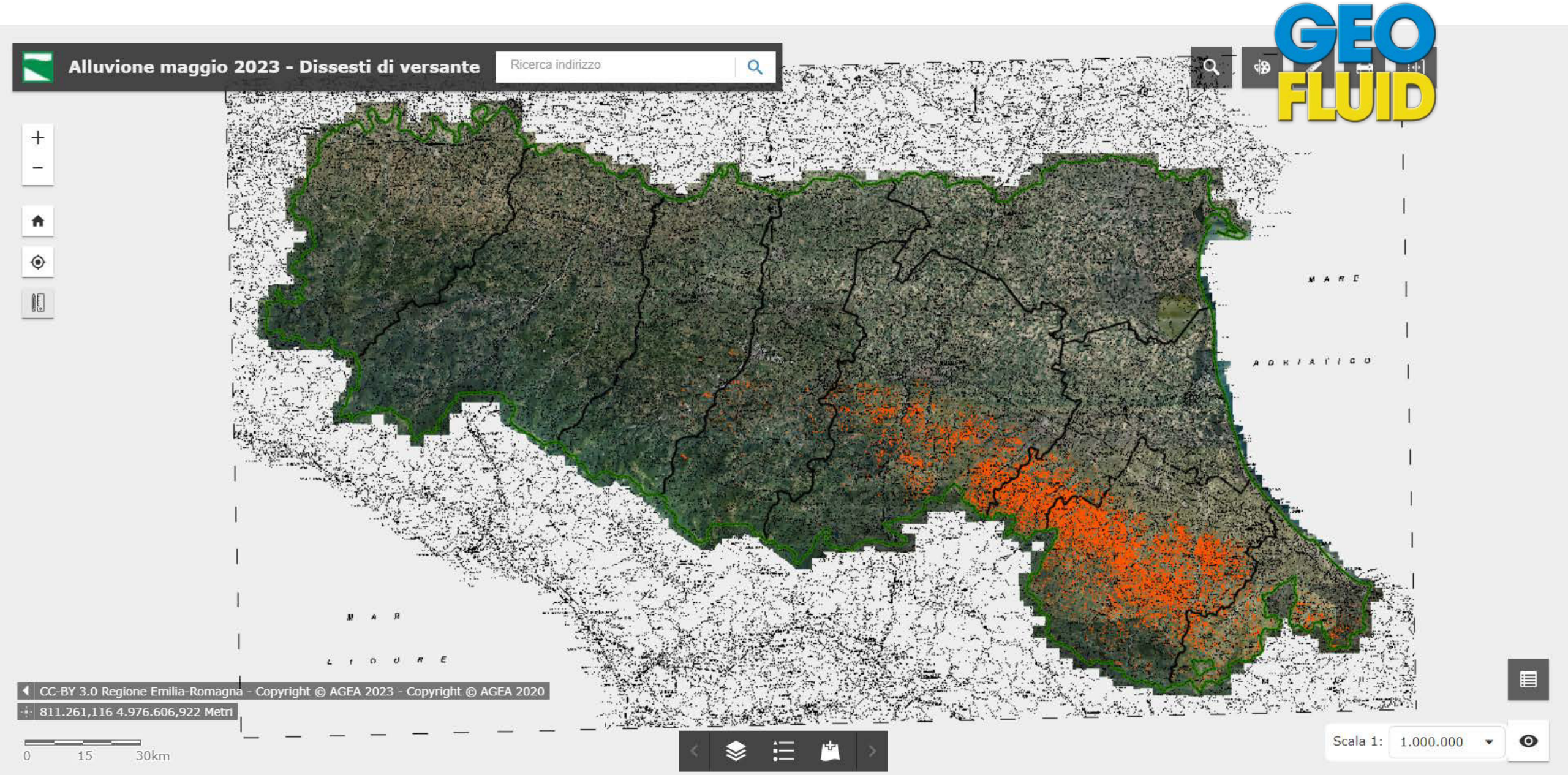
Terra fragile: capirne le cause e gestirne il cambiamento per la sicurezza del territorio.
Tecnologie di monitoraggio ed esperienze reali

Mitigazione del rischio frana nelle infrastrutture stradali: un approccio multiscala

Roberto Valentino
Professore Associato di Geotecnica
UNIVERSITÀ DI PARMA


Alluvione maggio 2023 - Dissesti di versante
Ricerca indirizzo
GEO FLUID
MARE ADRIATICO
MAR LIGURE
CC-BY 3.0 Regione Emilia-Romagna - Copyright © AGEA 2023 - Copyright © AGEA 2020
811.261,116 4.976.606,922 Metri
0 15 30km
Scala 1: 1.000.000

- Più di 80.000 fenomeni franosi verificatisi a seguito degli eventi meteorologici di maggio 2023
- 6 Province colpite (Reggio Emilia, Modena, Bologna, Ravenna, Forlì Cesena e Rimini)
- Più di 600 frane con dimensioni superiori a 1 ettaro
- Oltre 3000 edifici coinvolti
- Oltre **300 km di strade interessate da fenomeni franosi**, direttamente o nelle immediate vicinanze a distanza inferiore a 20 metri.







GEO FLUID





IL POST ALLUVIONE / MODIGLIANA

Riaperta la "porta d'ingresso" della vallata: finito il maxi cantiere da 5 milioni sulla rupe

Un viadotto interrato e imponenti palificazioni per mettere in sicurezza la strada simbolo dell'alluvione. Nel territorio restano aperti altri cantieri per 17,5 milioni



FORLÌTODAY

FT

Redazione

07 settembre 2026 13:30

GEO FLUID



STRATEGIE DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO

Interventi di vario tipo che riducono uno o più tra **pericolosità** (P_L, $P_{T:L}$) dei fenomeni franosi, **esposizione** ($E_{S:T}$) e/o la **vulnerabilità** ($V_{D:T}$) degli elementi a rischio.

MITIGAZIONE DEL RISCHIO

$$P_{(LOL)} = P_{(L)} \times P_{(T:L)} \times E_{(S:T)} \times V_{(D:T)}$$

RIDUZIONE DELLA PERICOLOSITA' (P_L , $P_{T:L}$)

Frane potenziali o esistenti

INTERVENTI DI PREVENZIONE (P_L) E PROTEZIONE ($P_{T:L}$)

RIDUZIONE DELL'ESPOSIZIONE ($P_{S:T}$) DEGLI ELEMENTI A RISCHIO

Persone

INTERVENTI FINALIZZATI ALLA RIDUZIONE DEL NUMERO E/O DEL VALORE DEGLI ELEMENTI ESPOSTI AL RISCHIO, IN MODO TEMPORANEO O PERMANENTE $P_{(S:T)}$

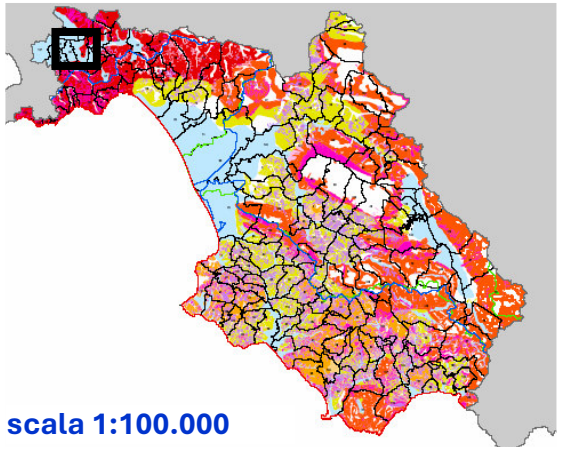
RIDUZIONE DELLA VULNERABILITA' ($V_{D:T}$) DEGLI ELEMENTI A RISCHIO

Proprietà vs persone

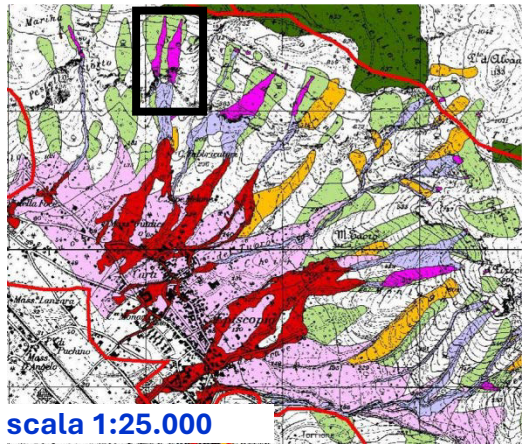
INTERVENTI FINALIZZATI ALLA RIDUZIONE DEL GRADO DI PERDITA ATTESO DI UNO O PIÙ ELEMENTI ESPOSTI AL RISCHIO $V_{(D:T)}$

- $P_{(LOL)}$ PROBABILITÀ ANNUALE CHE UNA PERSONA PERDA LA VITA
- $P_{(L)}$ FREQUENZA DI ACCADIMENTO DEI FENOMENI
- $P_{(T:L)}$ PROBABILITÀ CHE IL FENOMENO RAGGIUNGA LA PERSONA MAGGIORMENTE ESPOSTA
- $E_{(S:T)}$ PROBABILITÀ SPAZIO-TEMPORALE DELLA PERSONA MAGGIORMENTE ESPOSTA AL RISCHIO
- $V_{(D:T)}$ VULNERABILITÀ DELLA PERSONA MAGGIORMENTE ESPOSTA

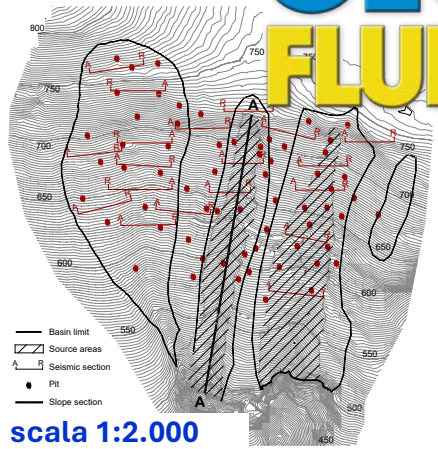
Cosa s'intende per *approccio multiscala*?



scala 1:100.000



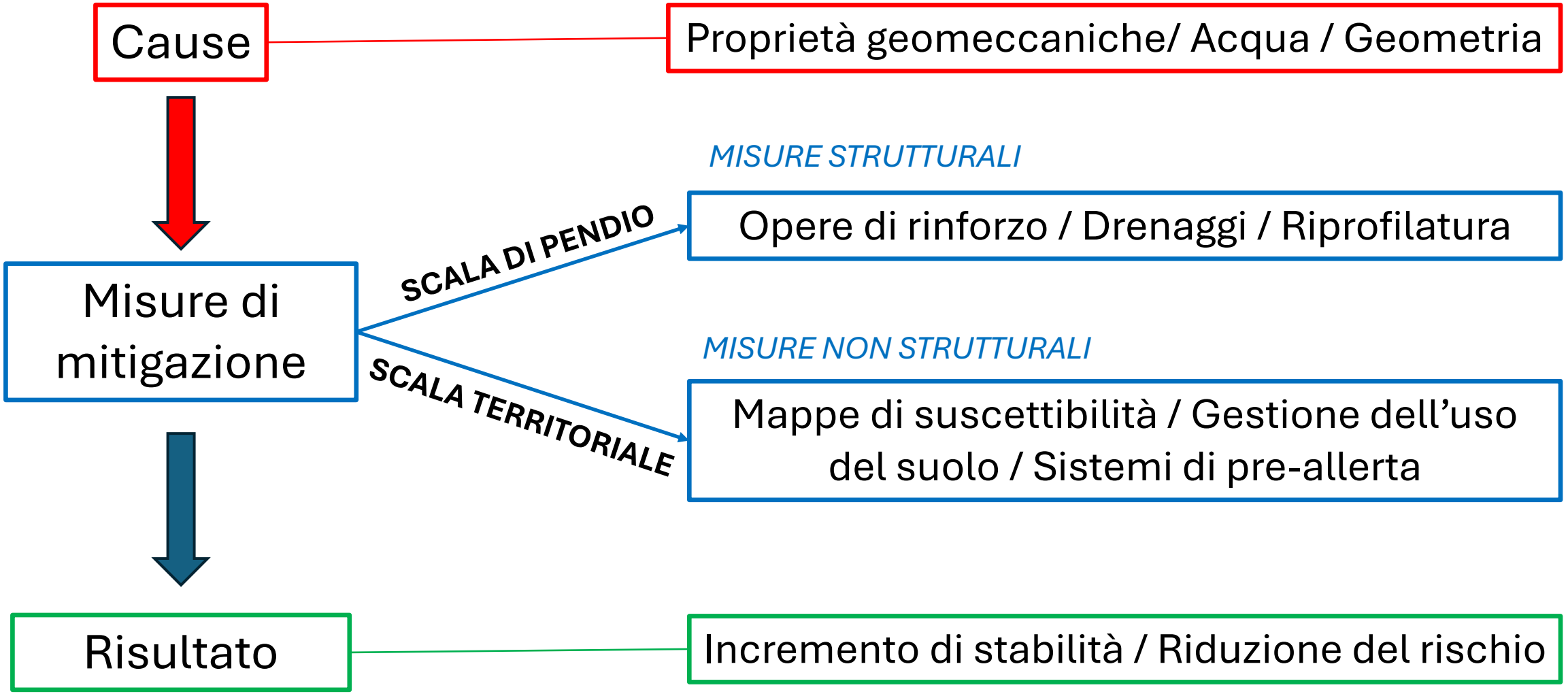
scala 1:25.000



scala 1:2.000

	MEDIA SCALA 1: 100.000 ≤ SCALA < 1:25.000	GRANDE SCALA 1: 25.000 ≤ SCALA < 1:5.000	SCALA DI DETTAGLIO SCALA ≥ 1:5.000	
DIVIETI	SI	SI	SI	Riduzione dell'Esposizione
PERMESSI/ASSICURAZIONI	SI	SI	SI	
MONITORAGGIO/ALLARME	SI	SI	SI	
PREVENZIONE	NO	NO	SI	Riduzione di P
PROTEZIONE	NO	NO	SI	Riduzione di P

Cosa s'intende per *approccio multiscala*?



Scala di pendio

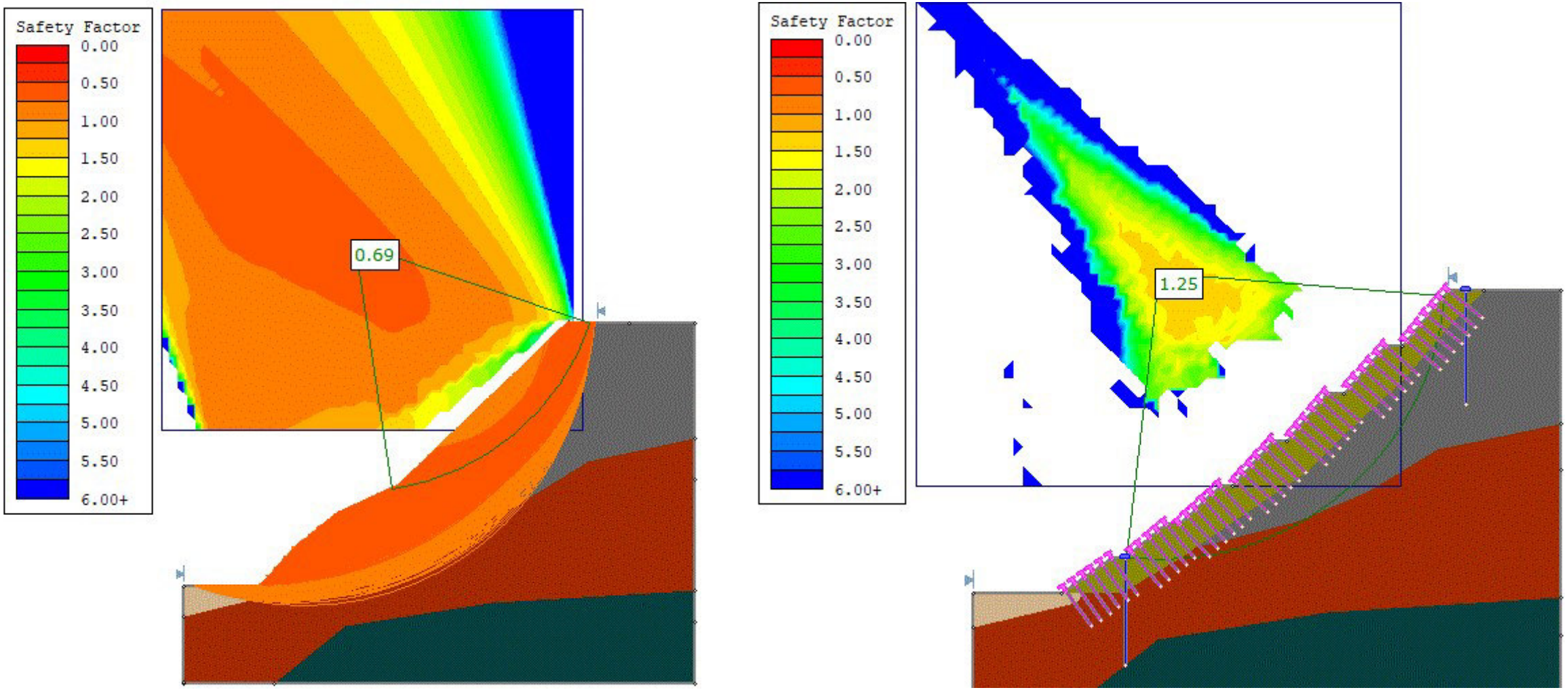




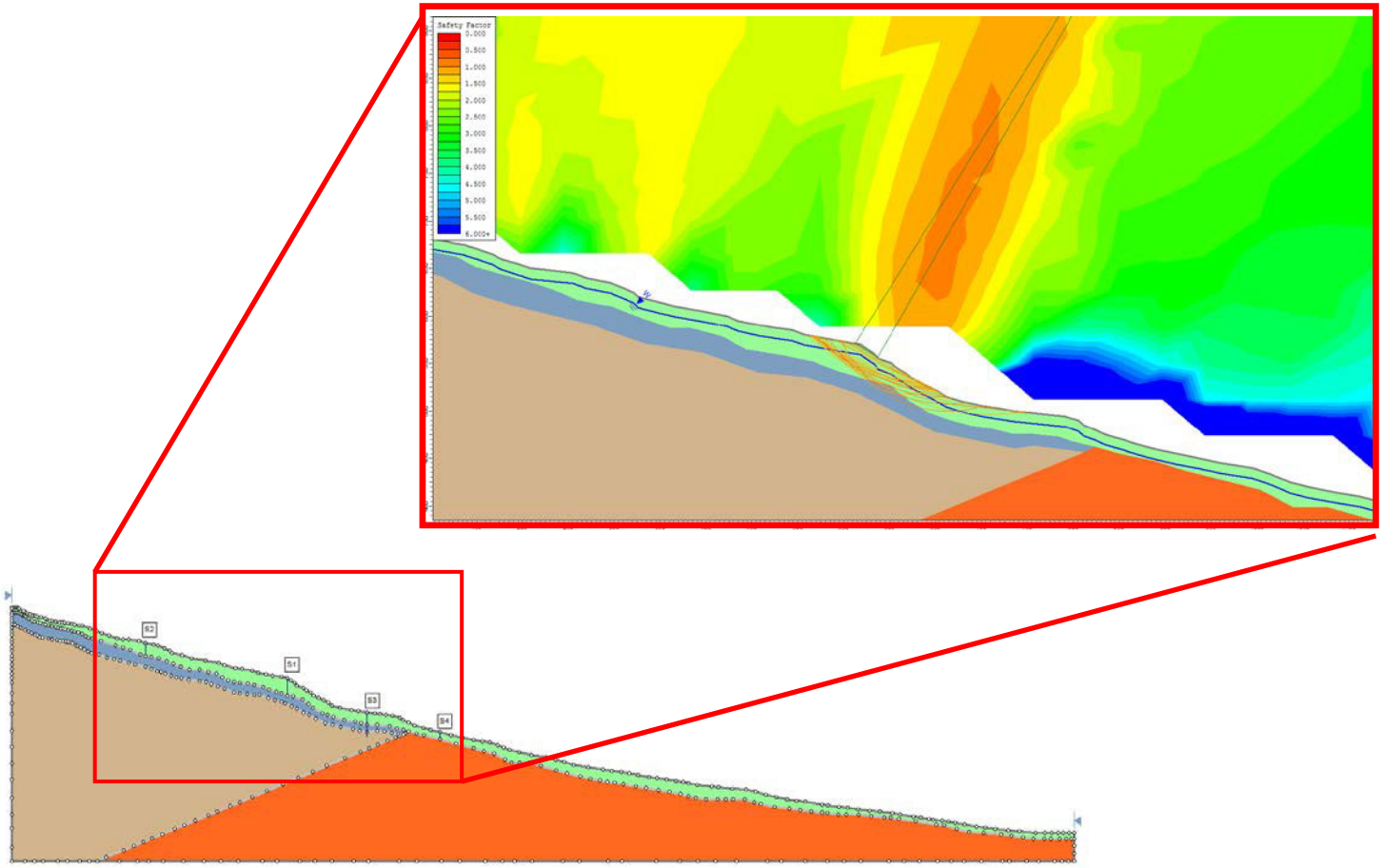
Se l'obiettivo è progettare opere di stabilizzazione, occorrono:

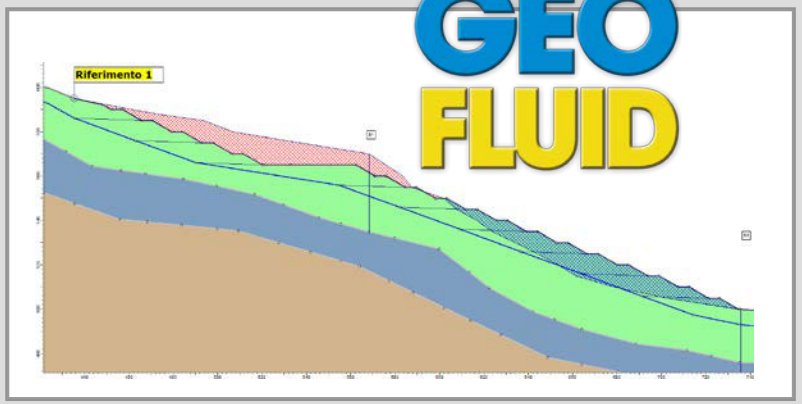
- **Rilievo topografico (geometria)**
- **Indagini geognostiche**
- **Misure in sito**
- **Test di laboratorio**
- **Modellazione numerica (LEM/FEM)**

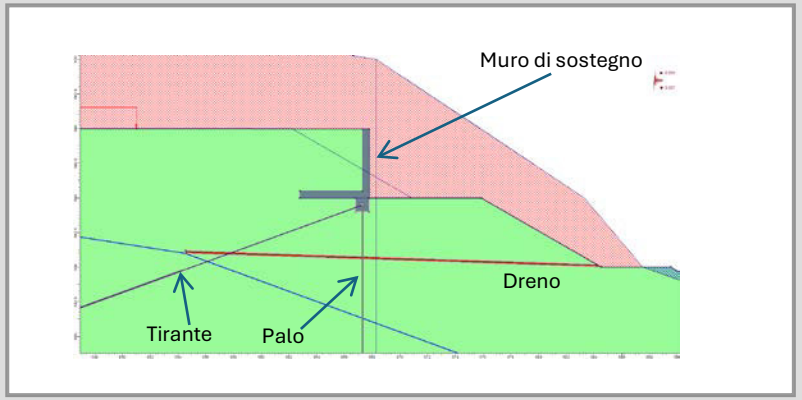
Scala di pendio

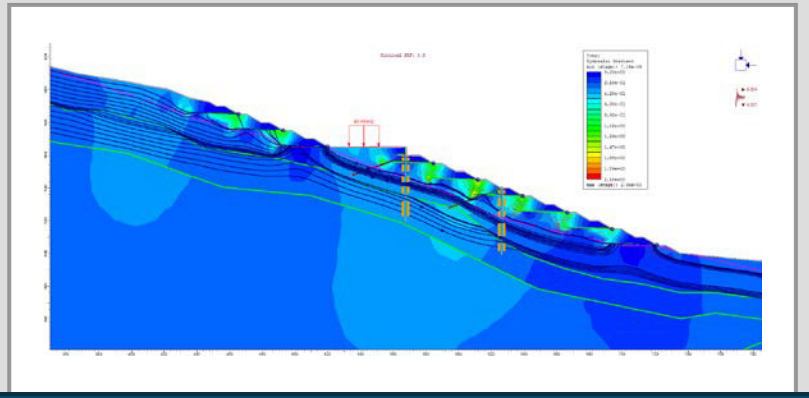


Scala di pendio





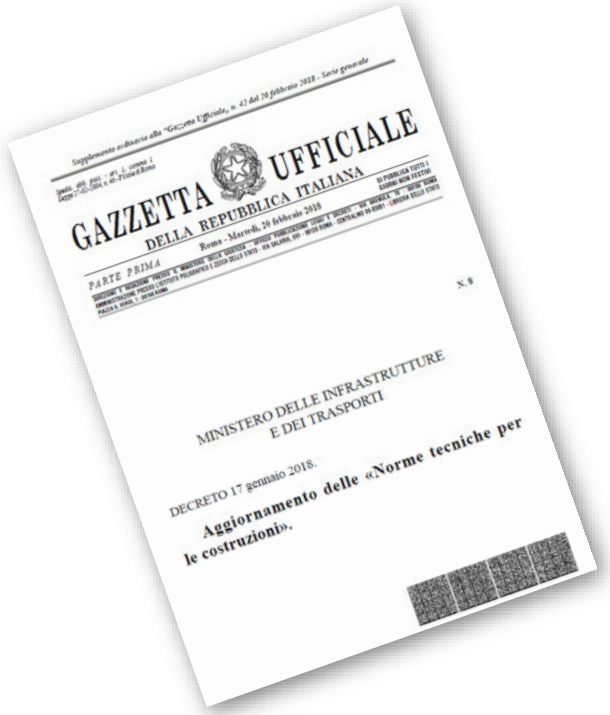




Scala di pendio

NTC 2018

6.3 Stabilità dei pendii naturali


GAZZETTA UFFICIALE
DELLA REPUBBLICA ITALIANA
PARTE PRIMA
MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE
E DEI TRASPORTI
DECRETO 17 gennaio 2018.
Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni».

Il progetto delle opere e degli interventi si articola nelle seguenti fasi:

1. Raccolta notizie storiche sull'evoluzione dello stato del pendio e dati di pioggia
2. Caratterizzazione e **modellazione geologica** del sito
3. **Programmazione delle indagini geotecniche**
4. Caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni e delle rocce presenti
5. **Modellazione geotecnica** del pendio
6. Verifiche di sicurezza e delle prestazioni
7. Intervanti di stabilizzazione
8. Controlli e monitoraggio

PROVE IN SITO
(SPT, CPT, DMT, DH, CH, MASW, SASW)

PROVE IN LAB.
(TX, EDOM., TAGLIO)

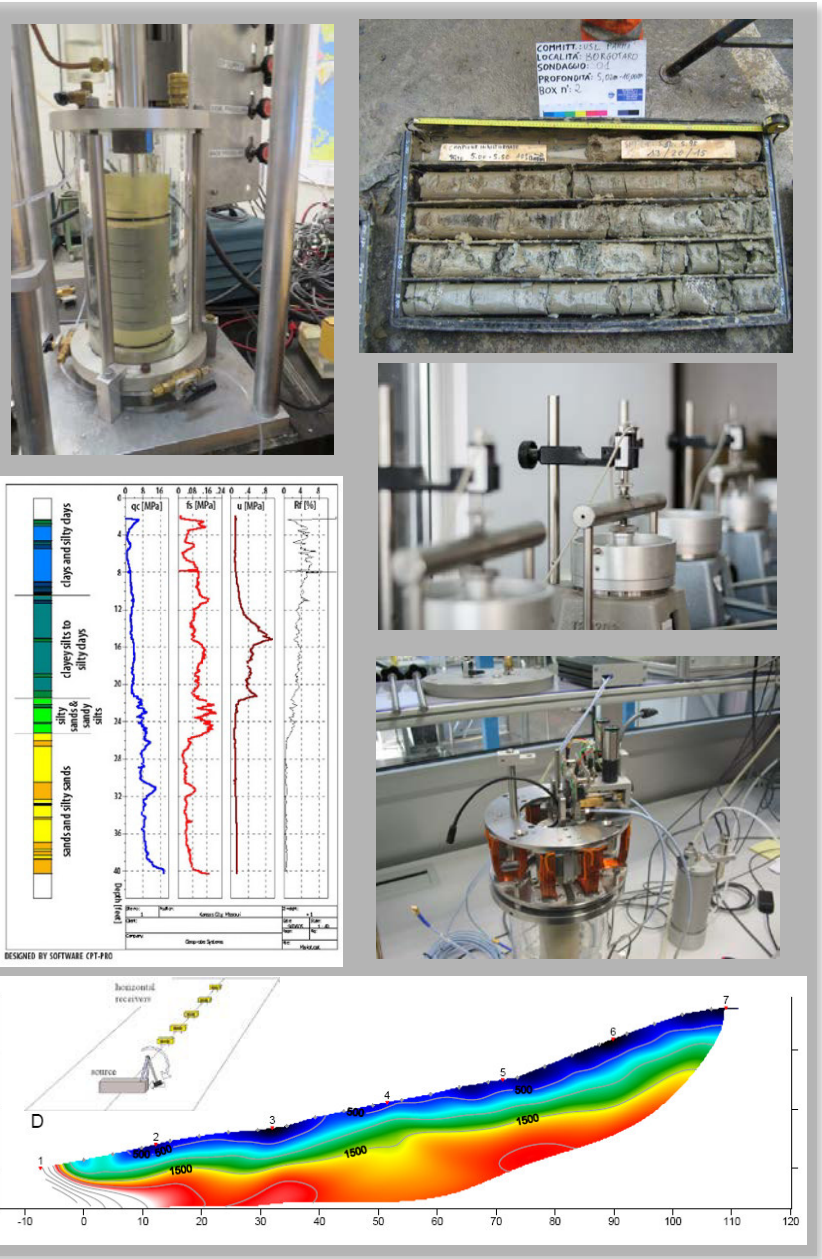
PARAMETRI DI RESISTENZA (ϕ', c', c_u)
E
PARAMETRI DI DEFORMABILITÀ
(G_0 (V_s), E, ν, M_0, c_v, c_c, c_r)
DEL TERRENO

PROGETTAZIONE

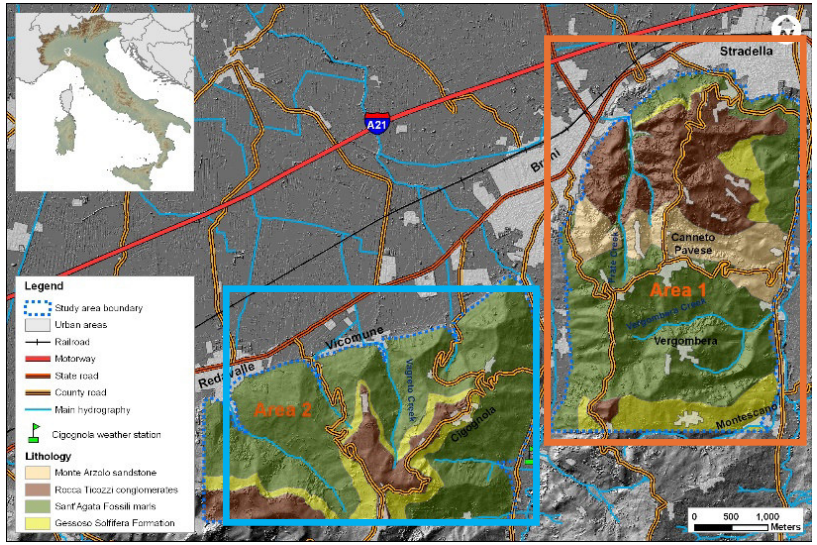
CONDIZIONI STATICHE

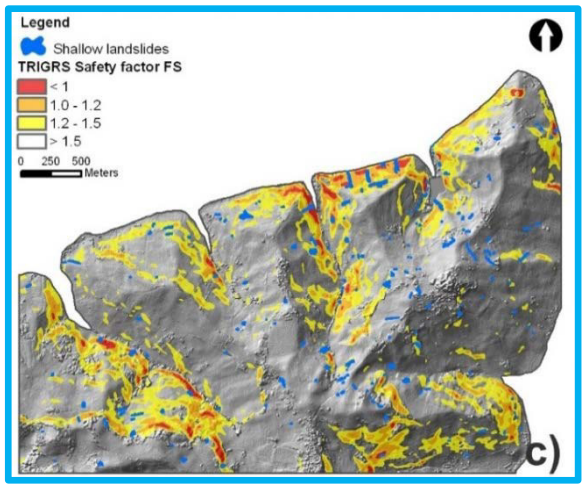
CONDIZIONI SISMICHE

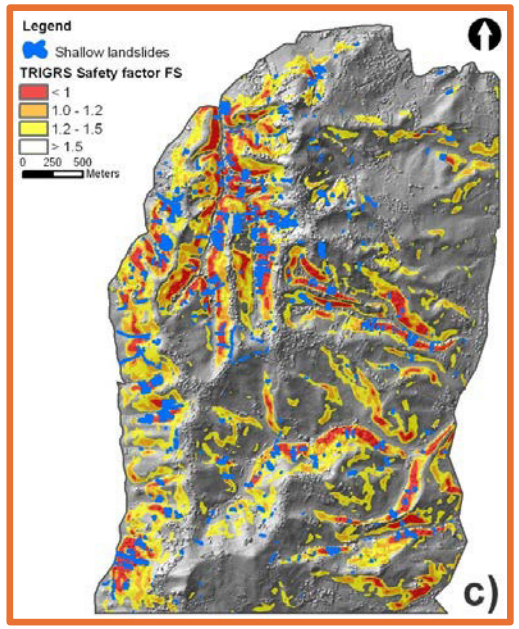
- **RISPOSTA SISMICA LOCALE**
- **VALUTAZ. APPROSS. AMPLIFICAZIONE LITO-STRATIGRAFICA**



Scala territoriale







Zizioli et al. (2013), Comparison between different approaches to modeling shallow landslide susceptibility: a case history in Oltrepo Pavese, Northern Italy, *NHESS*, 13, 559-573.

Se l'obiettivo è quello di ottenere una mappa di suscettibilità o un sistema di allerta, occorrono:

- **Immagini aeree o satellitari**
- **Rilievo da sopralluogo in campo**
- **Mappa-inventario delle frane**
- **Indagini in sito**
- **Mappe informative/Data-base**

- **Modellazione numerica a scala regionale (frane superficiali indotte da pioggia)**

↓

Modelli «distribuiti» e fisicamente basati

↓

Mappe di Fs tempo-varianti

Scala territoriale

MODEL APPROACH	MODEL NAME	APPLICABILITY								Note
		Modeling		Analysis scale		Analysis purpose		Output data		
		Complex numerical method	Multidimentional space	Regional	Slope	Risk assesment	Vegetation effect	Stability factor	Additional information	
*SSDMs	SHALSTAB							*4		*4: Definition of coeff instabillty classes
	dSLAM									
	SHETRAN									
	TRIGRS									
	TRIGRS-unsatured									
	Kokutse model									
	SLIP4EX									
	Lu and Godt model									
	SUSHI									
	MD-STAB									
	Ecosfix 1.0									
	SOSlope									

Murgia et al., 2022

*SSDMs = Slope Stability Deterministic Models

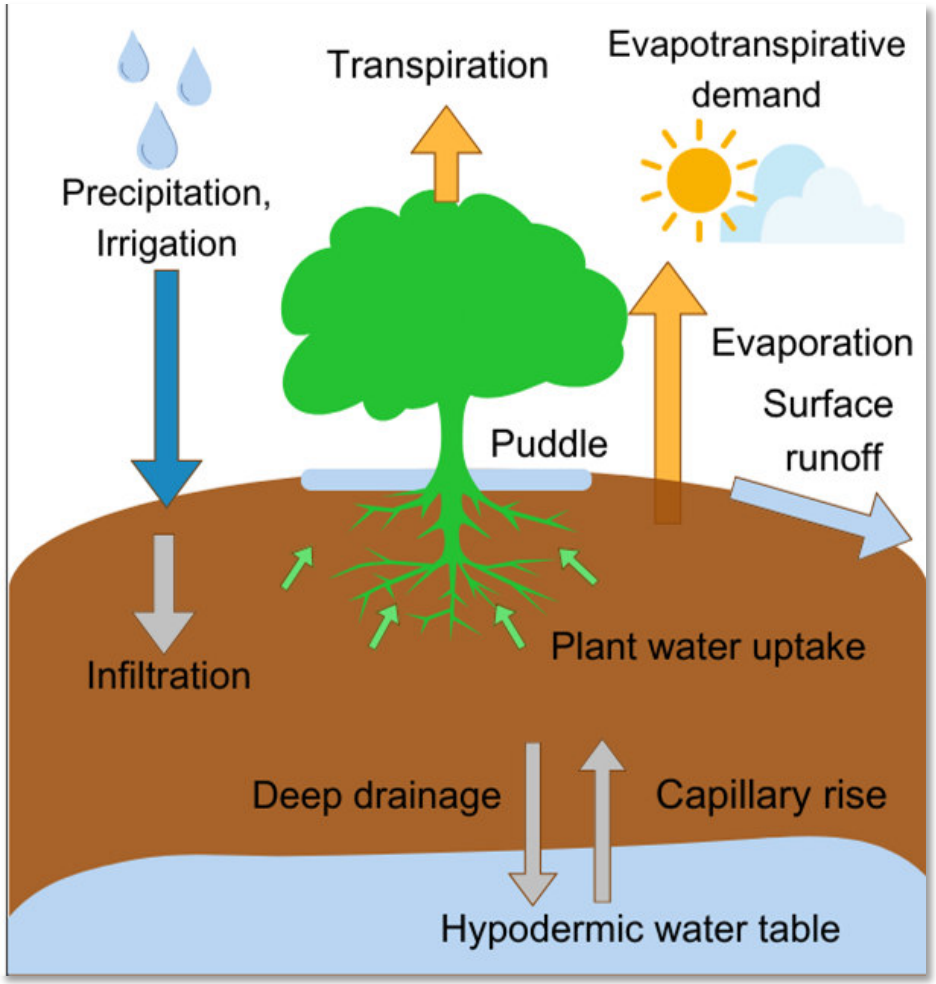
Modello meccanico + Effetto vegetazione

Bilancio idrologico comprendente la vegetazione + Modello Meccanico

Scala territoriale

CRITERIA-3D (Bittelli et al., 2010)

- Bilancio idrologico: equazioni di Richards
- Modello Van Genuchten-Mualem per SWCC (*Ippisch et al. 2006*)
- Funzione di conducibilità idraulica (Mualem, 1976)
- Evapo-traspirazione *(Hargreaves-Samani, 1985)*
- Ciclo vitale vegetazione
- Scioglimento neve *(Brooks, 2009)*
- Radiazione solare
- Terreno stratificato



INPUT
- Dati meteo giornalieri o orari
- Parametri idrologici del terreno
- Parametri della vegetazione

OUTPUT
- Contenuto d'acqua volumetrico
- Suzione

+

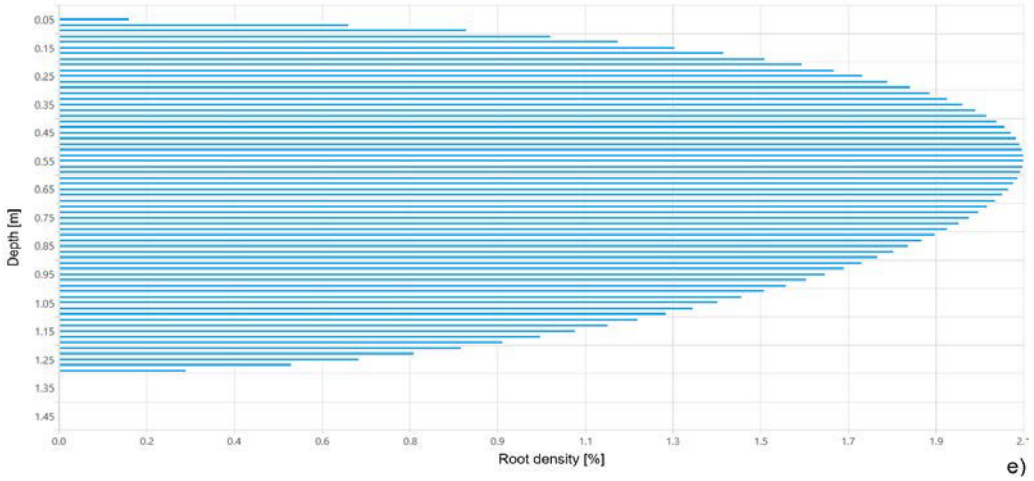
OUTPUT
- Fattore di sicurezza del pendio

(Sannino et al., 2024; Sannino et al. 2025)

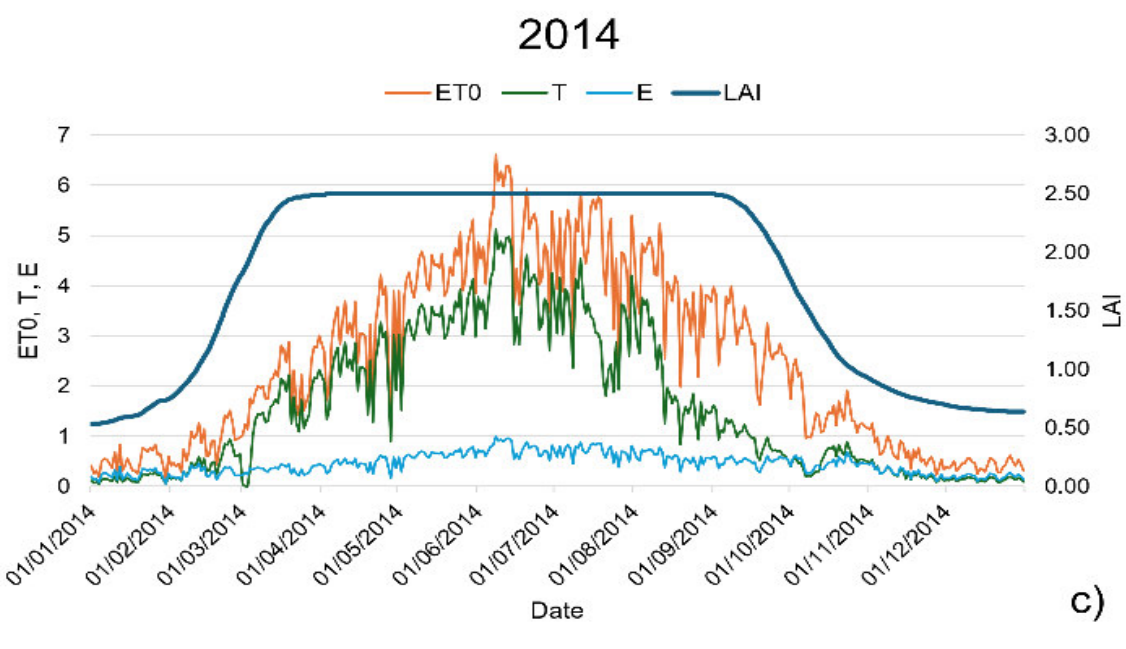
Scala territoriale

Modello della vegetazione

- Densità delle radici variabile con la profondità (forma apparato radicale)



- Sviluppo del fogliame nel tempo sulla base dei dati meteo



LAI = Leaf Area Index

Scala territoriale

Modello per la stabilità del versante

$$FoS = \frac{tan\varphi'}{tan\beta} + \frac{2c_{tot}}{\gamma H_{ss} sin2\beta} - \frac{\sigma^s}{\gamma H_{ss}}(tan\beta + cot\beta)tan\varphi' \qquad \text{(Lu \& Godt, 2008)}$$

$$\sigma^s = -\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}(u_a - u_w)$$

$c_{tot} = c' + c_r$

c' = coesione efficace [kPa]

c_r = contributo meccanico delle radici [kPa]

θ = contenuto volumetrico d'acqua [m^3/m^3]

θ_r = contenuto d'acqua residuo [m^3/m^3]

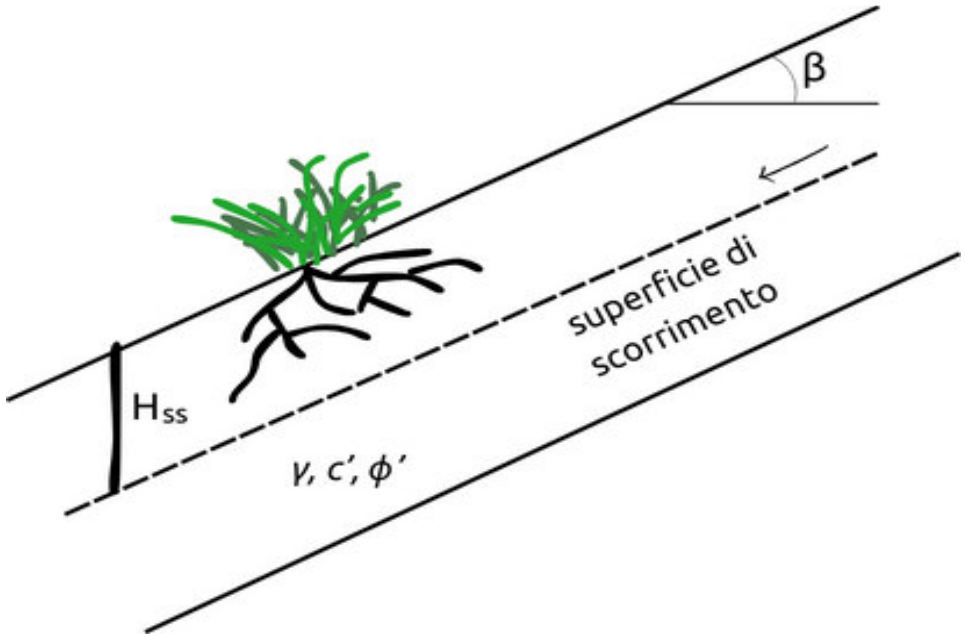
θ_s = contenuto d'acqua a saturazione [m^3/m^3]

φ' = angolo di resistenza al taglio [°]

β = pendenza [°]

H_{ss} = profondità di interesse [m]

γ = peso per unità di volume [kN/m^3]



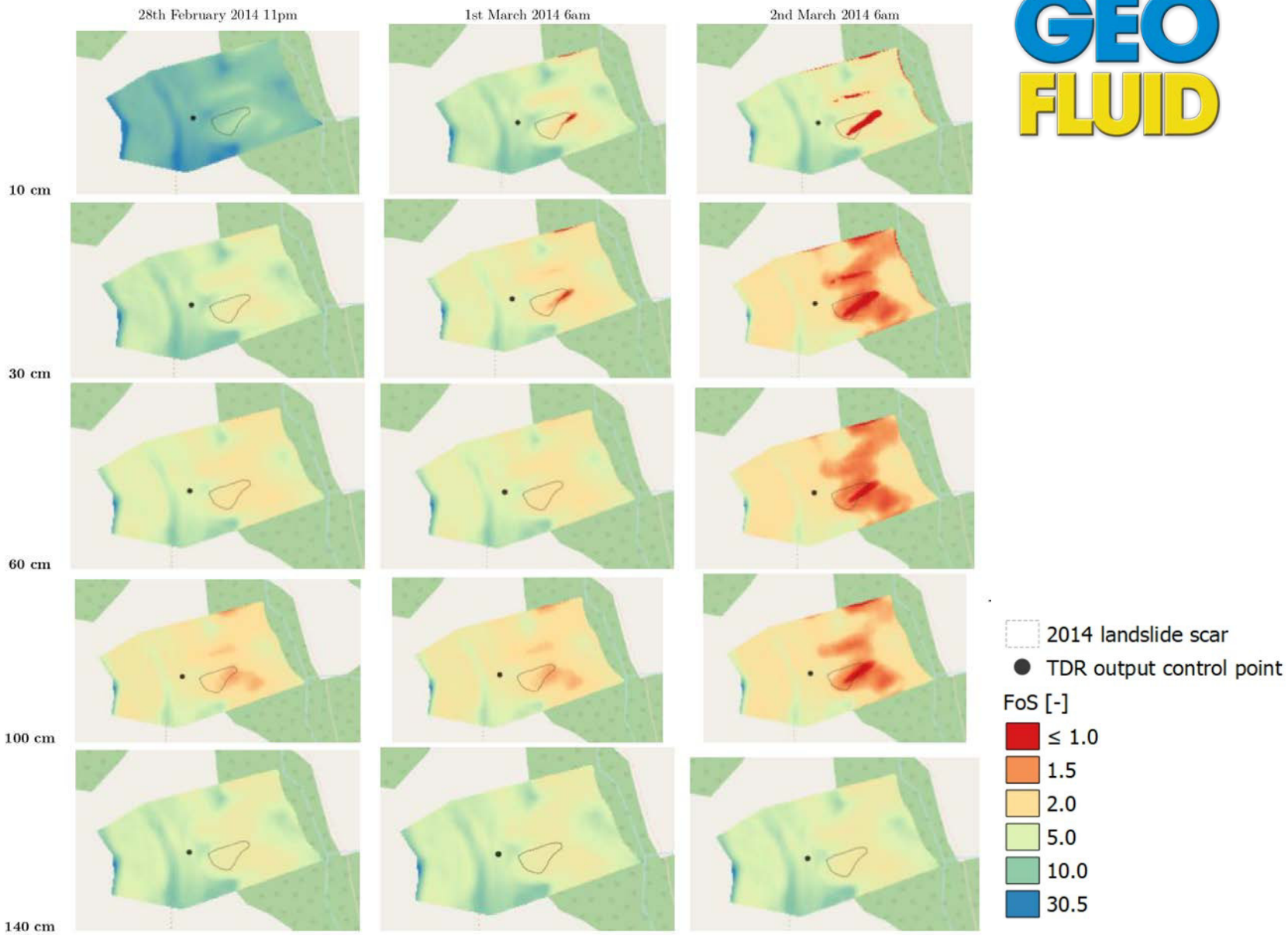
Scala territoriale

Validazione di CRITERIA-3D – sito sperimentale di Montuè (PV)

Picco di pioggia 60mm/giorno tra l'1 e il 2 marzo 2014



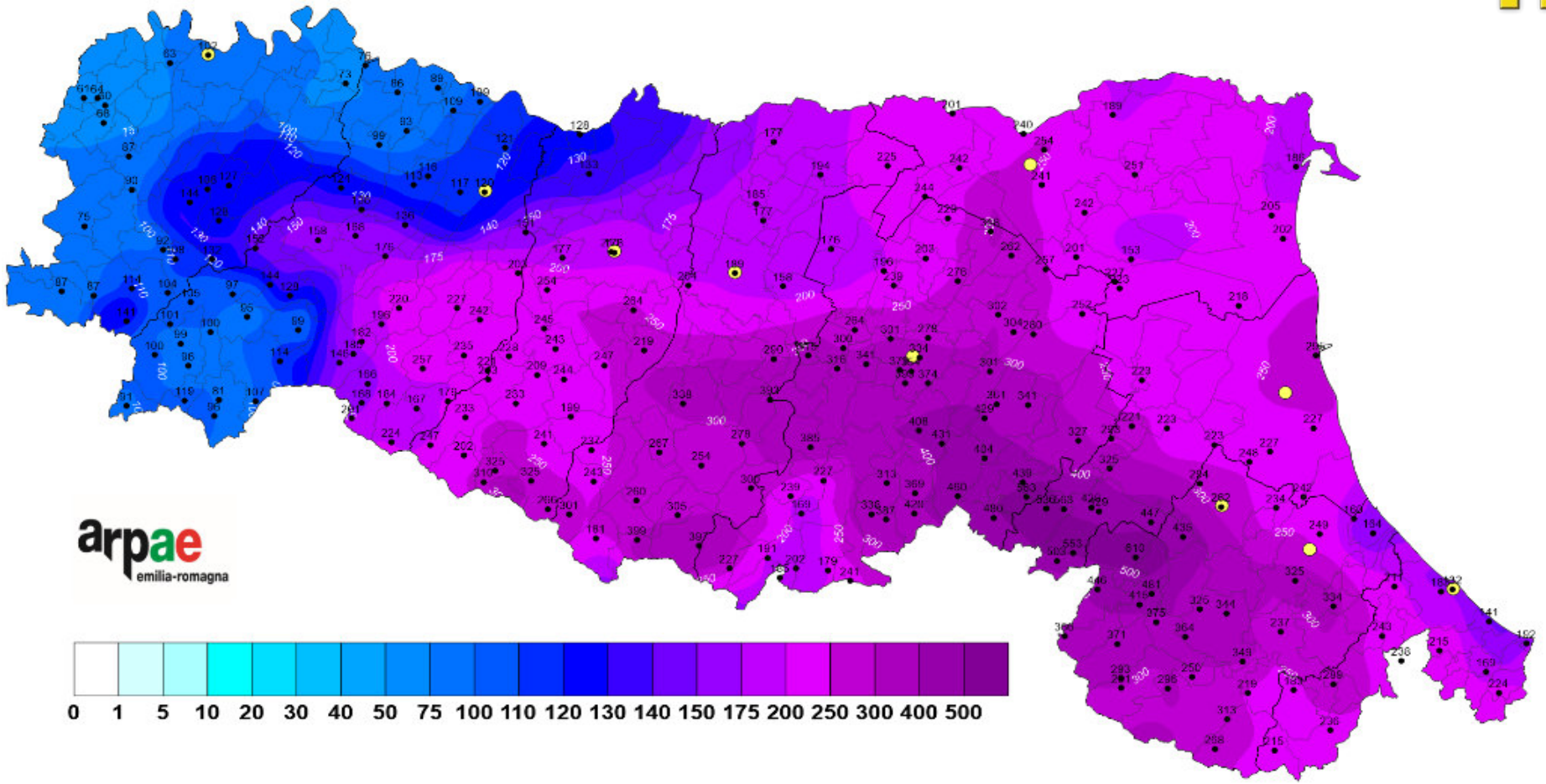
Mappe del Fattore di Sicurezza tempo-varianti a diverse profondità



(Sannino G., Tomei F., Bittelli M., Meisina C., Bordoni M., Valentino R., 2025, A three-dimensional agro-hydrological model for predictive analysis of shallow landslides: CRITERIA-3D. Engineering Geology, 352, 108073, https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108073)

Scala territoriale

Applicazione di CRITERIA-3D ad alcune aree dell'Emilia Romagna

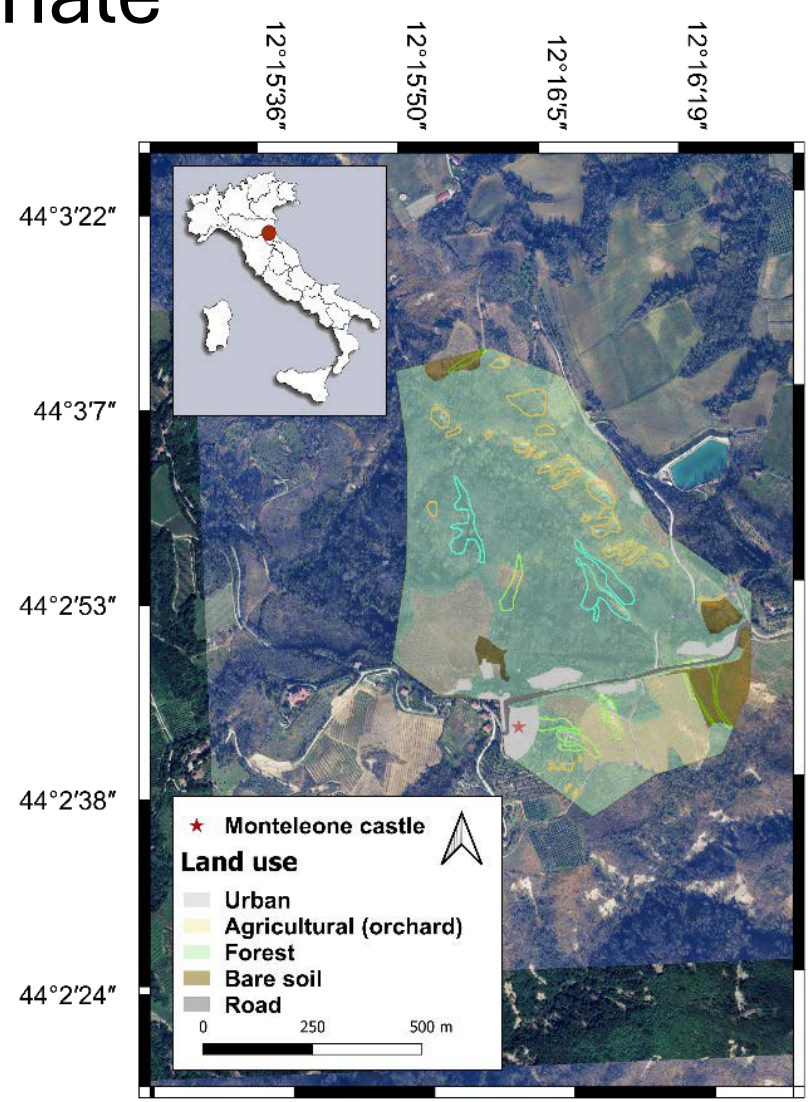


Cumulata di pioggia (in mm) tra il 1° e il 17 maggio 2023 (AA.VV., 2023).

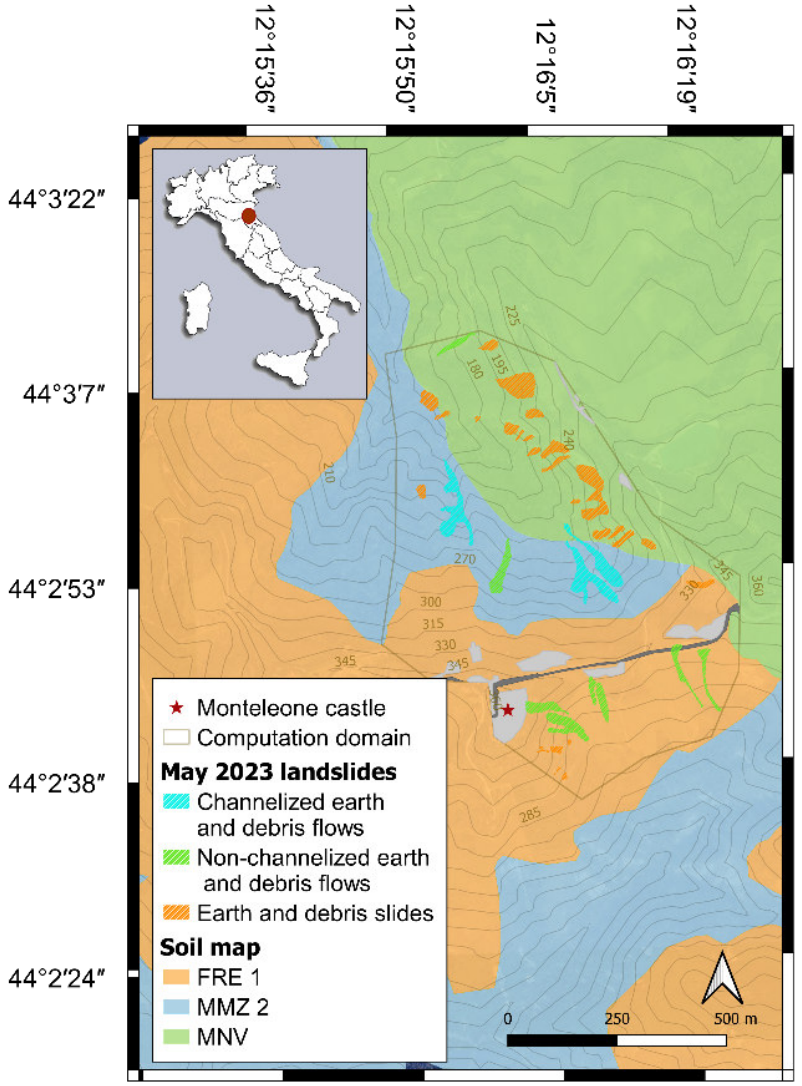
Scala territoriale

Area test in località Monteleone (5.65km²), Roncofreddo (FC)

Picco di pioggia:
200mm/giorno
16 maggio 2023



Uso del suolo

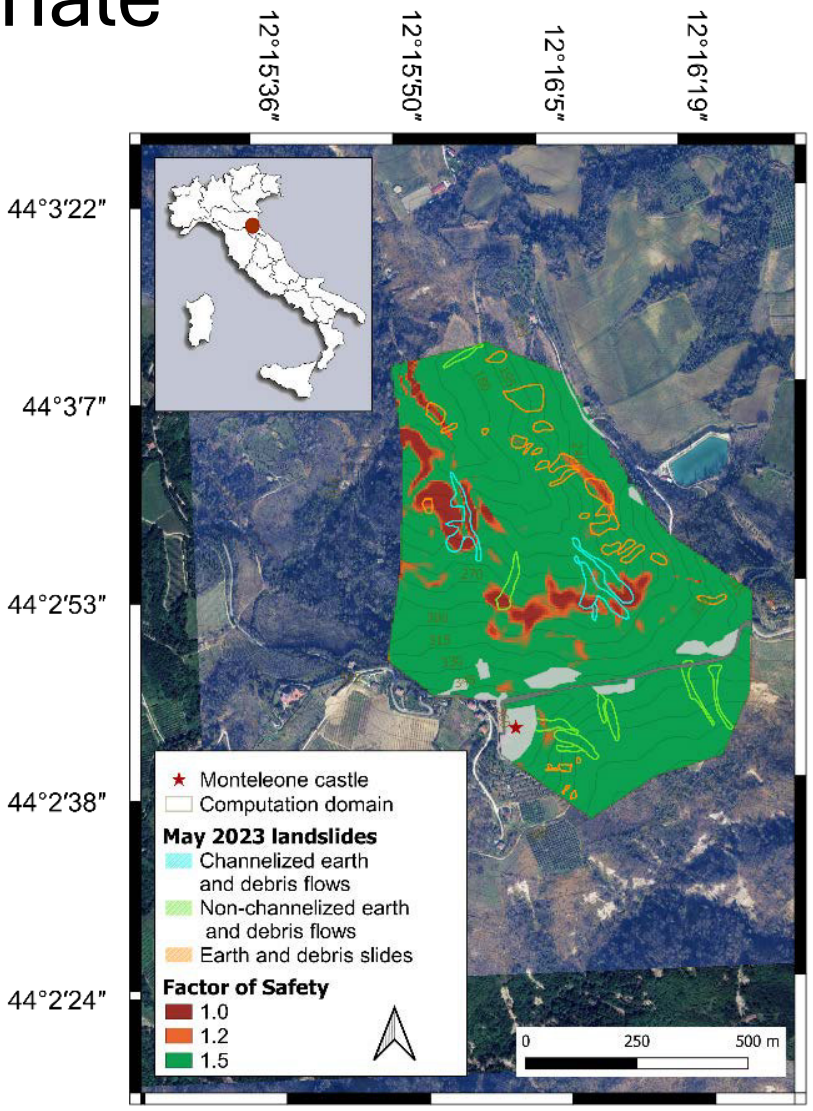


Mappa dei suoli e frane osservate nell'evento del 16-17 maggio 2023

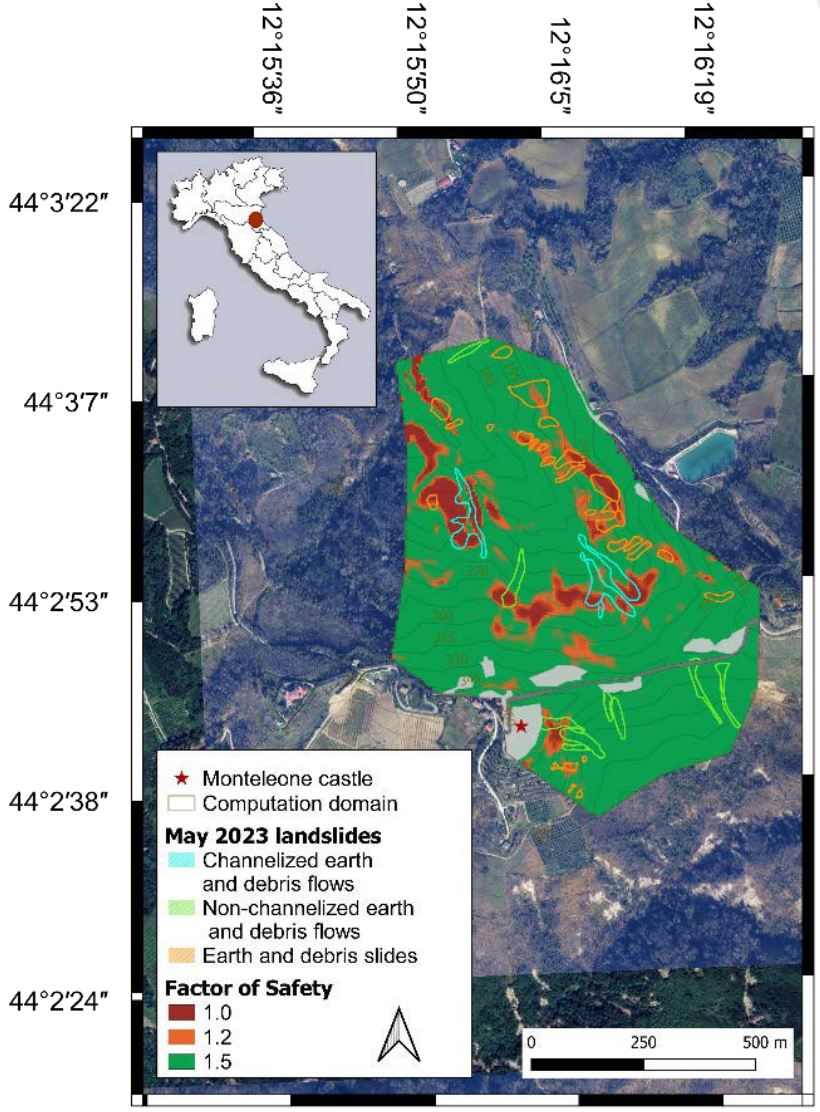
Scala territoriale

Area test in località Monteleone (5.65km²), Roncofreddo (FC)

DEM 5x5m



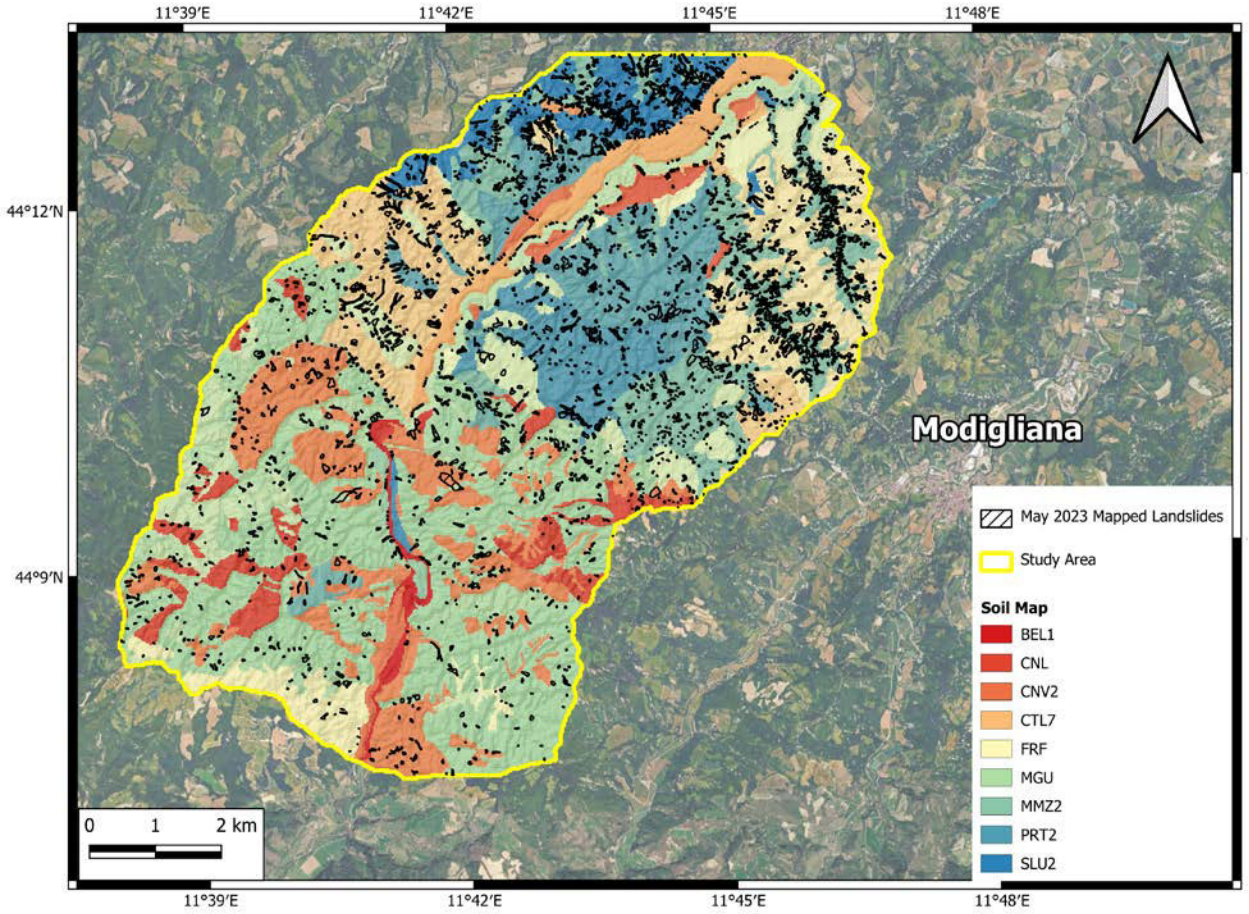
16/05/2023 ore 23:00

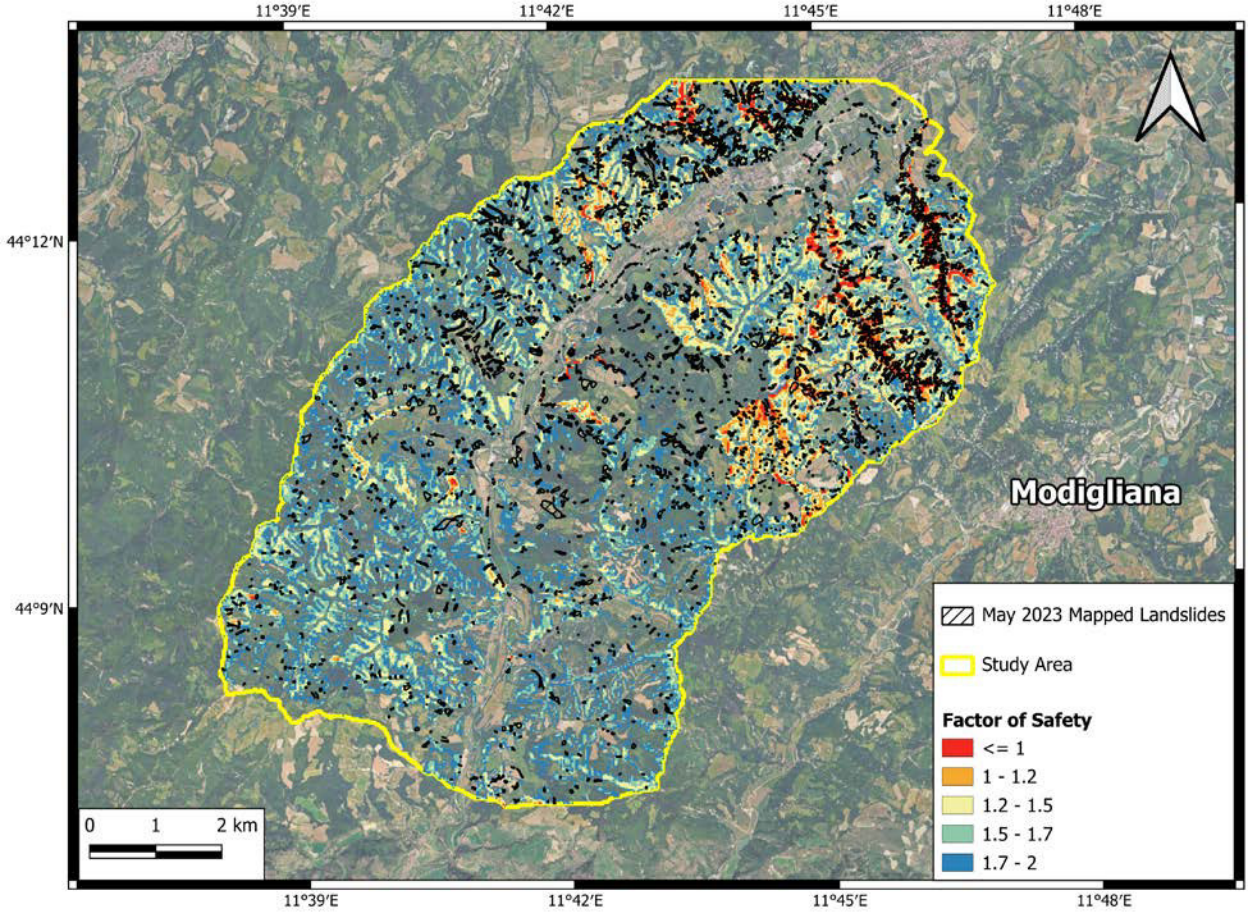


17/05/2023 ore 7:00

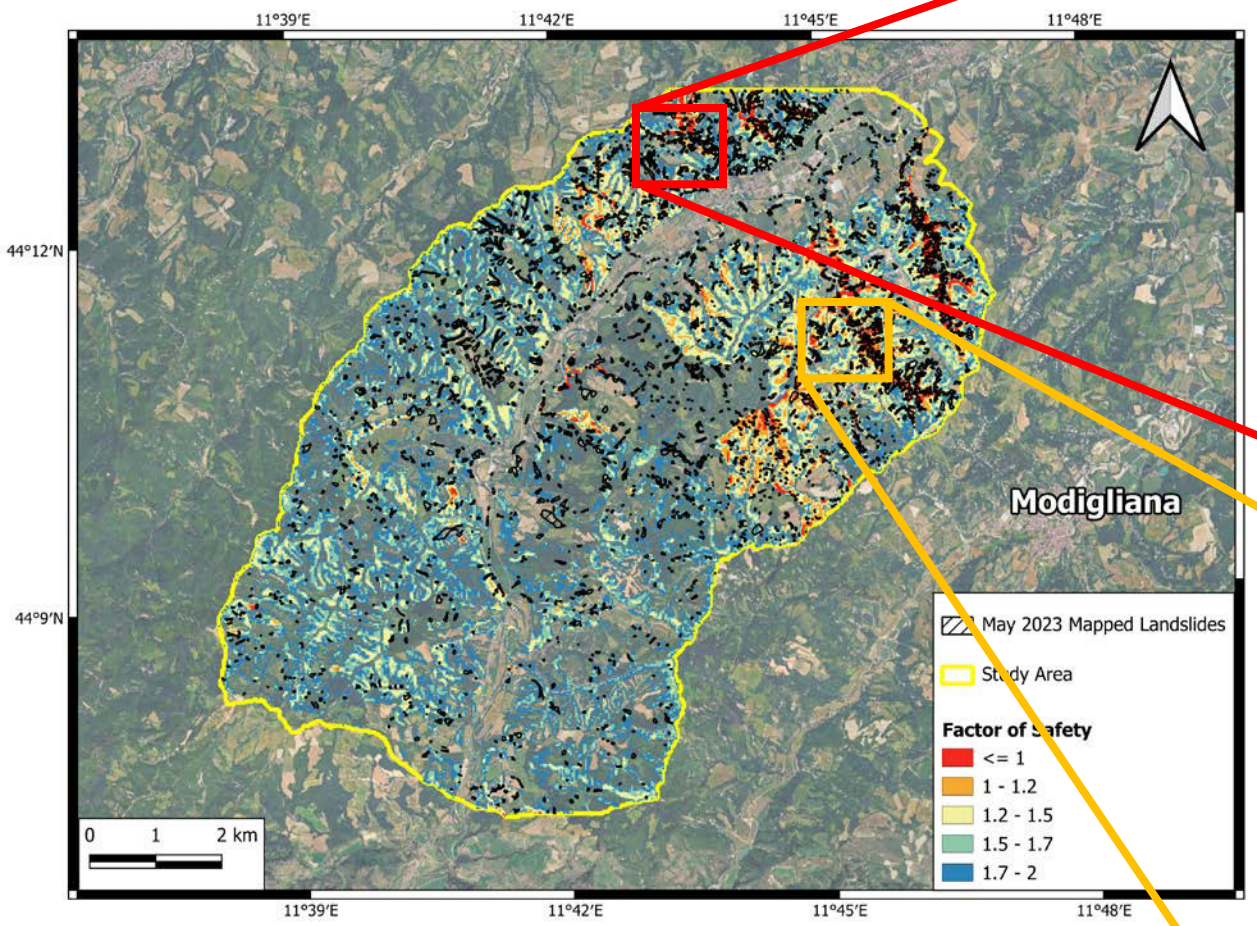
Scala territoriale

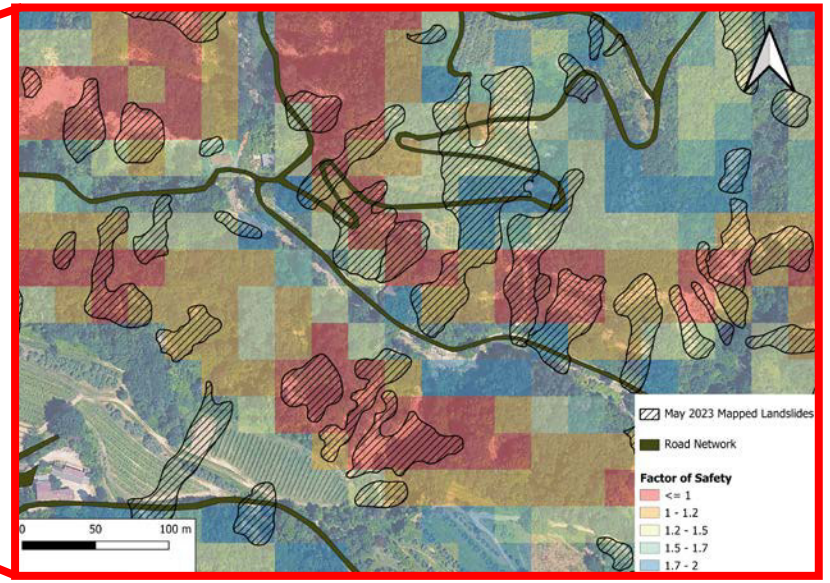
Area test di Modigliana (80 km^2) - DEM 25x25m

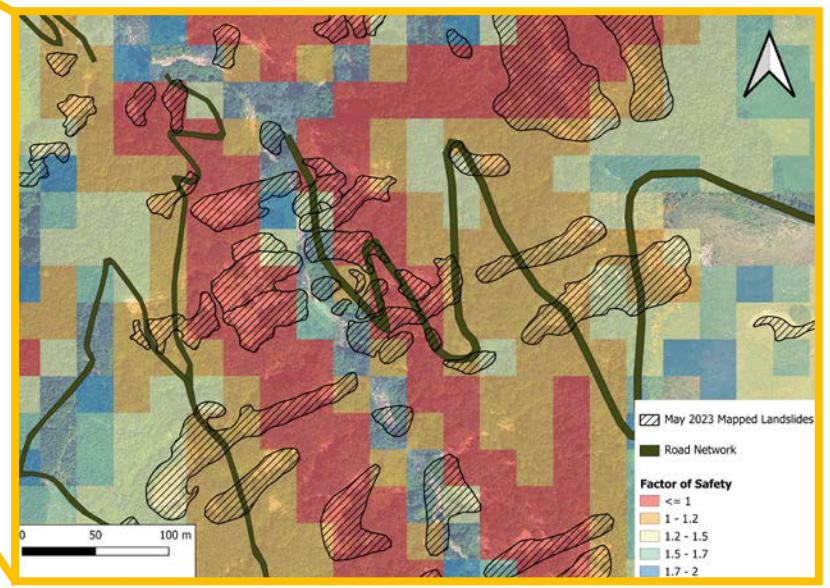




Scala territoriale







Conclusioni

- L'**approccio multiscala** è essenziale per valutare l'interazione tra frane e infrastrutture stradali: fenomeni diversi richiedono metodi specifici e una gerarchia di priorità, dal territorio al singolo pendio.

- Alla **scala del pendio**, le indagini geotecniche devono essere pianificate nel rispetto della normativa, per definire un modello affidabile e progettare opere di rinforzo e/o stabilizzazione.

- Alla **scala territoriale**, le frane superficiali indotte da pioggia possono essere analizzate mediante modelli distribuiti fisicamente basati che integrino terreno, precipitazioni e vegetazione.

- L'analisi di scenari futuri di pioggia e uso del suolo, mediante appropriati modelli come CRITERIA3D, può utilmente supportare la **pianificazione territoriale, la gestione delle reti stradali e la mitigazione del rischio**.

Grazie per l'attenzione!

Roberto Valentino
Professore Associato di Geotecnica
UNIVERSITÀ DI PARMA