta ai risultati di HEC-RAS. Questo si può fare usando, a monte, modelli che integrano le proprietà dei suoli e delle acque sotterranee, e parametrizzando le perdite/infiltrazioni in modo coerente con i dati geologici, idrogeologici e geotecnici disponibili.

Strumenti conoscitivi a basso costo

➤ Indagini geotecniche (SPT, CPT/CPTu):

- permettono di ricavare stratigrafia idraulica e $K(z)$ (Monforte et al. 2018; Seo et al., 2025) lungo i corsi d'acqua
- già disponibili per ponti, strade, argini, infrastrutture;

➤ Carte geologiche e idrogeologiche, pozzi e sorgenti:

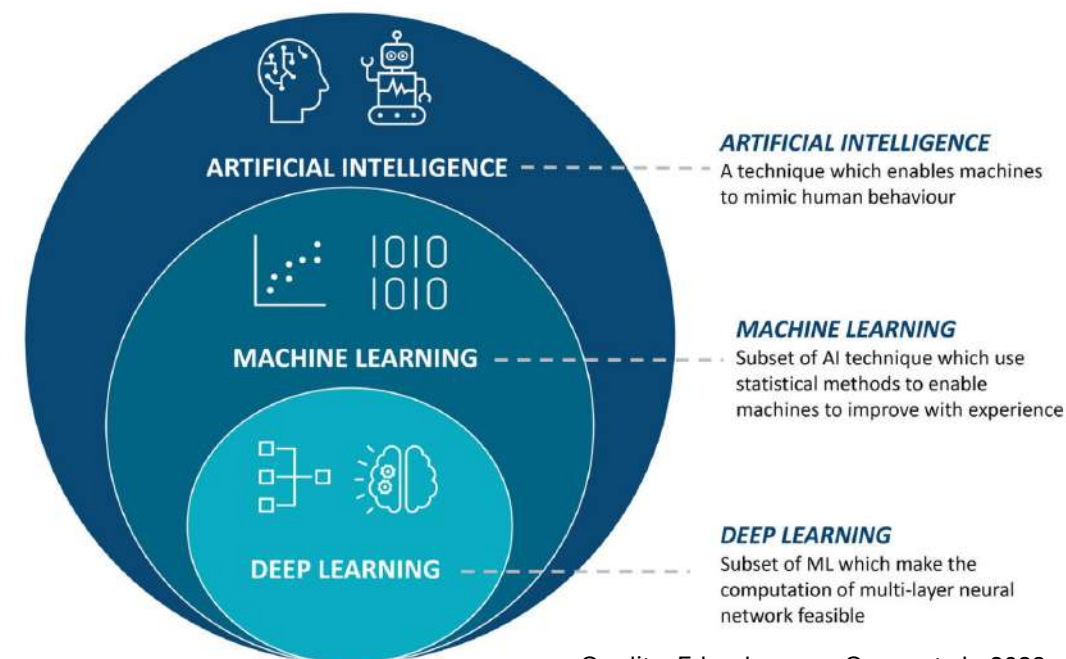
- profondità della falda, contatti litologici.

➤ Reti di monitoraggio

- piezometri, sorgenti misurate, serie di baseflow e dati idrometrici.

➤ Dati da telerilevamento

- umidità del suolo, uso del suolo.



Credits: Edureka.com, Greco et al., 2023

Strategico archiviare e usare meglio i dati che già produciamo per altri scopi

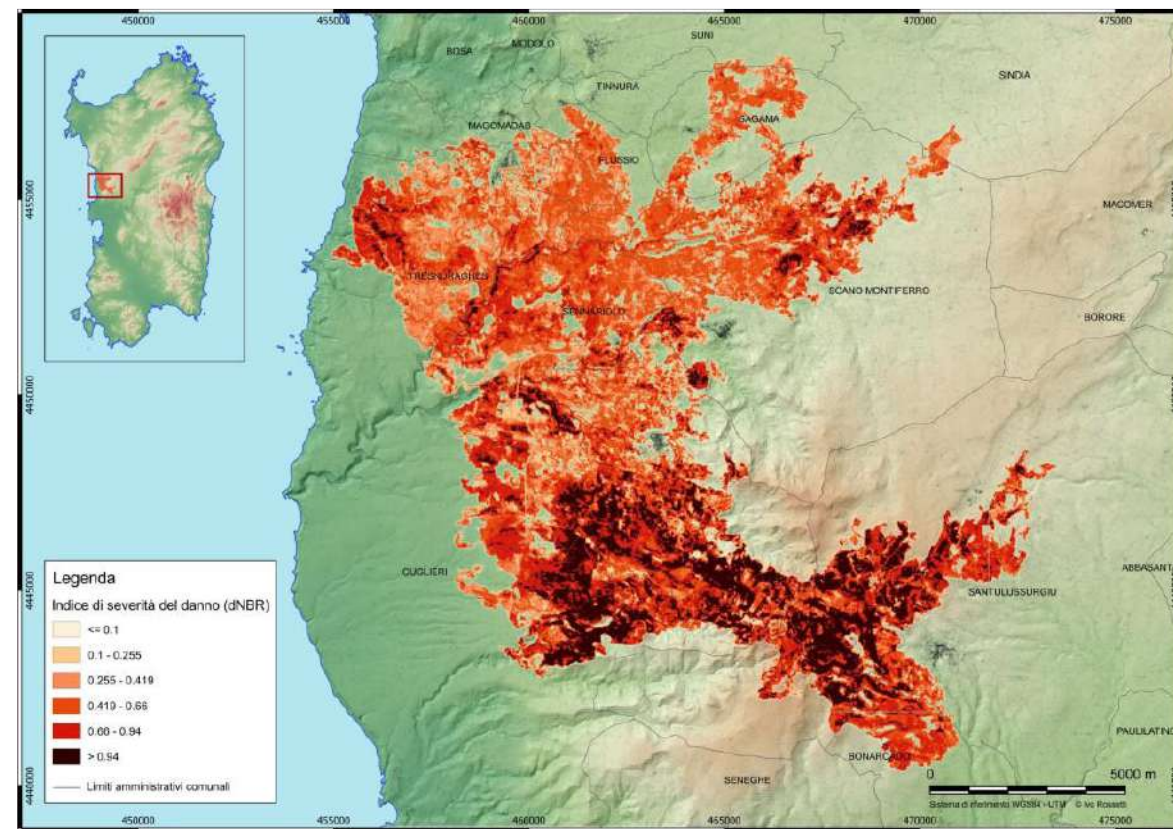
Sotto la superficie...: il caso del Montiferru

- 23 – 28 luglio 2021 → 12235 ettari di bosco del Montiferru bruciati
- Territori amministrativi di dodici comuni: Bonarcado, Cuglieri, Flussio, Magomadas, Sagama, Santu Lussurgiu, Scano di Montiferru, Sennariolo, Sindia, Suni, Tinnura e Tresnuraghes.
- Indice di severità più alto: Santu Lussurgiu e Cuglieri

Obiettivo:

Valutare l'effetto che gli incendi boschivi possano avere sulla stabilità dei versanti e sulle caratteristiche idrauliche dei bacini

NO PERIMETRAZIONE PERICOLOSITA'



Carta degli indici di severità delle aree percorse dal fuoco (Rossetti I., 2021)

Evidenze geomorfologiche del dissesto

Inizio Novembre 2021 →

- importante evento di piogge intense
- incremento instabilità dei versanti
- crolli lungo la SP15, località Sos Molinos.



Evidenze geomorfologiche del dissesto



Campionamento



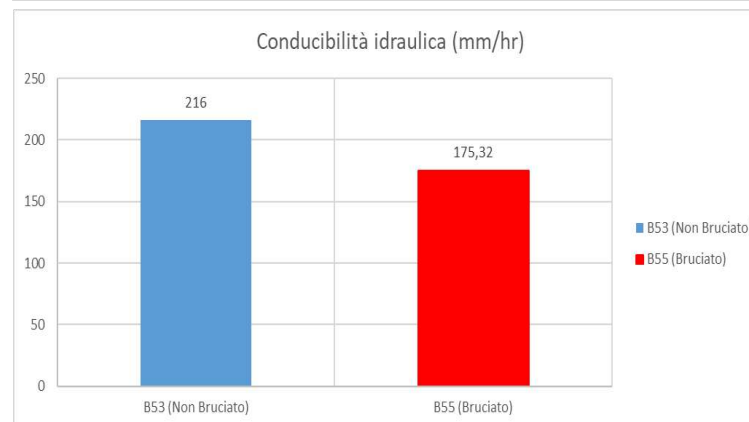
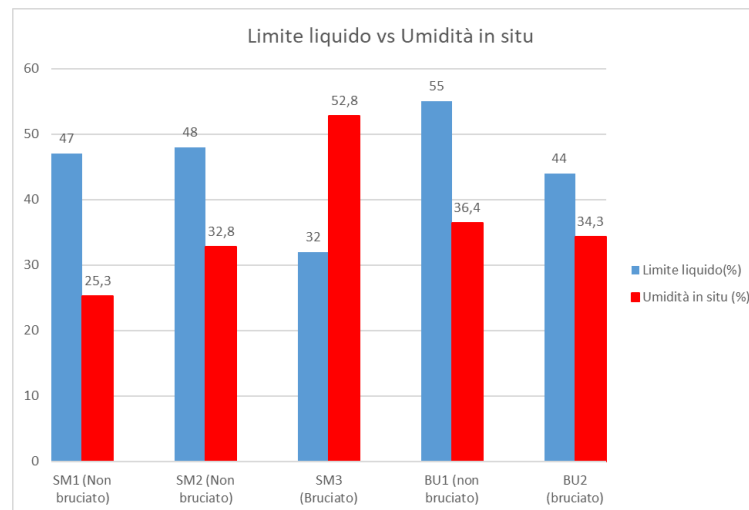
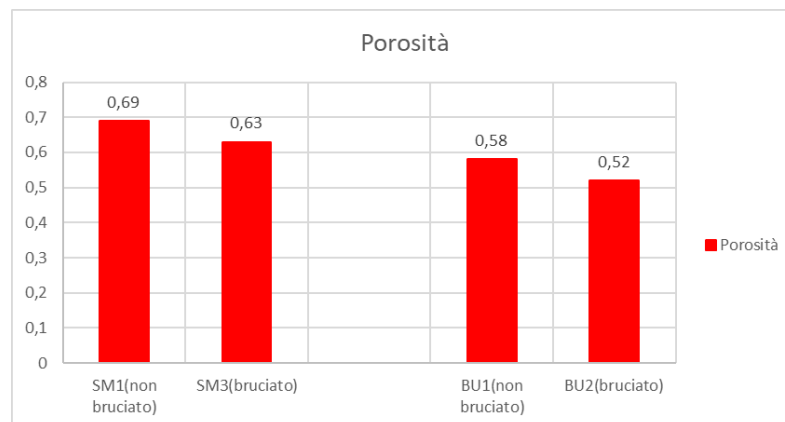
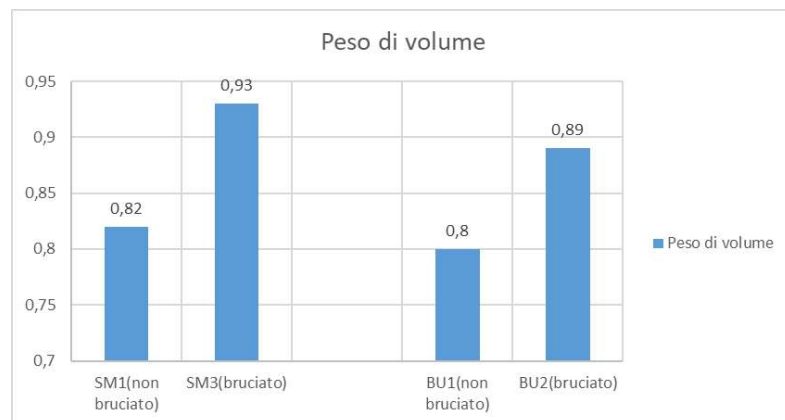
Determinazione delle proprietà fisico-meccaniche e idrologiche dei suoli



Sono stati determinati il peso di volume (umido e secco), peso specifico dei grani, porosità, limiti di Atterberg, resistenza al taglio, Ksat in situ



Risultati



Nei suoli interessati dagli incendi si registra un incremento dei fini, una diminuzione di K, una diminuzione del WL, e una diminuzione della porosità. Questi dati sono confermati da Esposito et al., 2025 che osservano un rapido incremento del SSM dopo piogge modeste, in proporzione al periodo pre incendio.

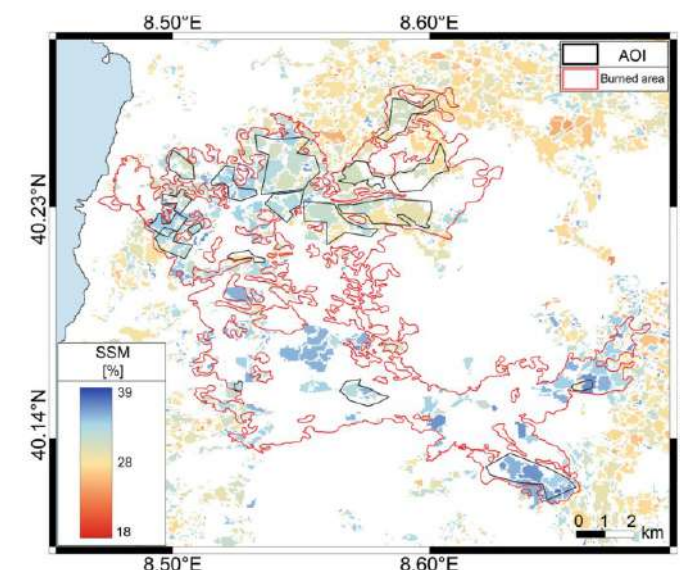
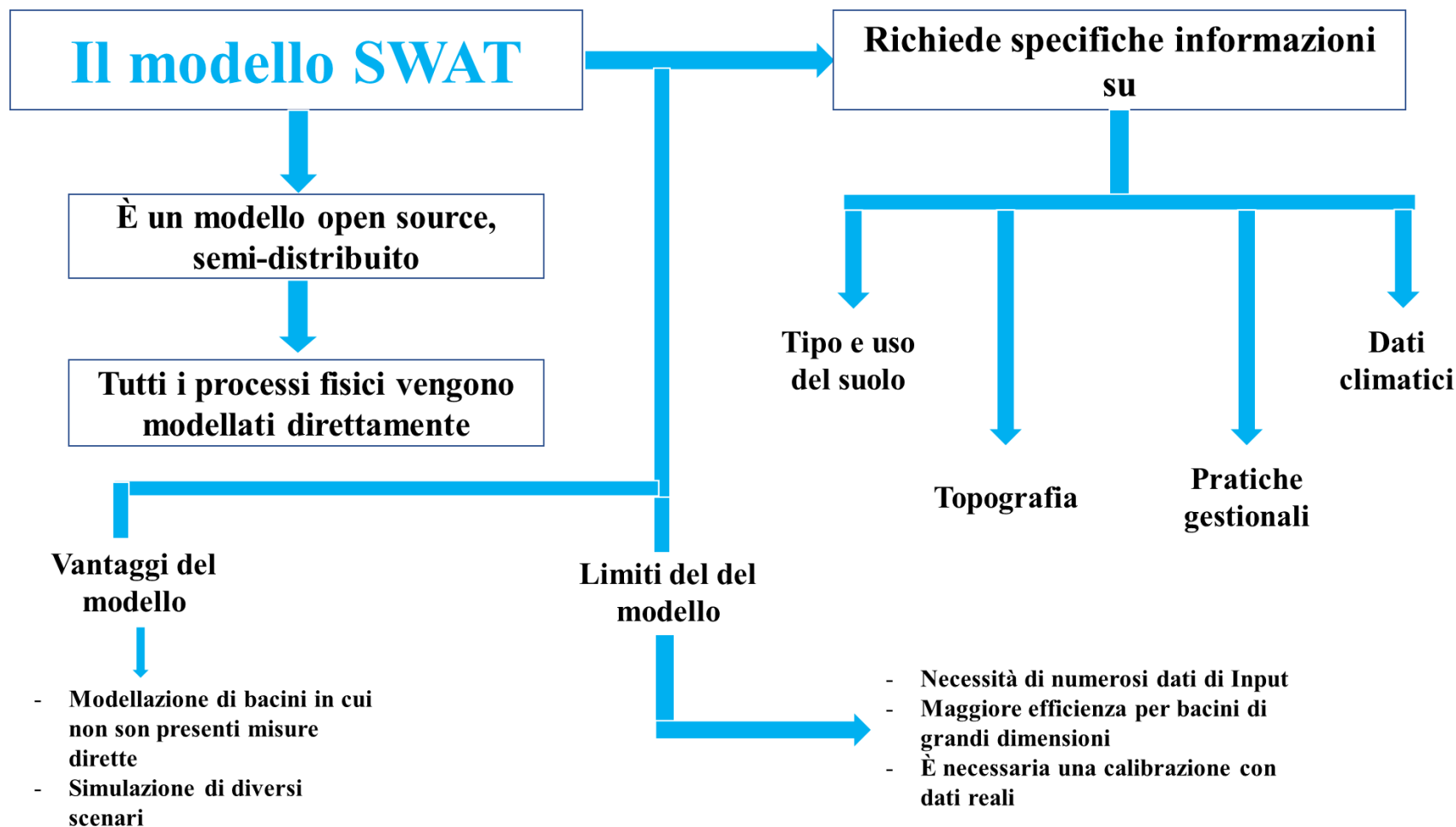


Fig. 11. Map of the SSM Theia of December 27, 2021. Coordinates in WGS84 (EPSG:4326).

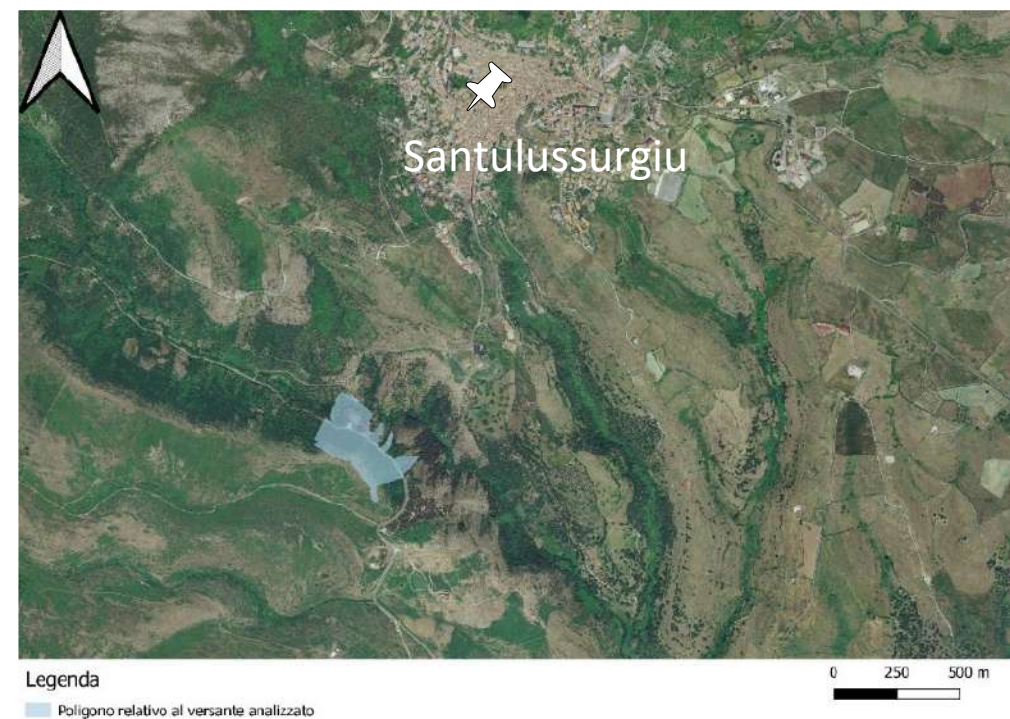
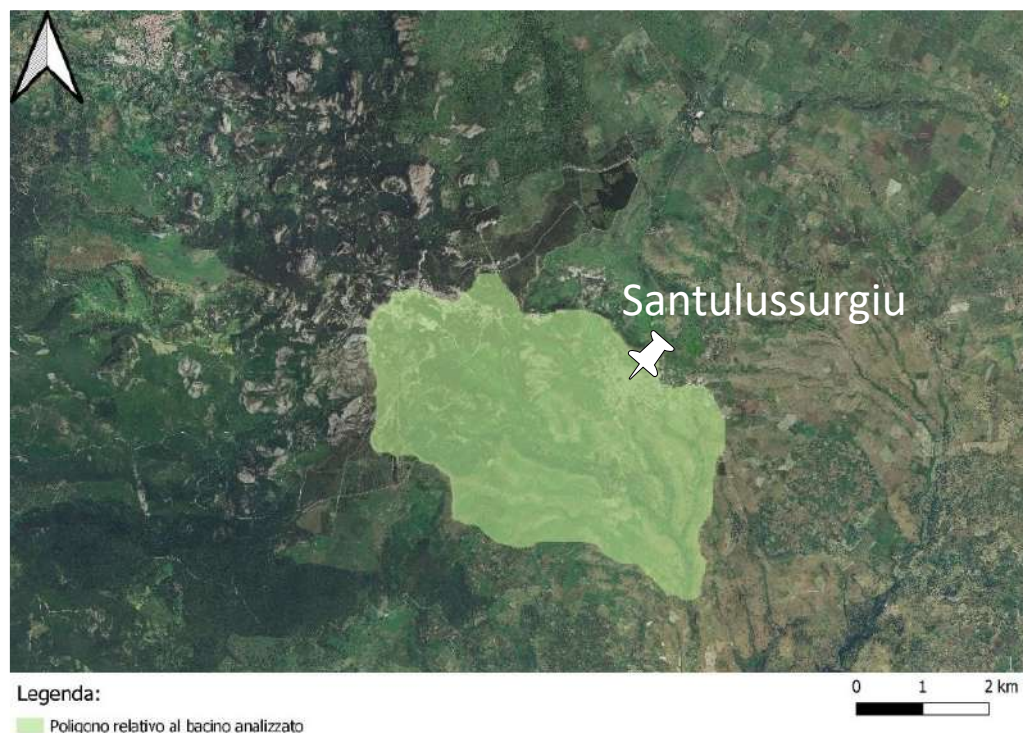
Esposito et al., 2025

Applicazione del modello numerico



Impostazione degli scenari

- Le simulazioni sono state sviluppate **sia a scala di bacino che a scala di versante**, definendo uno scenario **pre** e uno scenario **post-incendio**.
- in accordo con gli studi analizzati (*Tomy & Suman, 2016*) si è scelto di utilizzare i dati climatici simulati dal CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) per l'intero periodo di simulazione che va dal 2000 al 2022. Questo perché, questi dati, risultano essere di maggiore affidabilità per aree poco vaste in quanto sono sviluppati a partire da dati meteorologici che sono effettivamente mediati su scale spaziali.



Il modello a scala di bacino e di versante

| SNAM | HYDGR P | SOL_ZMX | SOL_Z1 | SOL_BD1 | SOL_AW C | SOL _K | SOL_C BN | CLAY | SILT | SAND | ROCK | USLE_ K |
|------|------------|---------|--------|---------|-------------|-----------|-------------|------|-------|-------|-------|------------|
| SSP | B | 1000 | 1000 | 0.9 | 0.17 | 180 | 6.73 | 1.88 | 66.41 | 31.70 | 41.51 | 0.150 |
| BSP | B | 1000 | 1000 | 0.94 | 0.13 | 165 | 9.60 | 1.23 | 40.99 | 57.77 | 36.82 | 0.148 |
| DVO | C | 1000 | 1000 | 1.3 | 0.116 | 38.5 | 5.5 | 0.91 | 36.17 | 62.9 | 49.05 | 0.298 |
| DCO | C | 1524 | 228.6 | 1.05 | 0.11 | 35 | 0 | 7 | 58.99 | 34.01 | 40 | 0.2 |
| ARO | D | 1651 | 304.8 | 0.3 | 0.35 | 35 | 9.88 | 10 | 45 | 45 | 0 | 0.1 |

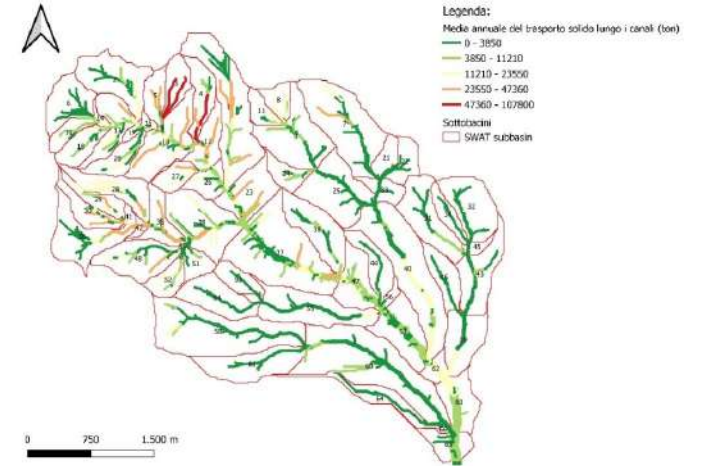
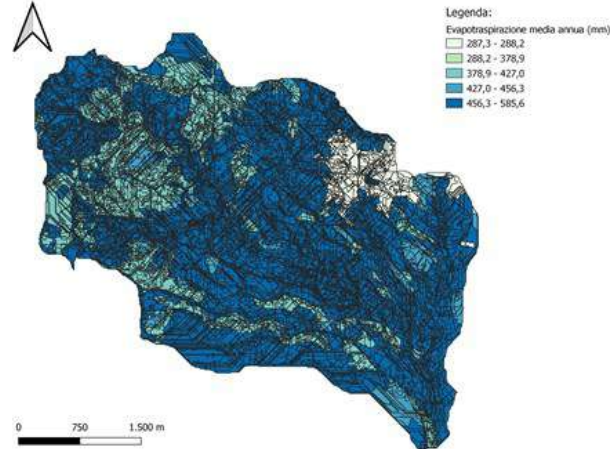
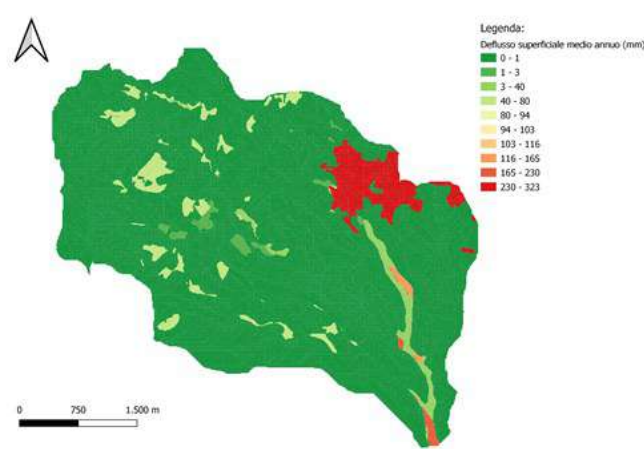
Il modello a scala di bacino e di versante

| LULC description | Runoff Curve Numbers | | | |
|------------------------------------------|----------------------|----|----|-----|
| | A | B | C | D |
| Post-Fire Evergreen Forest High Burn | 40 | 70 | 85 | 92 |
| Post-Fire Mixed Forest High Burn | 51 | 75 | 88 | 94 |
| Post-Fire Shrub land High Burn | 54 | 76 | 89 | 95 |
| Post-Fire Grassland High Burn | 64 | 84 | 94 | 99 |
| Post-Fire Agriculture High Burn | 82 | 92 | 98 | 102 |
| Post-Fire Evergreen Forest Moderate Burn | 35 | 65 | 80 | 87 |
| Post-Fire Mixed Forest Moderate Burn | 46 | 70 | 83 | 89 |
| Post-Fire Shrub land Moderate Burn | 49 | 71 | 84 | 90 |
| Post-Fire Grassland Moderate Burn | 59 | 79 | 89 | 94 |
| Post-Fire Agriculture Moderate Burn | 77 | 87 | 93 | 97 |
| Post-Fire Evergreen Forest Low Burn | 30 | 60 | 75 | 82 |
| Post-Fire Mixed Forest Low Burn | 41 | 65 | 78 | 84 |
| Post-Fire Shrub land Low Burn | 44 | 66 | 79 | 85 |
| Post-Fire Grassland Low Burn | 54 | 74 | 84 | 89 |
| Post-Fire Agriculture Low Burn | 72 | 82 | 88 | 92 |

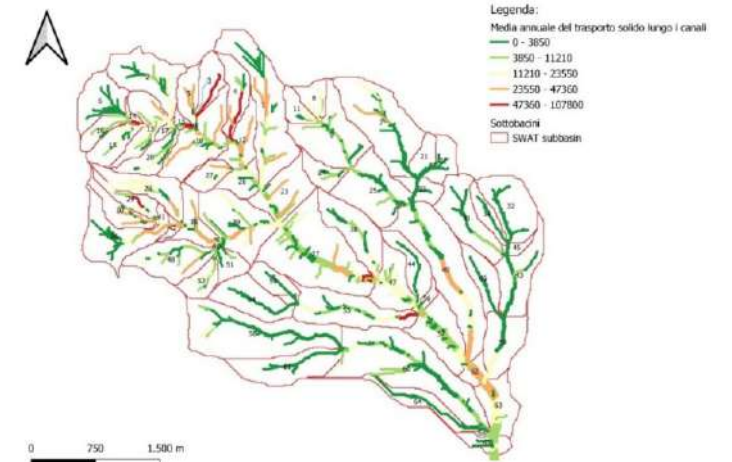
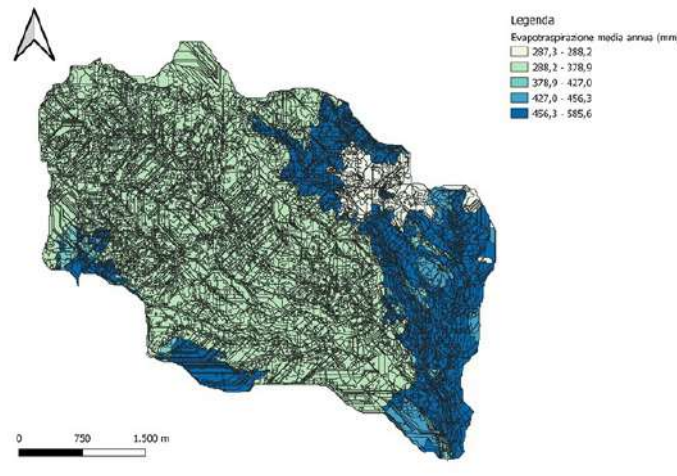
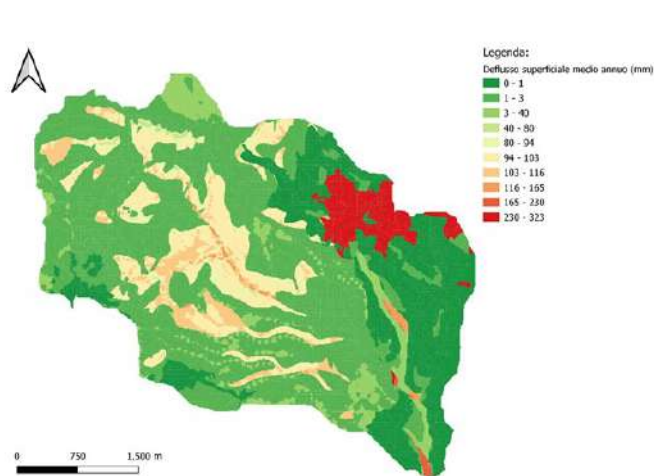
Katimbo et al., 2018 e Havel et al., 2018

Risultati: il modello a scala di bacino

Scenario Pre-Incendio

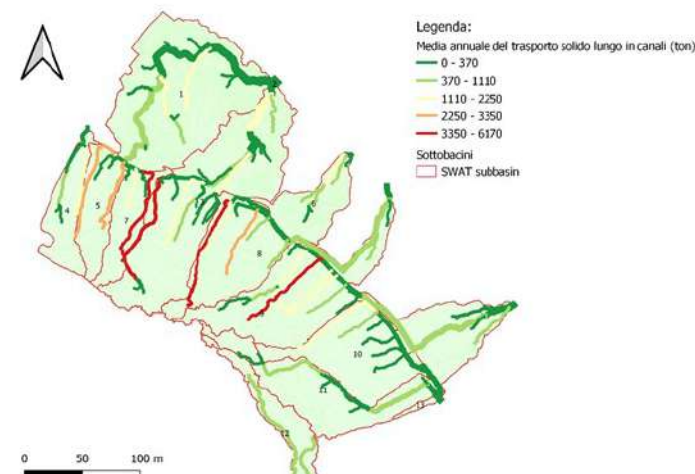
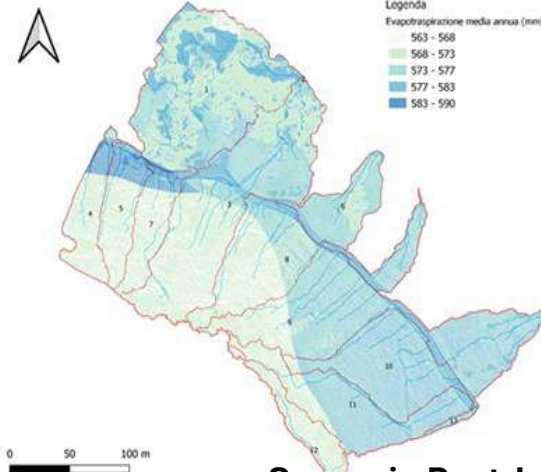
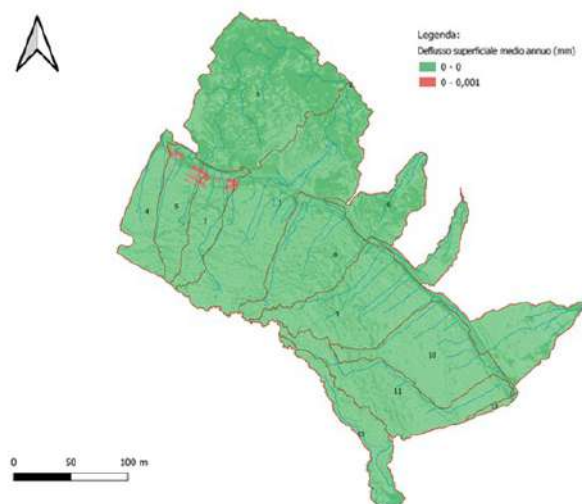


Scenario Post-Incendio

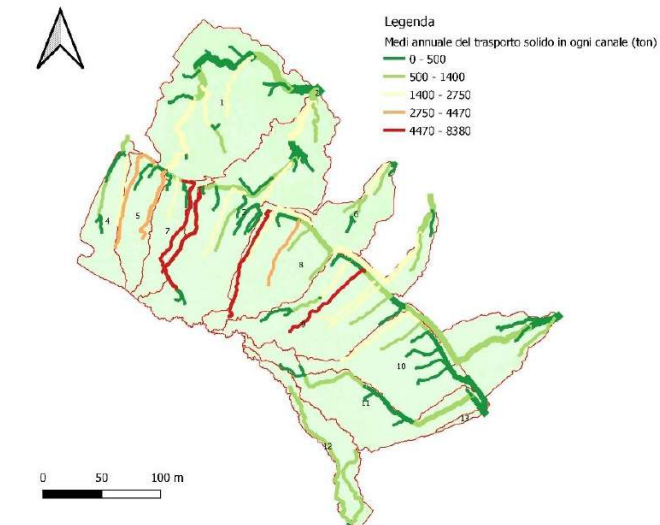
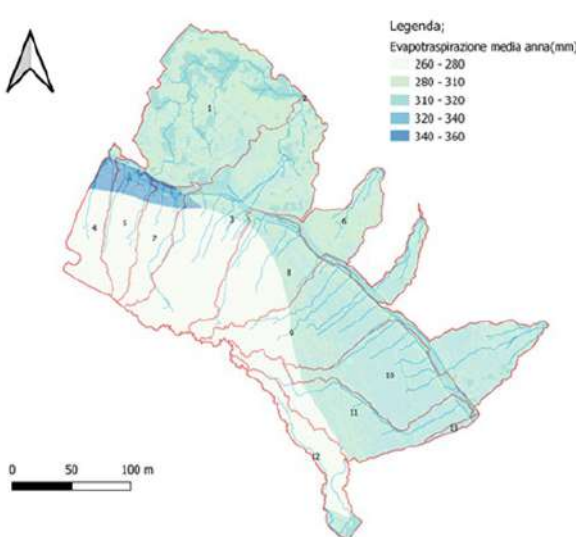
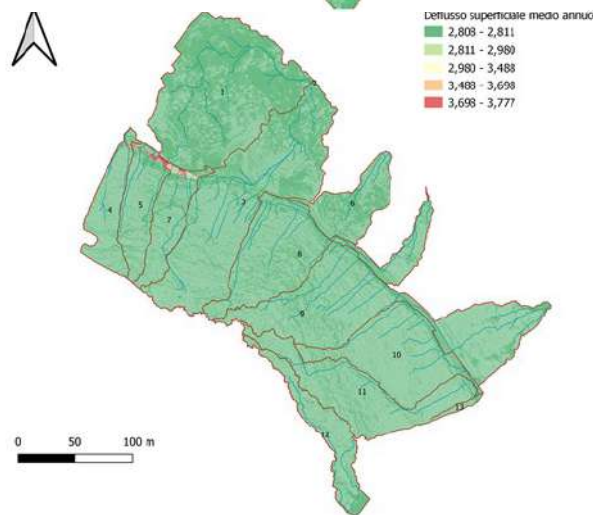


Risultati: il modello a scala di versante

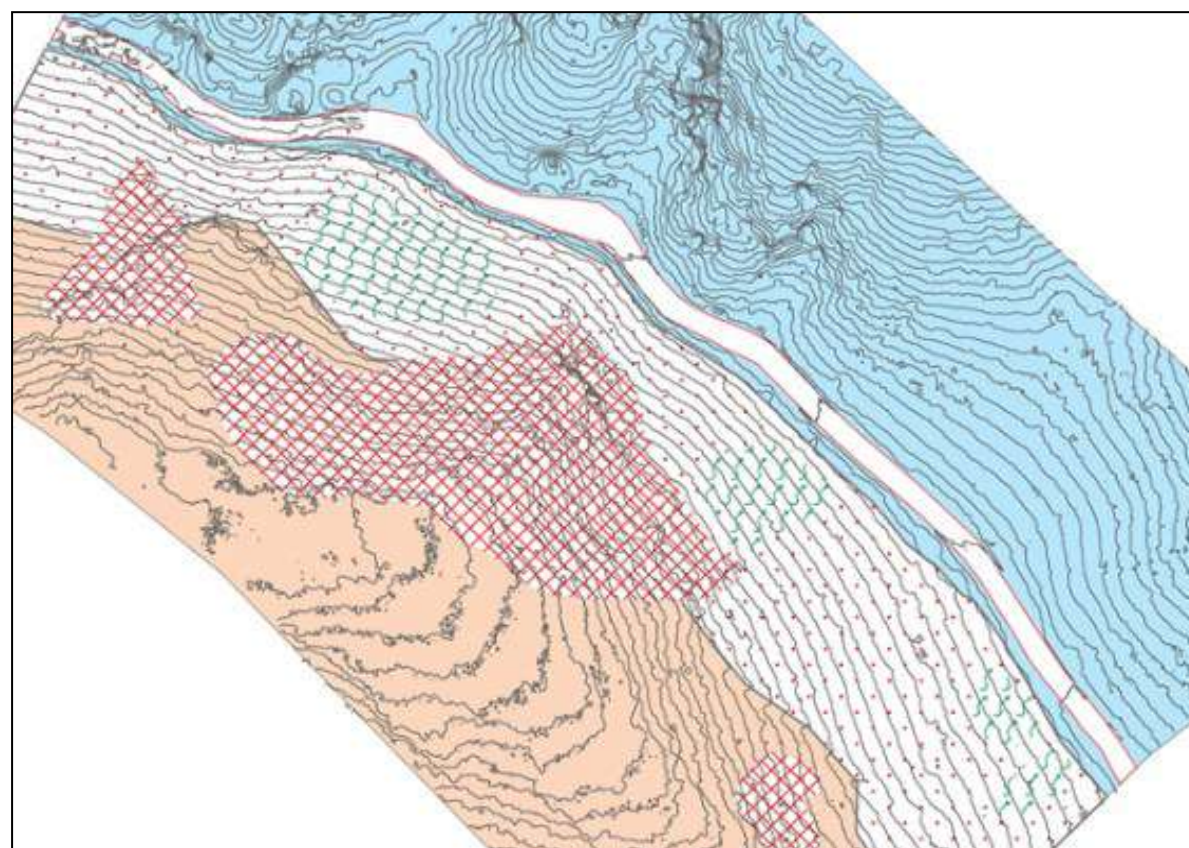
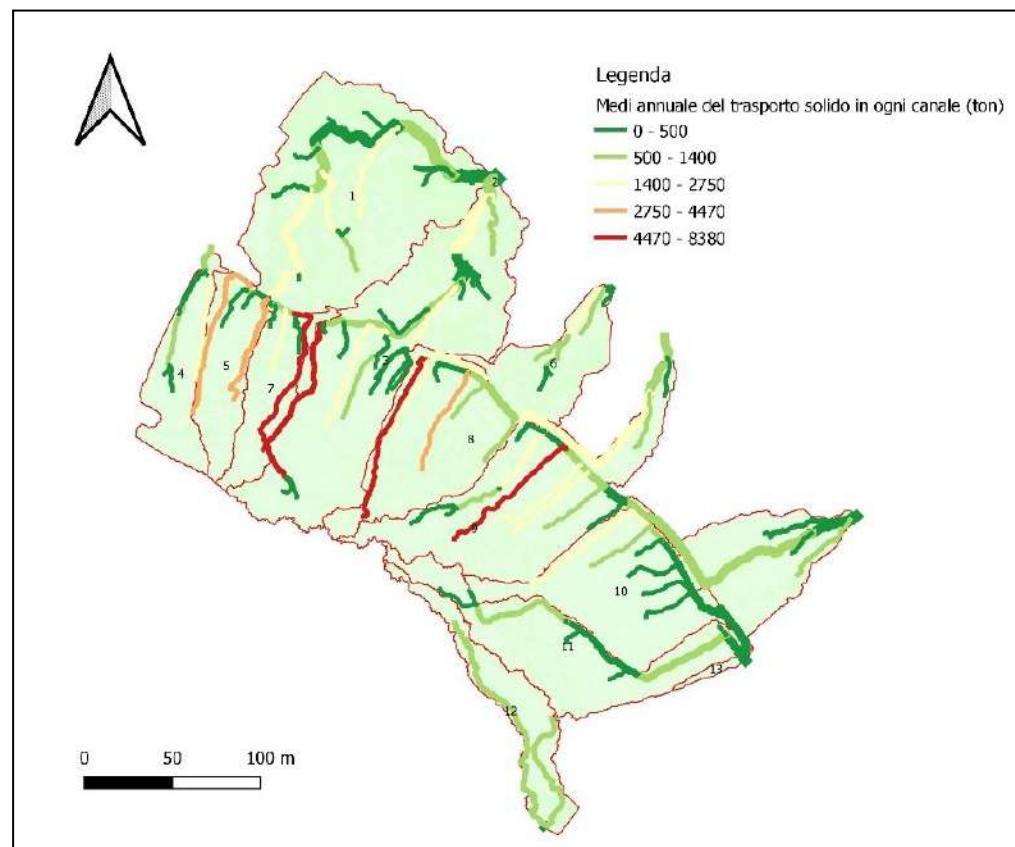
Scenario Pre-Incendio



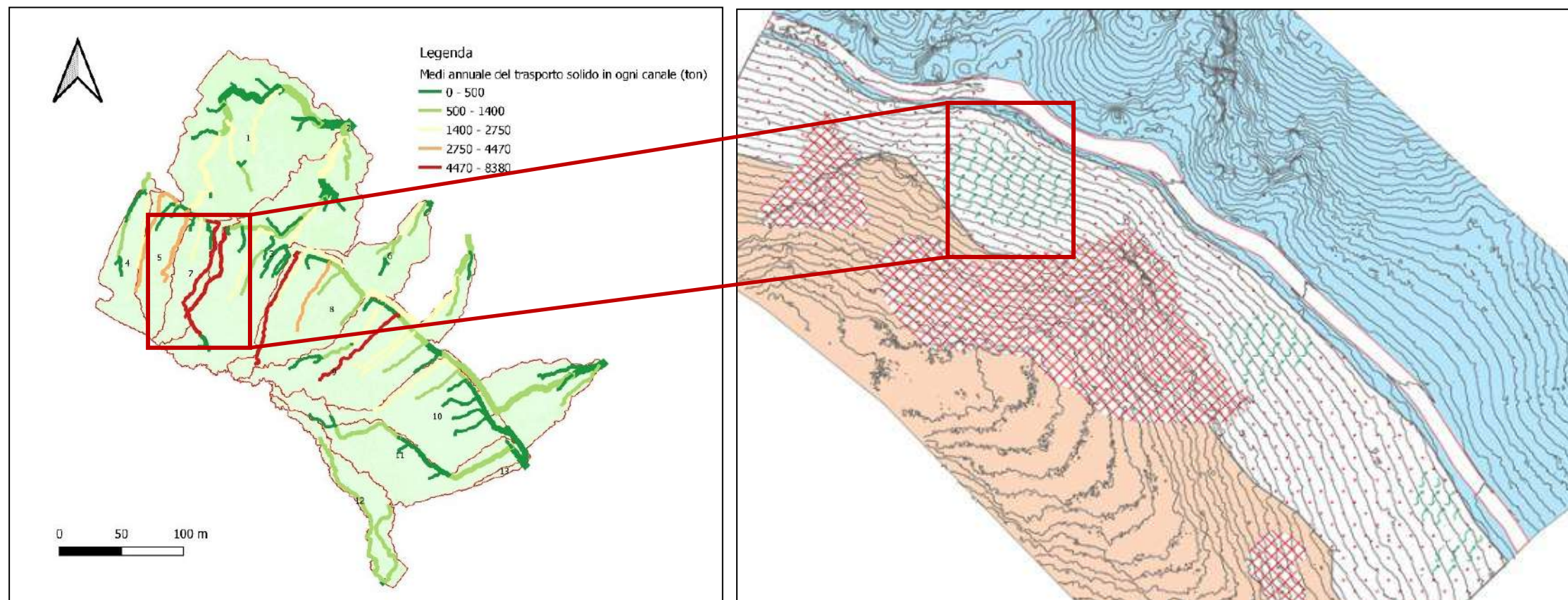
Scenario Post-Incendio



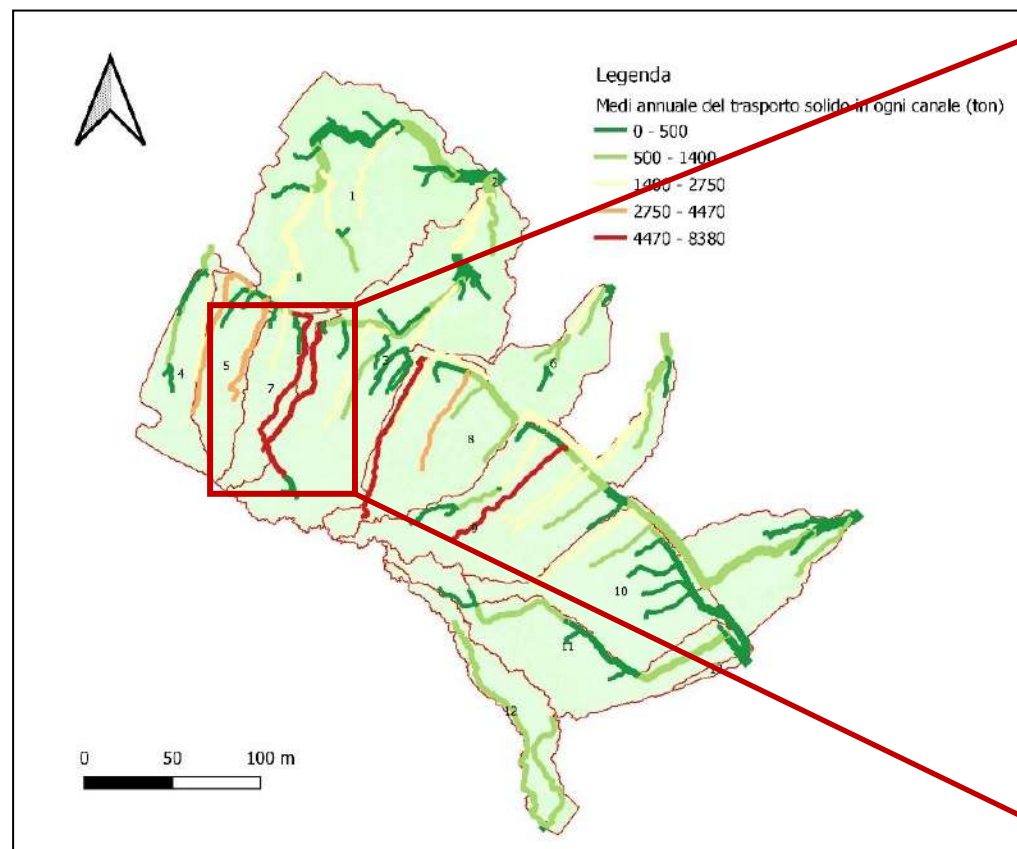
Confronto tra risultati del modello e rilevamento



Confronto tra risultati del modello e rilevamento



Confronto tra risultati del modello e rilevamento



Conclusioni

- Litologia, struttura e grado di evoluzione/età di suoli e rocce controllano permeabilità, capacità di immagazzinamento e resistenza meccanica → regolano piene, stabilità dei versanti e trasporto solido.
- Le caratteristiche idrogeologiche (zona insatura, falda superficiale, scambi fiume–falda, condizioni antecedenti) fissano le soglie di innesco e i tempi di risposta del dissesto.
- Anche nei modelli semplici usati ai fini di piano, queste informazioni possono entrare nella fase di preparazione degli input: mappe geologiche e dei suoli, dati di falda, risultati di prove SPT e CPT/CPTu, serie di baseflow e di portata.
- È strategico condividere e riutilizzare i dati acquisiti per altri scopi (opere, monitoraggi, studi idrogeologici e geotecnici, telerilevamento), massimizzandone il valore per la valutazione del rischio.
- La **pericolosità è un parametro dinamico**: il territorio è in continua evoluzione e può cambiare anche in tempi brevi.

Grazie per l'attenzione

Stefania Da Pelo
sdapelo@unica.it



HydroGEO Team