



Autorità di Bacino  
Distrettuale dell'Appennino  
Meridionale

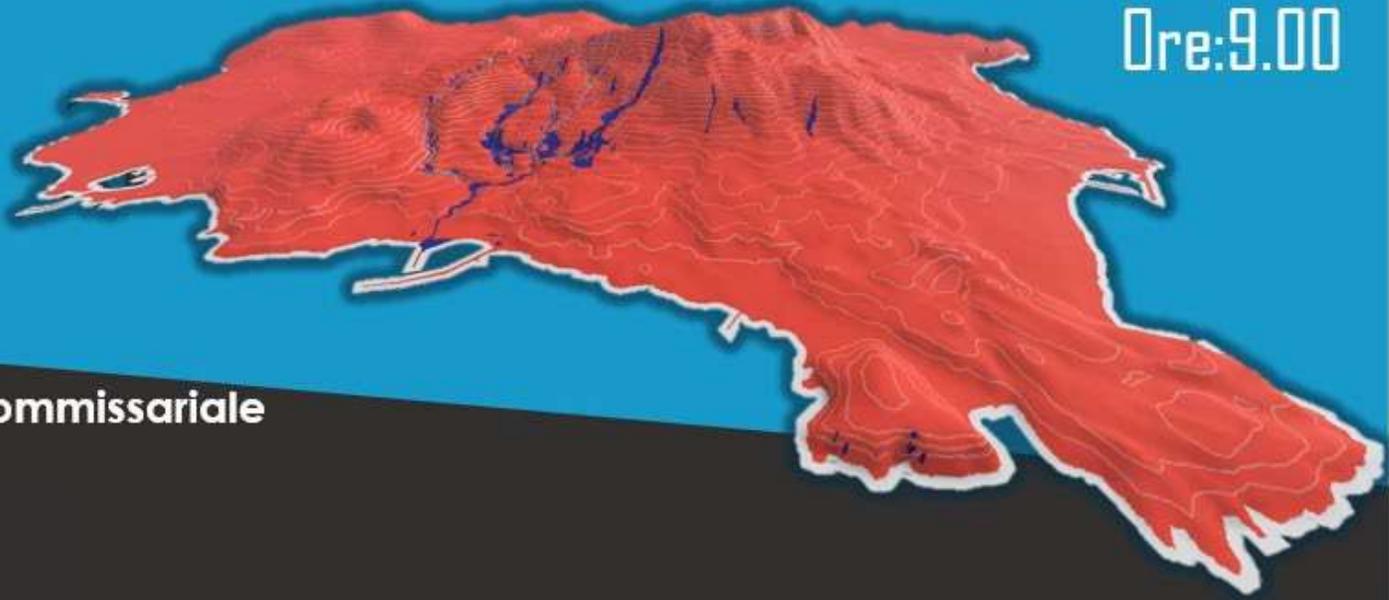


GIORNO  
**4**

# RISULTATI DELLE MODELLAZIONI PRELIMINARI DEI FLUSSI IPER-CONCENTRATI E STABILITÀ DEI VERSANTI

**6 febbraio 2025**  
Ore: 9.00

In memoria del Professore  
**PASQUALE VERSACE**



Piazza antica Reggia 18 - ISCHIA – Sede struttura Commissariale

## ASPETTI GEOTECNICI NELLA STABILITÀ DEI VERSANTI

**Francesco Silvestri**

(nonché Anna d'Onofrio, Giovanni Forte, Luca Pagano, Marianna Pirone, Antonio Santo et al.)

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

*Università di Napoli "Federico II"*



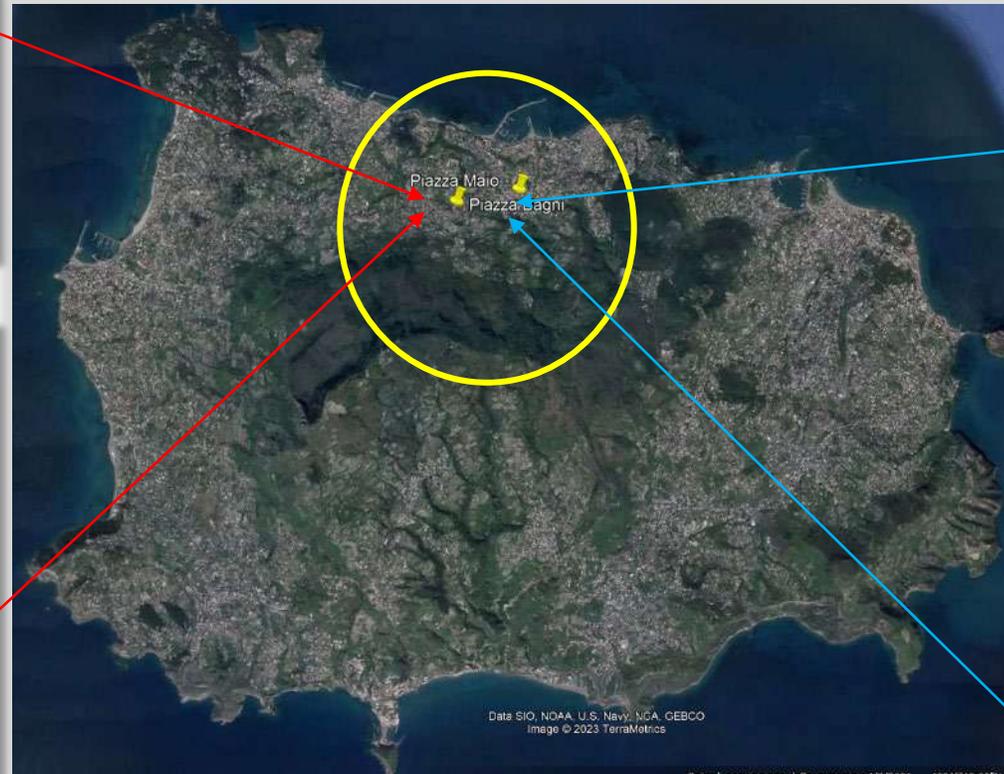
# Contenuti

---

- **Ischia come laboratorio multi-hazard sull'instabilità di versante**
- Fattori d'influenza: predisponenti, preparatori, d'innescio
- Effetti del grado di saturazione delle coltri sull'instabilità statica e sismica
- Analisi multi-scalare dell'instabilità in condizioni sismiche
- Conclusioni

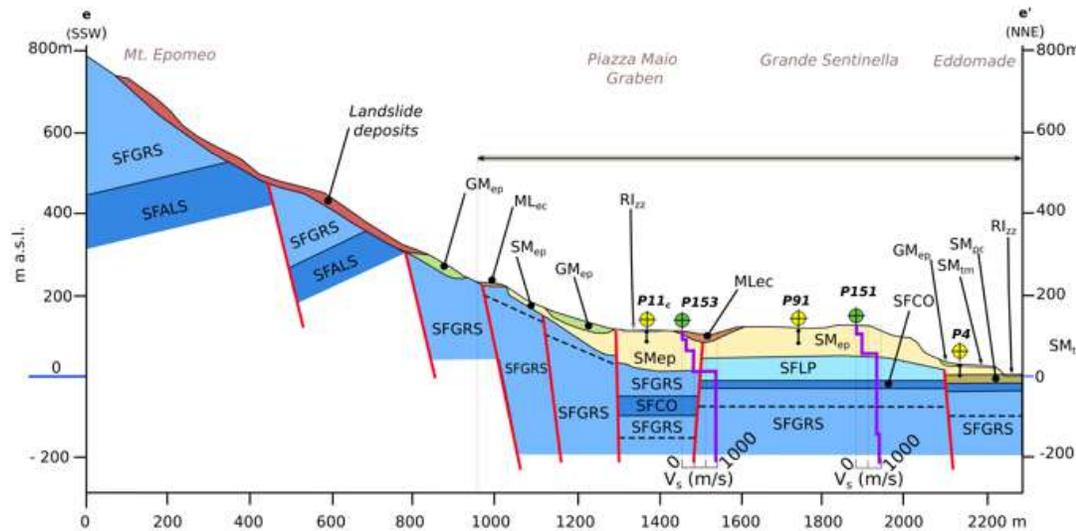
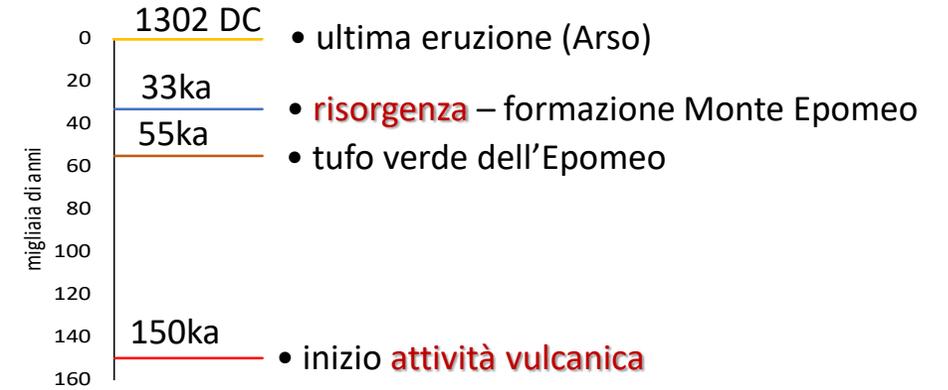
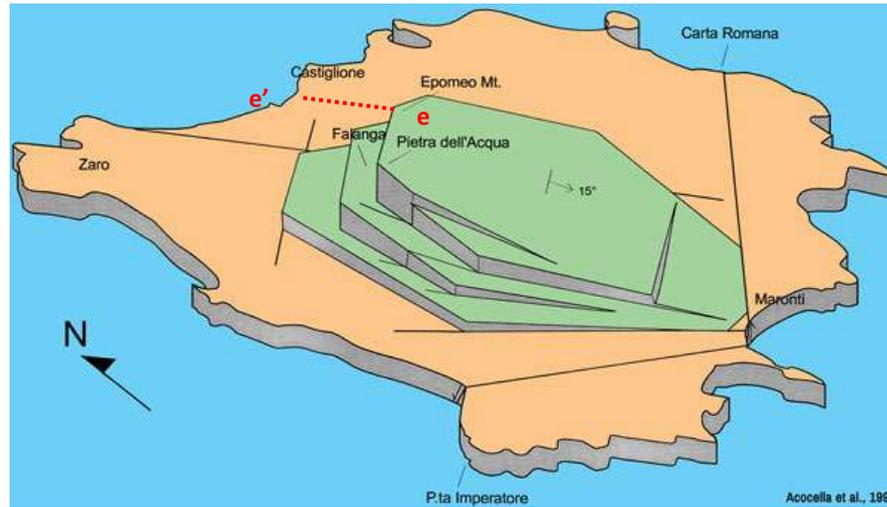
# Ischia: caso paradigmatico di multi-hazard in contesto vulcanico

Laboratorio peculiare per lo studio dell'interazione tra diversi geo-hazards



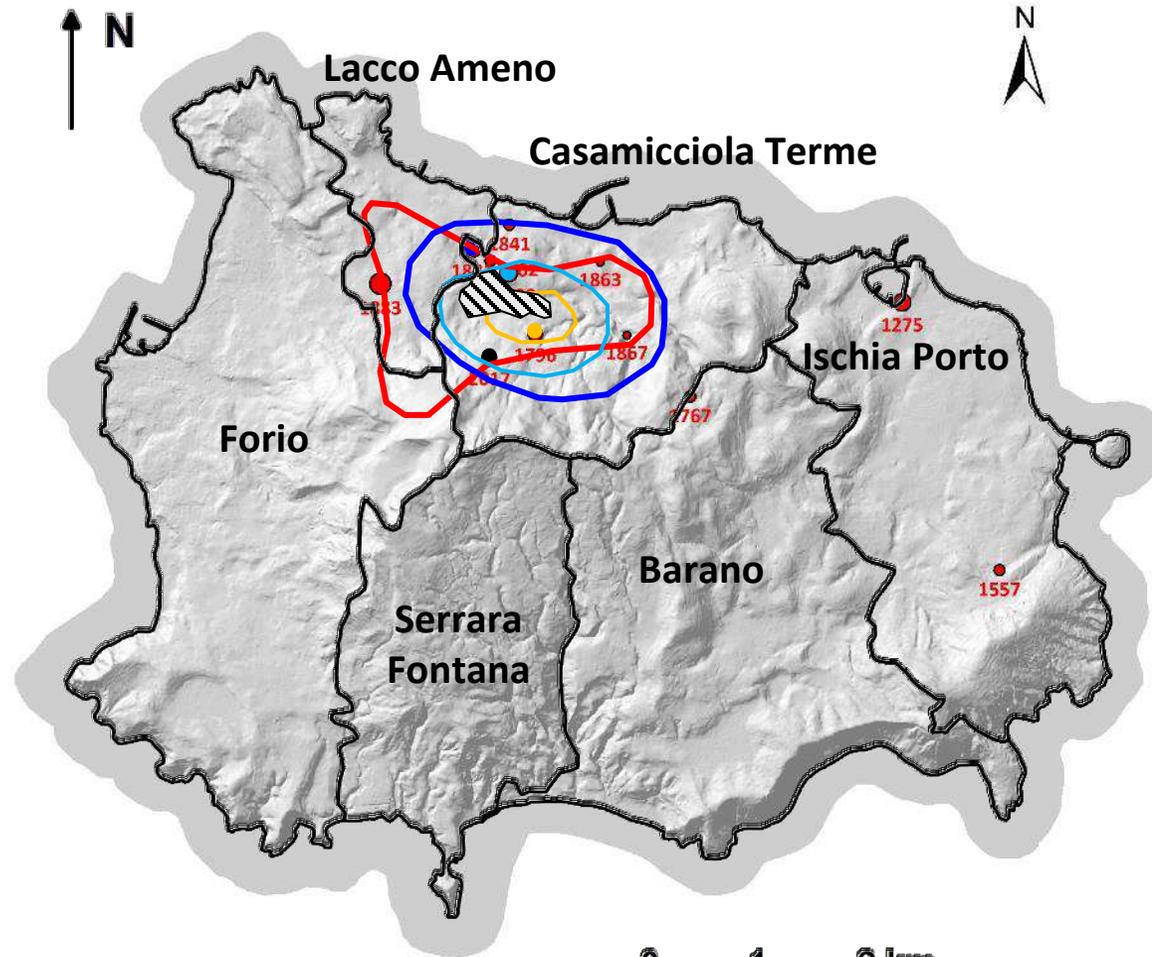
Eventi **sismici** e **franos**i reiterati e localizzati sempre nella stessa area!!!

# Solo coincidenze?



**Natura vulcanica e risorgenza** del blocco epomeico = fattori geodinamici di connessione tra gli hazard sismico e idrogeologico

# Ricorrenza dei terremoti storici



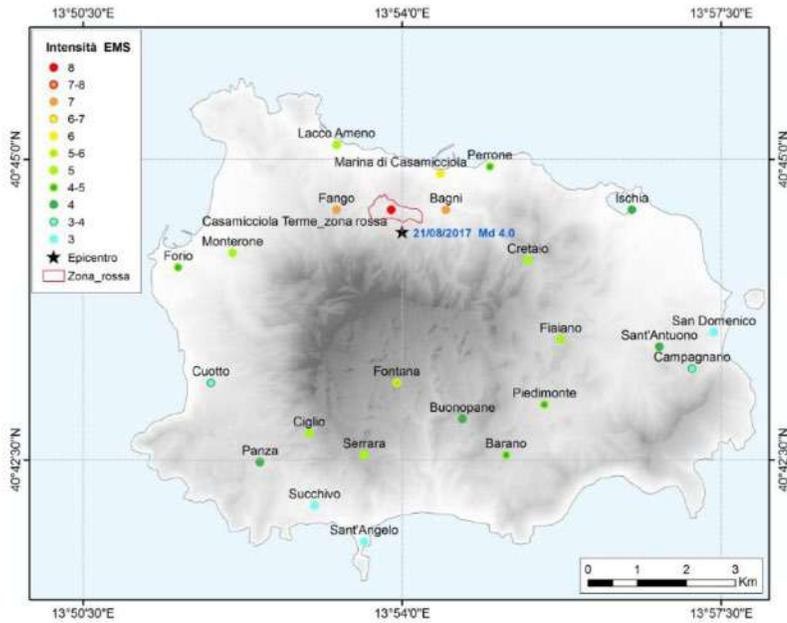
EQ	$M_w$	Intensità MCS
1275	4.01	VIII-IX
1557	3.5	VI-VII
1762	3.5	VI-VII
1767	3.5	VI-VII
1796	3.88	VIII
1828	4.01	VIII-IX
1841	3.25	V-VI
1863	2.87	IV
1867	2.99	IV-V
1881	4.14	IX
1883	4.26	IX-X
1980	4.37	V
2017	3.91	VIII

- Epicentri sistematicamente localizzati lungo le pendici a N dell'Epomeo e allineati in direzione E-W per 2 km circa
- Profondità ipocentrale entro i 2 km
- Magnitudo < 5 e intensità rapidamente ridotta con la distanza

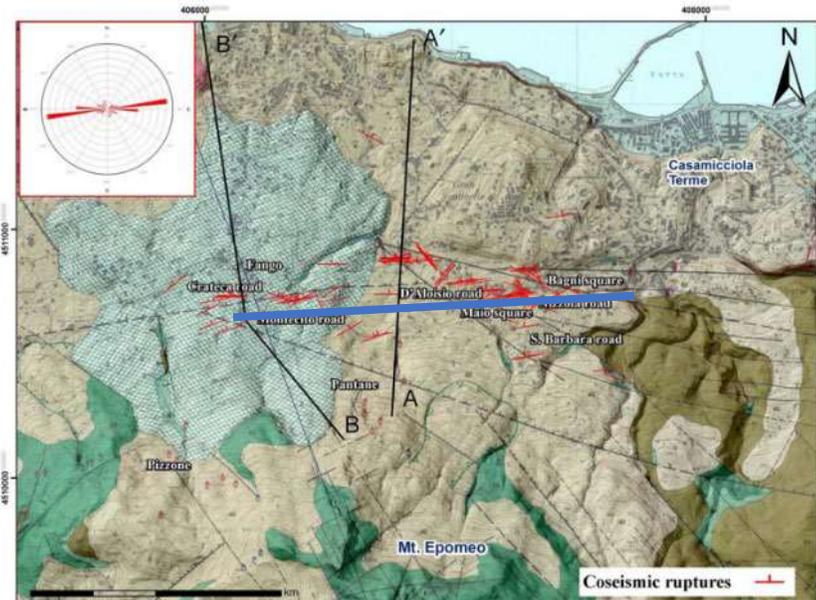
*(modificato da Alleanza et al., 2022)*

# Natura della sismicità dell'isola

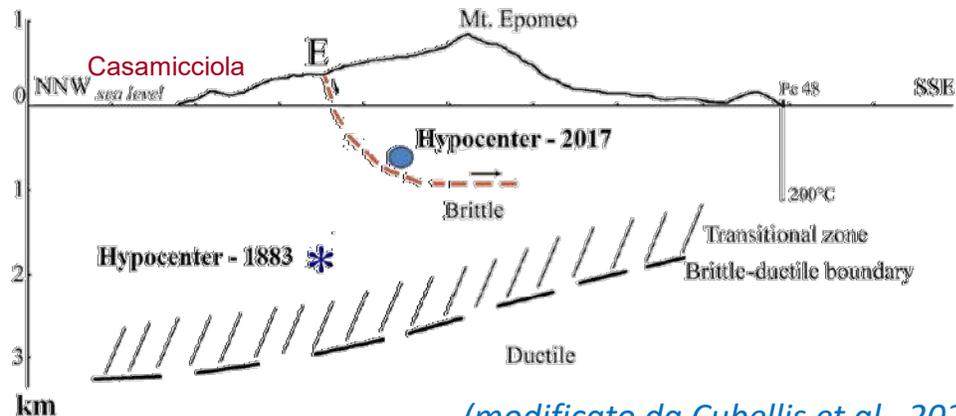
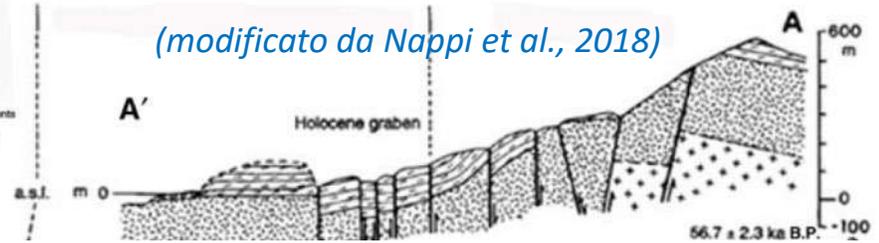
Intensità macrosismiche evento 21 agosto 2017 - Mw=3.9



(GdL INGV, 2017)



(modificato da Nappi et al., 2018)



(modificato da Cubellis et al., 2020)

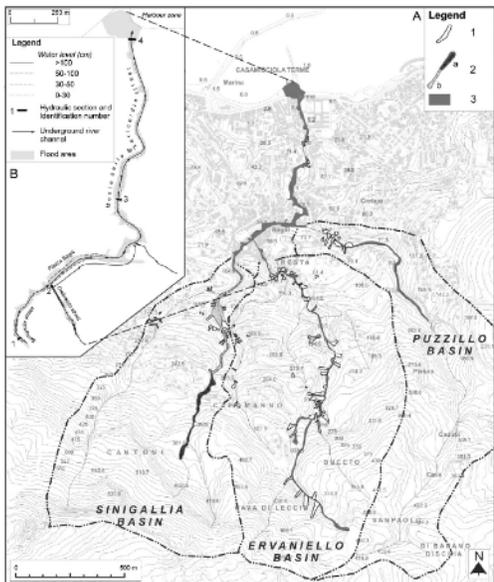
- Sismicità influenzata dalla natura vulcanica dell'isola
- Ipocentri superficiali e concentrati nella zona nord dell'isola dove lo strato sismogenetico fragile è caratterizzato da maggiore spessore
- A sud gli sforzi tettonici producono deformazioni viscosi piuttosto che fratture nella roccia (transizione fragile - duttile a bassa profondità)

# Ricorrenza dei fenomeni franosi e alluvionali

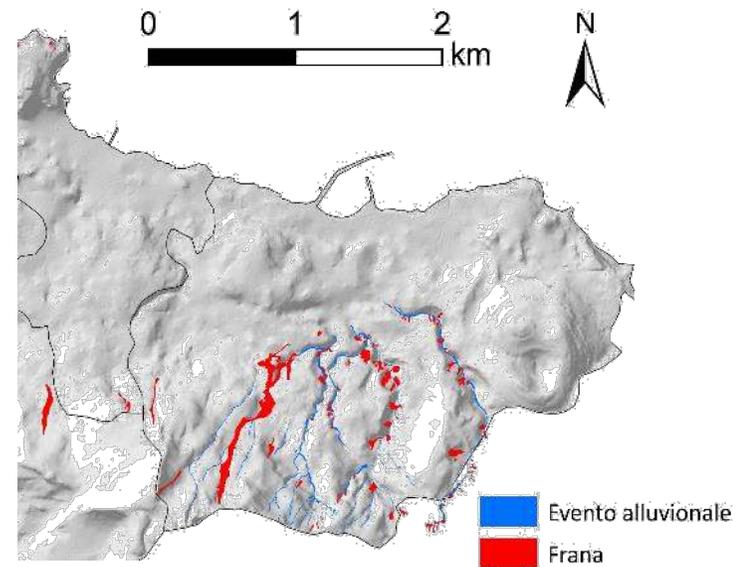
Novembre 2009



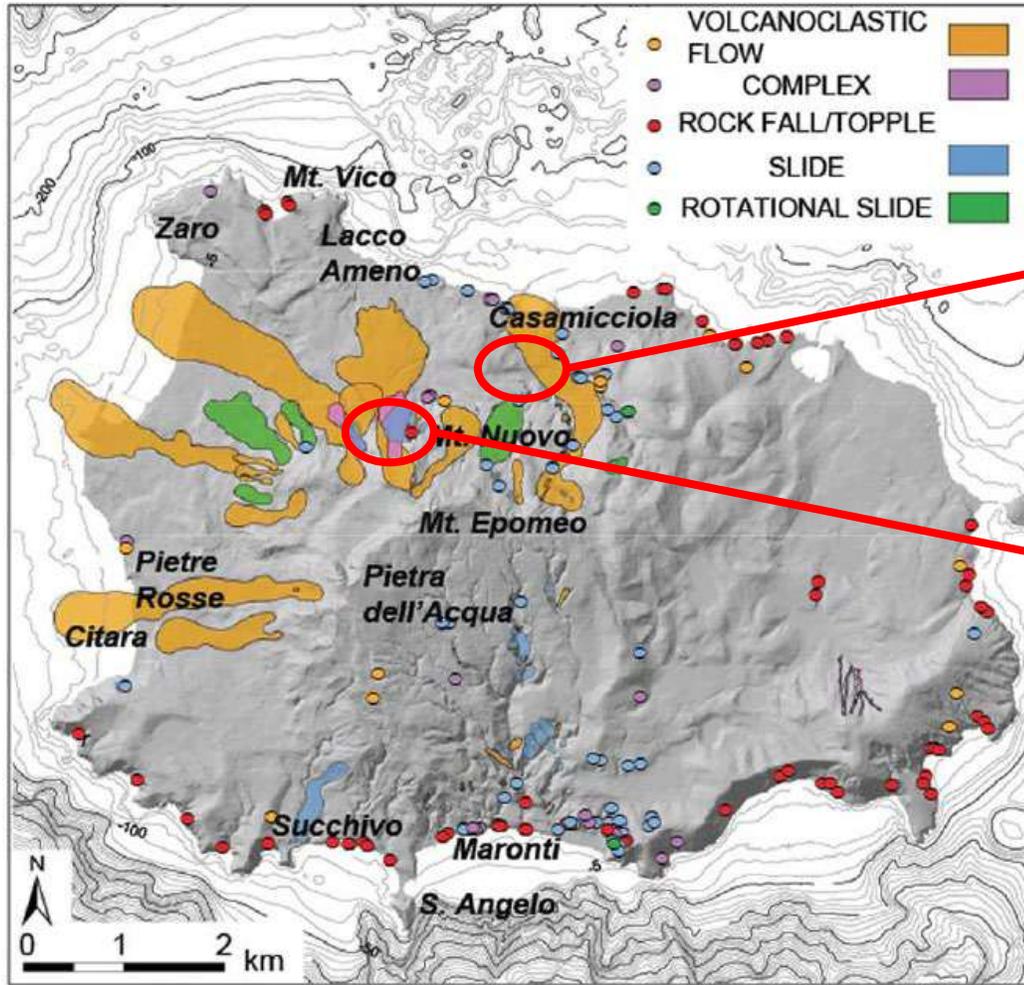
(Santo et al., 2012)



Novembre 2022



# Natura dei fenomeni franosi



(Mele & Del Prete, 1998)



(Silva et al, 2021)

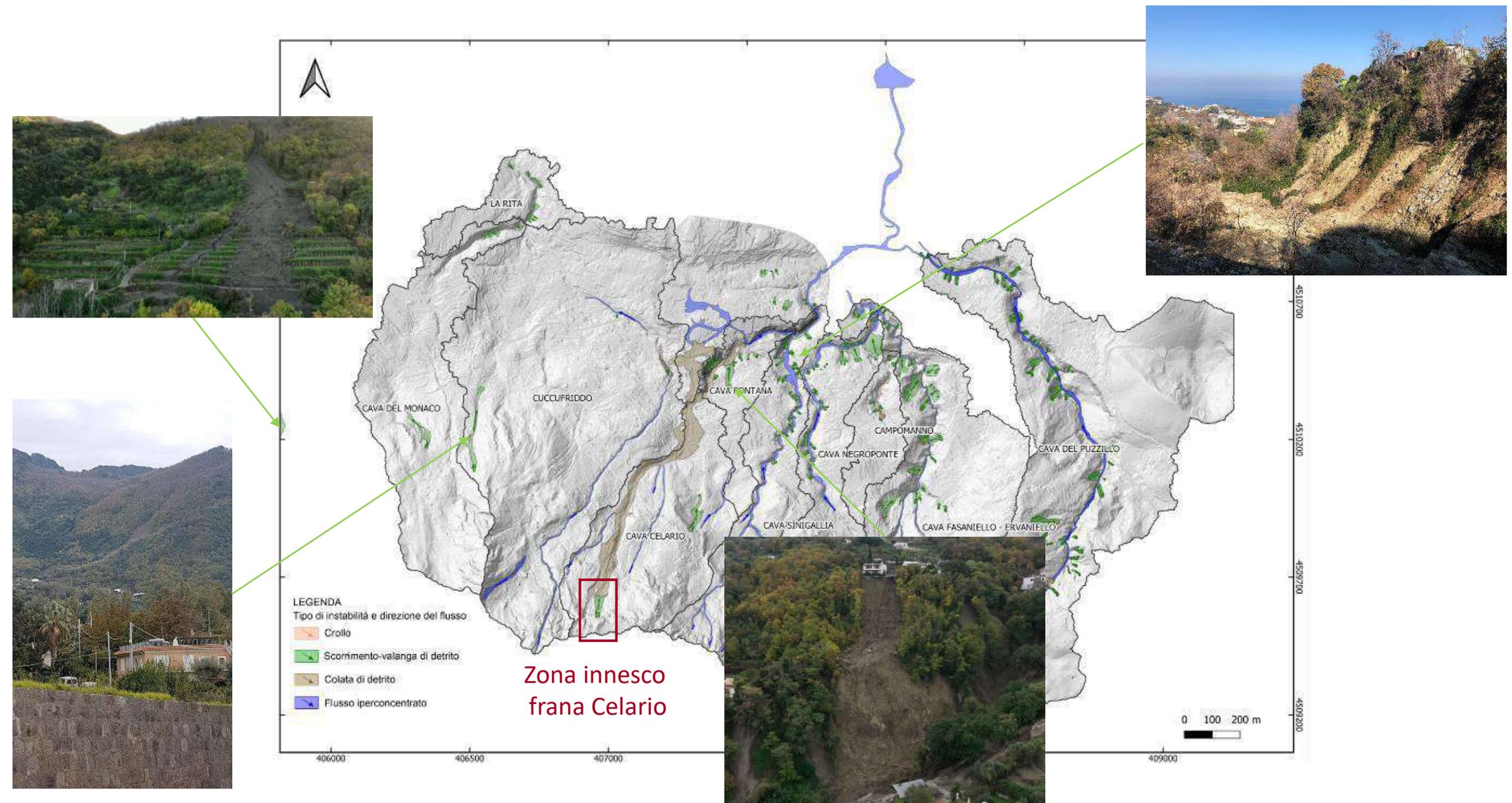
(Nappi et al., 2018)

Tufo verde intensamente fratturato a causa della risorgenza

Valanghe detritiche (antiche)

Scorrimenti e ribaltamenti di grandi blocchi poliedrici isolati (recenti)

# Fenomeni di scorrimento osservati il 26.XI.2022

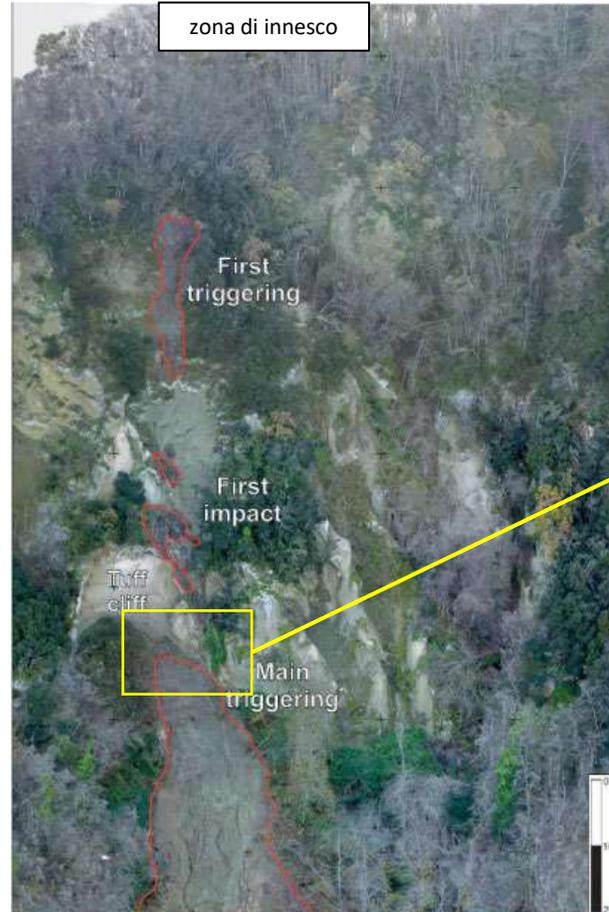
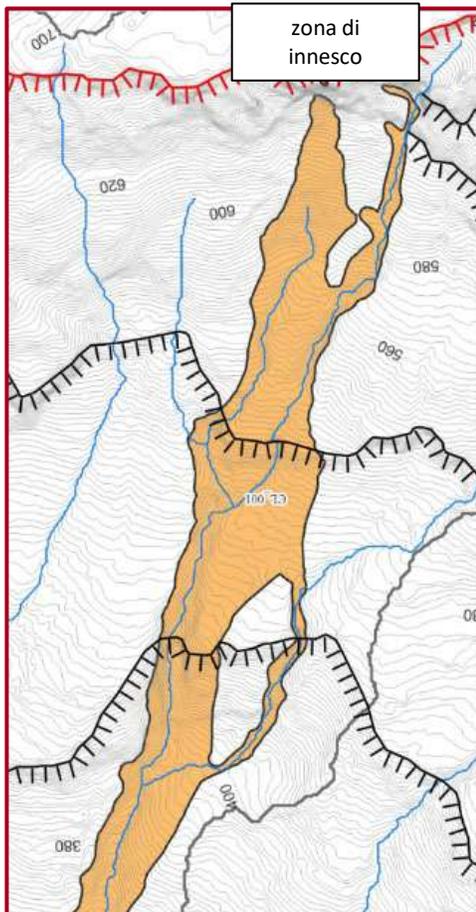


# Zona d'innescò sommitale della frana di cava Celario

**Discontinuità morfologiche:**

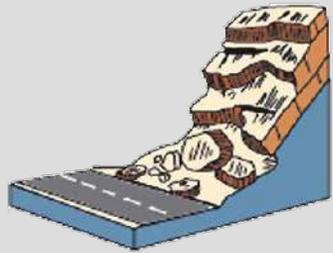
 Scarpata sommitale di origine strutturale localmente sede di innescò della frana di Via Celario

 Scarpata di origine strutturale di altezza maggiore di 10 m localmente sede di accelerazione e amplificazione della frana di Via Celario



# Classificazione cinematica tradizionale e in condizioni sismiche

Statica → Varnes (1978)

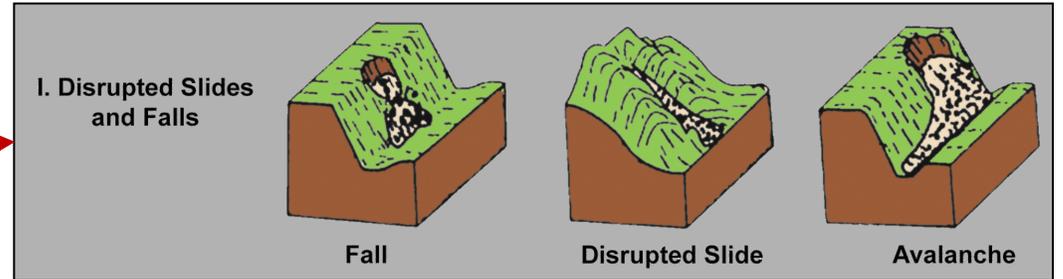


Crolli

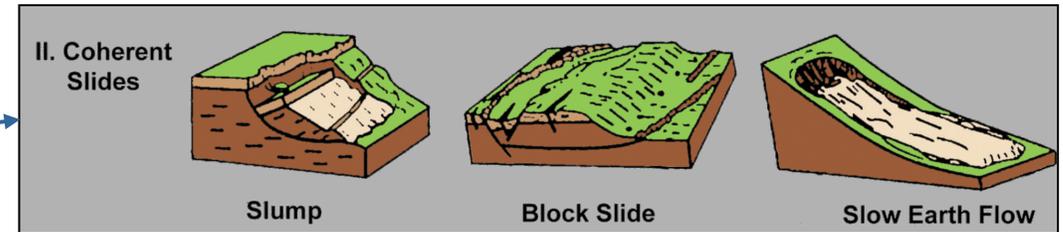


Ribaltamenti

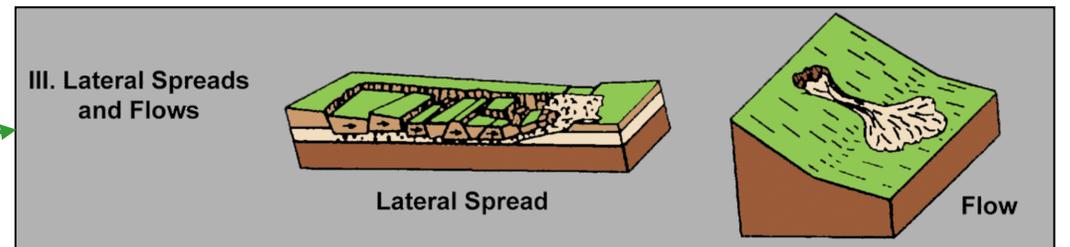
Sismica → Keefer & Wilson (1989)



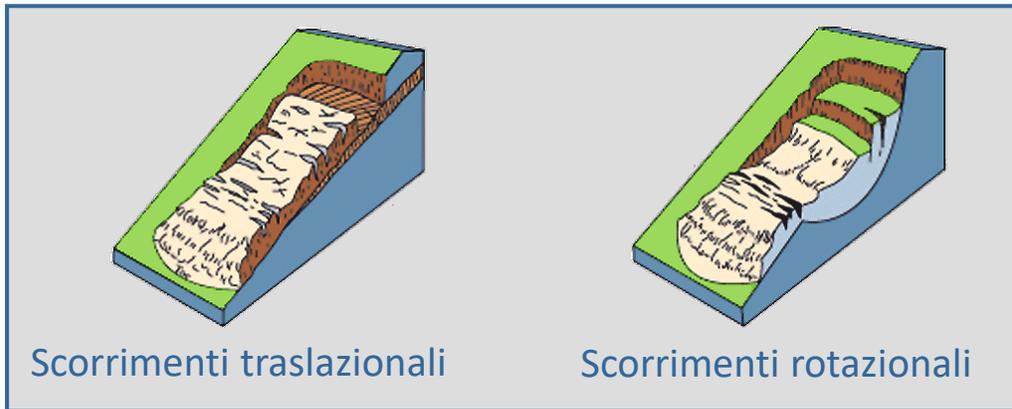
**Cat. I:** **crolli e ribaltamenti** (con disgregazione della massa in frana):  
- in pendii acclivi, movimento veloce, in genere superficiale



**Cat. II:** **scorrimenti** (senza disgregazione della massa in frana):  
- sia in roccia che in terreni sciolti;  
- anche colate lente (in pendii da moderatamente acclivi ad acclivi)



**Cat. III:** **espansioni laterali e colate rapide** (frane 'fluide'):  
- movimenti rapidi in pendii da poco a moderatamente acclivi



# Il progetto MASLIDE: una panacea o una ricerca applicata?

## Multi-level Approach for the Study of Landslides Induced by Earthquakes

Workpackage	Task	Attività	I sem	II sem	III sem	IV sem
WP1 Acquisizione dati esistenti, indagini sperimentali e rilievi in situ	T1.1	Acquisizione e sintesi di dati topografici, geologici e geotecnici esistenti				
	T1.2	Rilevamento di dettaglio dei siti di studio ed indagini in situ				
	T1.3	Prove geotecniche di laboratorio				
WP2 Elaborazione dati sismici e interferometrici	T2.1	Generazione mappe di scuotimento sismico per analisi di livello II				
	T2.2	Generazione/selezione di accelerogrammi sintetici/naturali per analisi dinamiche a Livello III e IV				
	T2.3	Elaborazione dati interferometrici				
WP3 Analisi di stabilità multilivello						

Home / CRONACA / Instabilità sismica, al via l'indagine con la "regia" della Federico II

CRONACA

## Instabilità sismica, al via l'indagine con la "regia" della Federico II

L'Ateneo ha approvato il finanziamento di 40mila euro per il progetto biennale di studio del sottosuolo nei territori isolani colpiti dal sisma del 2017. La soddisfazione del Commissario Schilardi, che finanziò la microzonazione, base da cui partirà l'attività di ricerca caratterizzata da un'inedita metodologia interdisciplinare

Redazione - 21 Gennaio 2021

0 654 3 minuti di lettura



In attesa di risposta da...

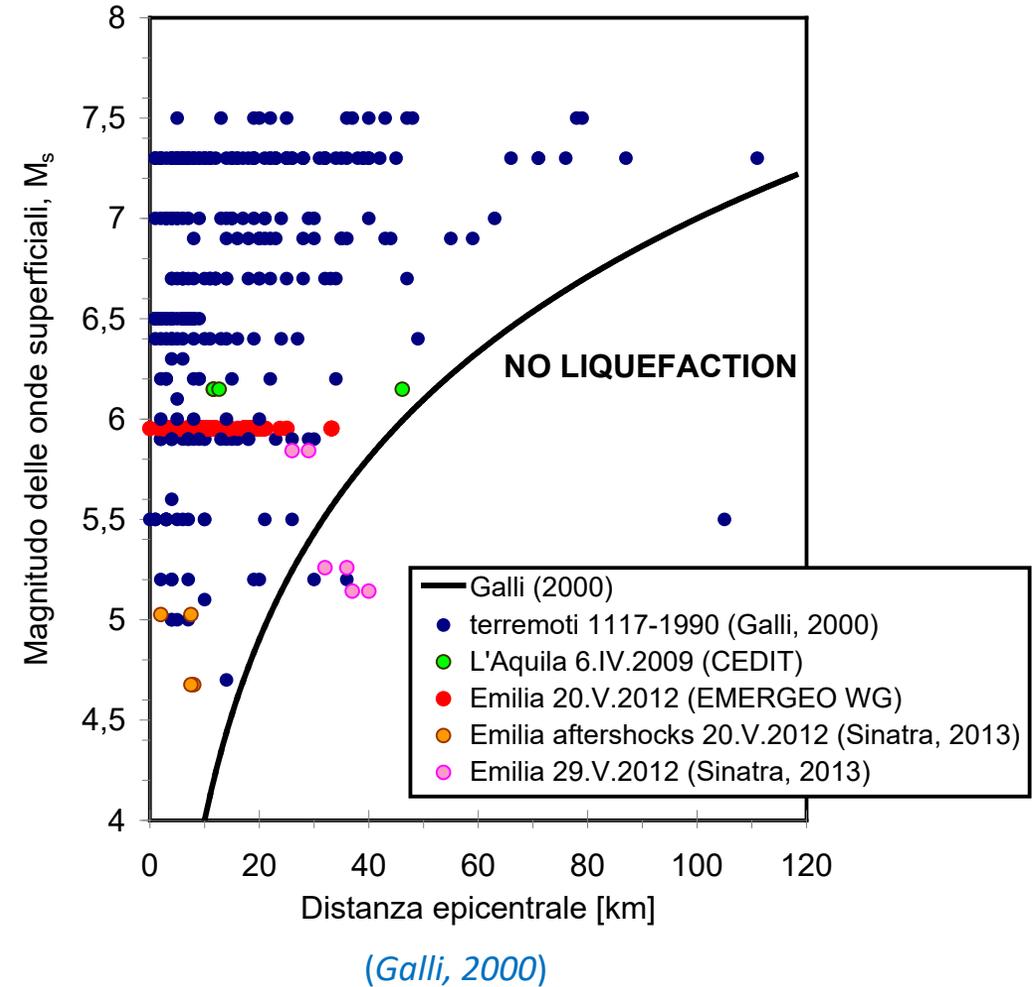
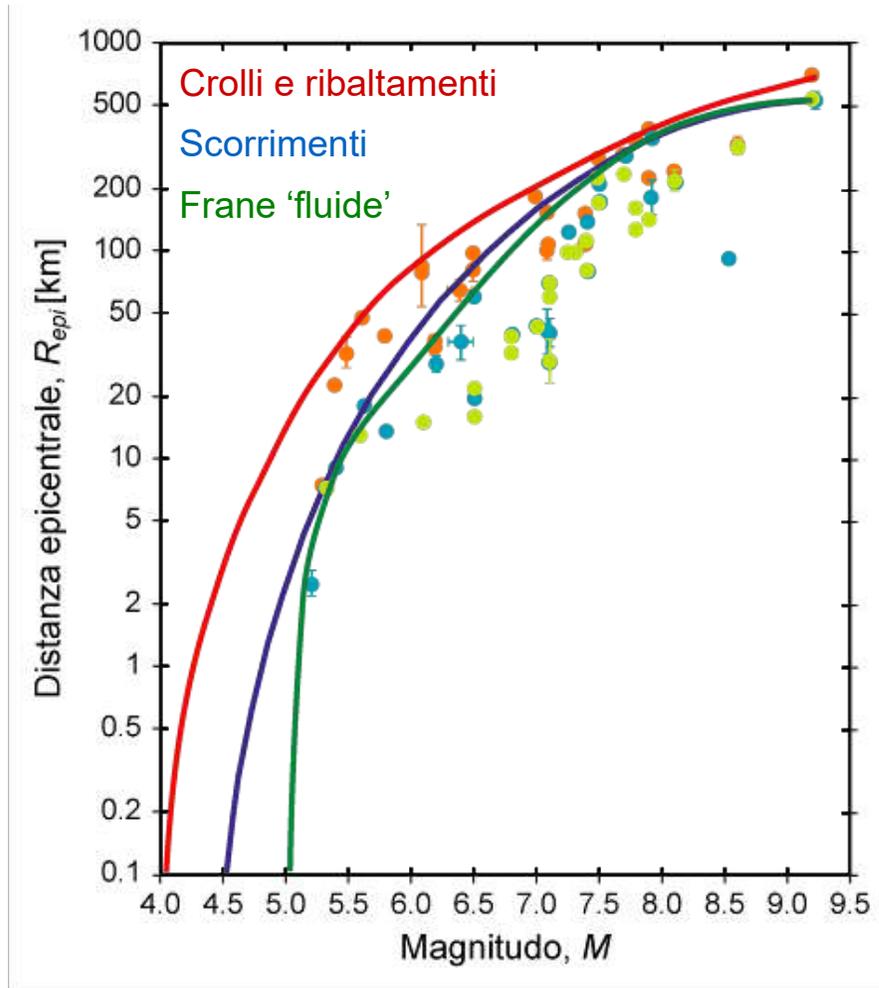
# Approccio multi-scalare per lo studio dell'instabilità sismica

Livelli I-II tipici della scala territoriale, Livelli III-IV applicabili alla scala del singolo sito/versante

Livello	Metodo di analisi	Moto sismico di riferimento	Legame costitutivo	Indagini e prove geotecniche	Risultati tipici
I	Criteri di screening	Magnitudo e distanza	-	-	Fenomeno si/no
II	Pseudo-statica Metodi empirici	Accelerazione massima $a_{max}$ Magnitudo Altri parametri sintetici del moto	Rigido-plastico Effetti deformabilità	Tradizionali in sito e lab. Misure di $V_s$	Coefficiente di sicurezza (LIQ, STP) Spostamenti (STP)
III	Dinamica semplificata	Accelerogramma (-i) $a(t)$	Mezzo monofase Lineare equivalente (LIQ) Rigido-plastico (STP)	c.s. più Prove cicliche/dinamiche in laboratorio	Accelerogrammi Spostamenti Tensioni totali Deformazioni
IV	Dinamica avanzata		Mezzo polifase Elasto-plastico		c.s. più Pressioni interstiziali Tensioni efficaci

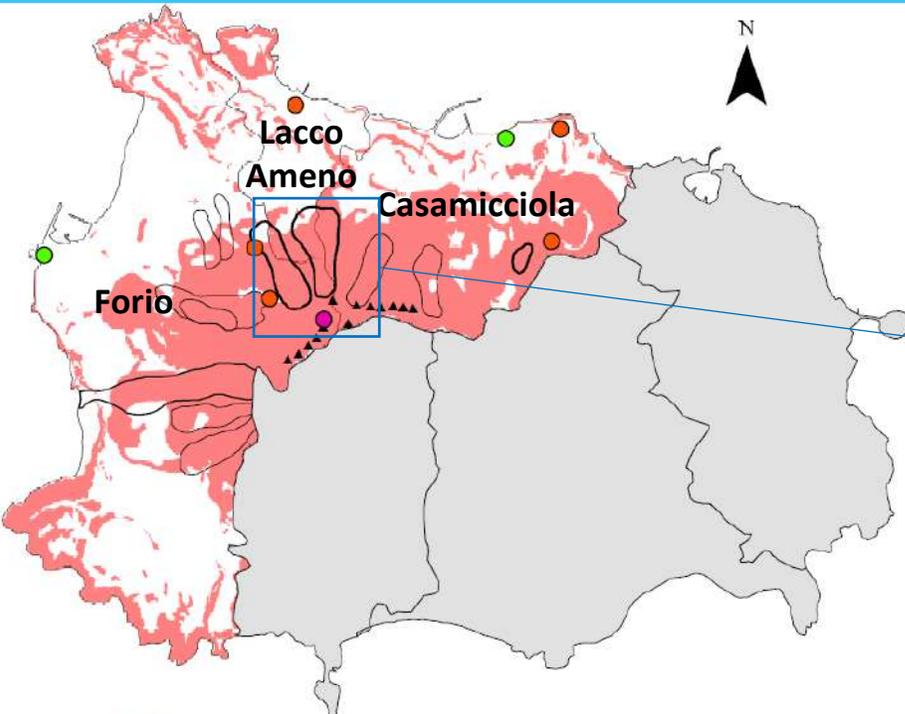
STP = Stabilità dei pendii; LIQ = Liquefazione (*Silvestri & d'Onofrio, 2014*)

# Criteri di screening magnitudo-distanza



A Ischia, il massimo terremoto storico (1883) ha avuto  $M = 4.3$ , ma...

# I fenomeni di instabilità sismica indotti dal terremoto del 1883



- instab\_PAI\_IFFI **48% dell'area di studio!!!**
- ▲ crolli dalle scarpate del Mt. Epomeo (eventi 1881, 1863, 1828) (Guadagno & Mele, 1995)
- colate di detrito / scorrimenti traslativi (Guadagno & Mele, 1995)
- scorrimenti traslativi evento 1883 (Guadagno & Mele, 1995)
- fratture evento 1883 (CEDIT)
- frane evento 1883 (CEDIT)
- effetti multipli evento 1883 (CEDIT)

Frane nella zona di Fango  
(nomen omen!)



(Johnston-Levis, 1885)

Crolli e fratture vecchi e nuove



(Ferretti, 1883)

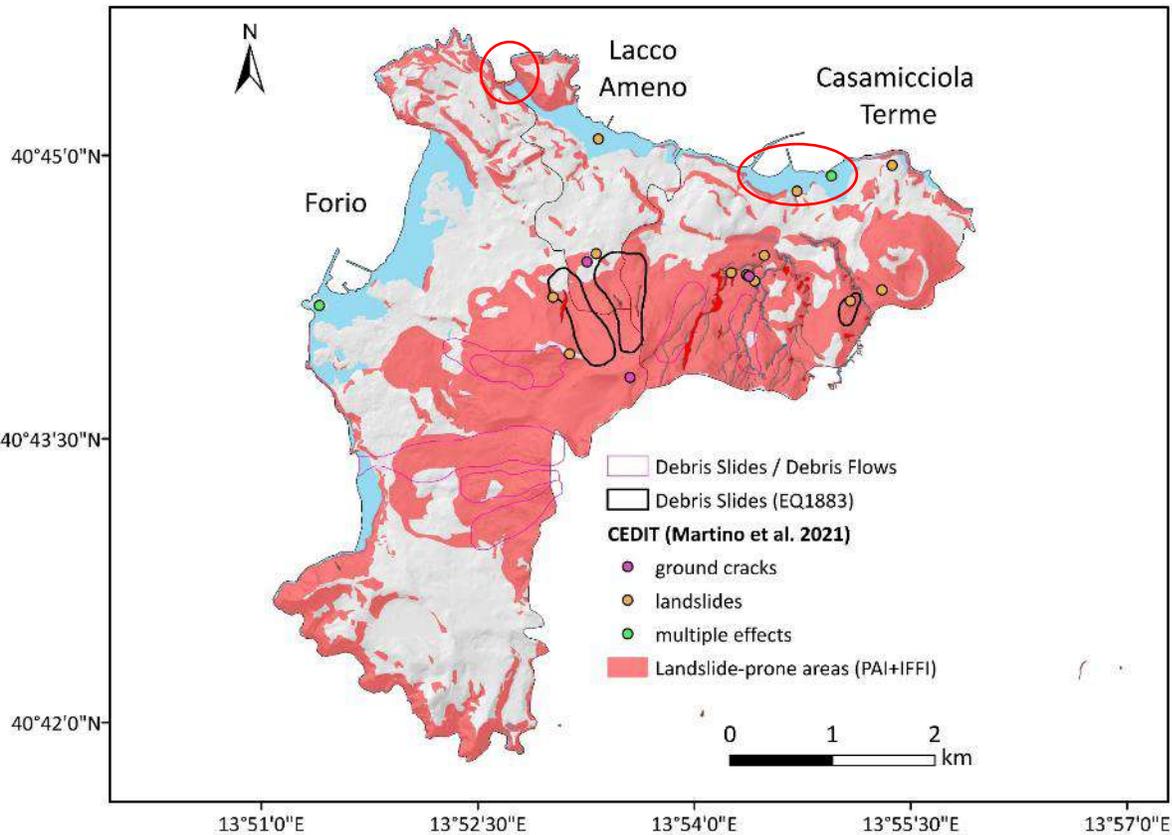
(Nappi et al, 2018)

Perhaps one of the most interesting phenomena accompanying the Ischian earthquakes, and sometimes taking place spontaneously without their aid, is the **occurrence of landslips, and the detachment of rocks.** Anyone

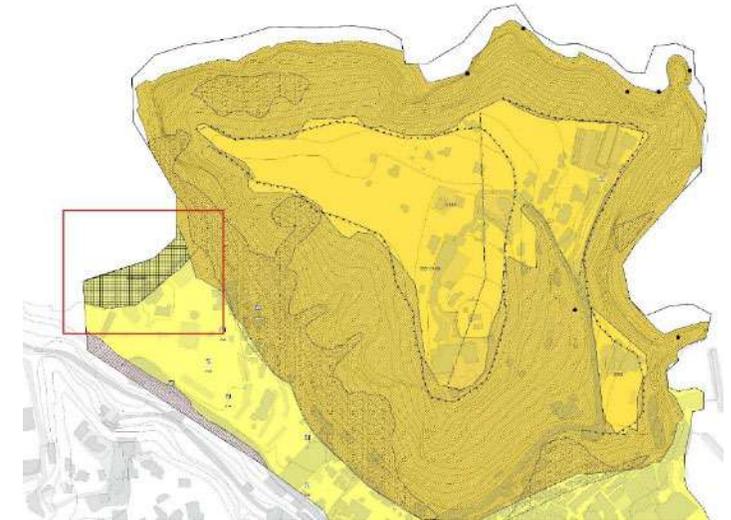
From the incoherent nature of this latter, and the enfeebled support of superficial vegetation, a very extensive mass was detached by the earthquake and swept down into the gorge below, thoroughly blocking it up. The crumbling away of the raw surface continued, and even at present small landslips continually occur. **Some weeks after the earthquake, when some torrential rains fell over the island, much of this material was swept out of the gorge, inundating the lower parts of Casamicciola with volcanic mud or « lava d'acqua ».**

(da Johnston-Levis, 1885)

# Inventario complessivo dei fenomeni di instabilità + aree liquefacibili



Spiaggia di San Montano



## Conclusioni

Per tutte le motivazioni sopraelencate, vista l'incertezza e la sovra-semplificazione del metodo per la verifica della suscettibilità alla liquefazione, l'applicazione delle linee guida relative alla liquefazione nel comune di Casamiciola Terme oggetto dell'Ordinanza n.1 del 28 novembre 2018 conduce alla scelta di non definire nella carta delle MOPS zone di attenzione per liquefazione.

Si rimanda ad ulteriori approfondimenti da effettuarsi anche previa esecuzione di nuove indagini e test di laboratorio nelle aree indicate di seguito in Figura 169 che corrispondono alla fascia settentrionale tra la linea di costa a nord e i terrazzamenti a sud.

Marina di Casamiciola

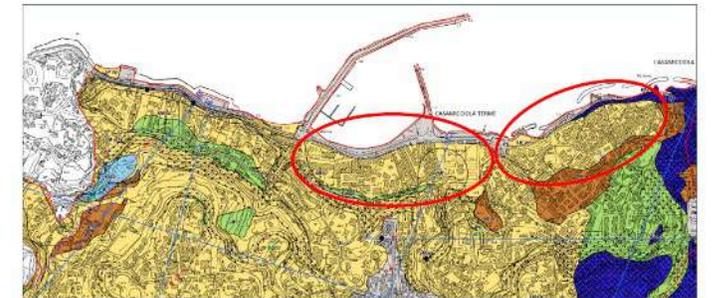


Figura 169 - Quadro d'insieme delle aree necessarie di approfondimento per le verifiche a liquefazione, in aree cerchiare in rosso.

# Quale approccio 'multi-hazard' per la valutazione del rischio frana?

**Classifica delle possibili relazioni di interazione tra gli hazard** (da Gill e Malamud, 2014, 2016)

- Hazard che innesca un secondo hazard
- Hazard che modifica la probabilità di occorrenza di un secondo hazard
- Hazard che innesca un secondo hazard in presenza di un evento catalizzatore
- Contemporaneità di due hazard

**Relazioni di interazione caratterizzate da probabilità di occorrenza anche molto diverse tra loro!**

odg: Myrs, kyrs

odg: mesi, anni

odg: giorni, ore

tempo

**Fattori predisponenti**: morfologia, stratigrafia, idrogeologia, litologia, resistenza

**Fattori preparatori**: stagionalità del regime di pressioni nelle coltri piroclastiche

**Fattori d'innescio**: sisma, eventi idro-meteorici



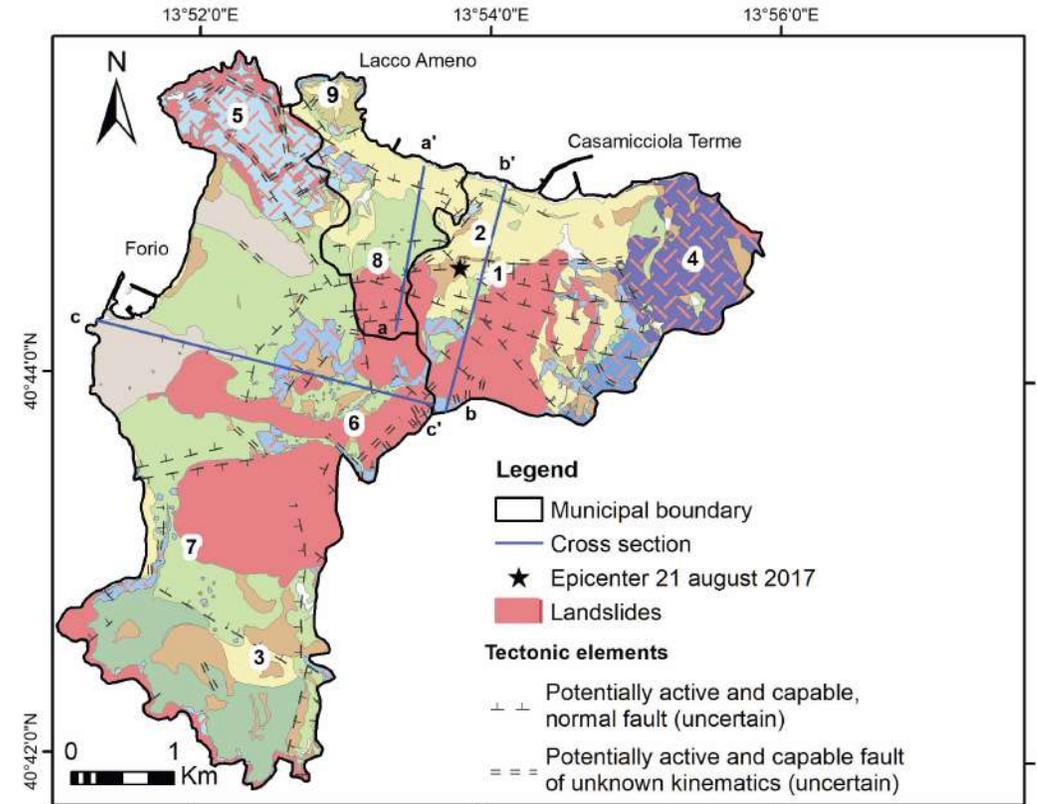
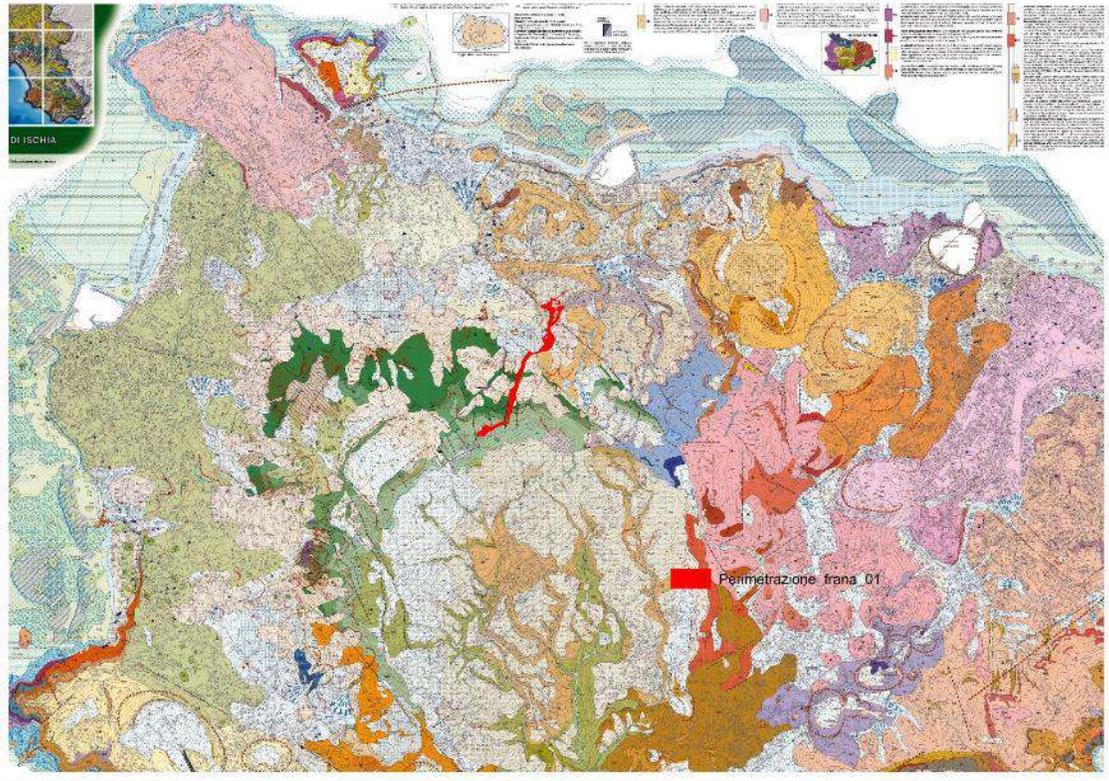
**Come la variabilità delle condizioni idro-meteoriche può influenzare l'instabilità sismica?**

# Contenuti

---

- Ischia come laboratorio multi-hazard sull'instabilità di versante
- **Fattori d'influenza: predisponenti, preparatori, d'innescio**
- Effetti del grado di saturazione delle coltri sull'instabilità statica e sismica
- Analisi multi-scalare dell'instabilità in condizioni sismiche
- Conclusioni

# Fattori predisponenti - Legenda geo-litologica adottata per la MS



## Soil covers

- Gravel-sized epiclastic deposits (GCep; GMep,tm)
- Gravel-sized pyroclastic deposits (GWsc,pc)
- Silt and sandy colluvial deposits (MLec, SMec)
- Anthropic deposits (Rlzz)
- Sandy-silty epiclastic deposits (SMep,pi,sp,fd,cd,tm; SWzz)

Ashy and Pumiceous pyroclastic deposits (SMig,pc)

Lahar deposits (SMlh, SWlh)

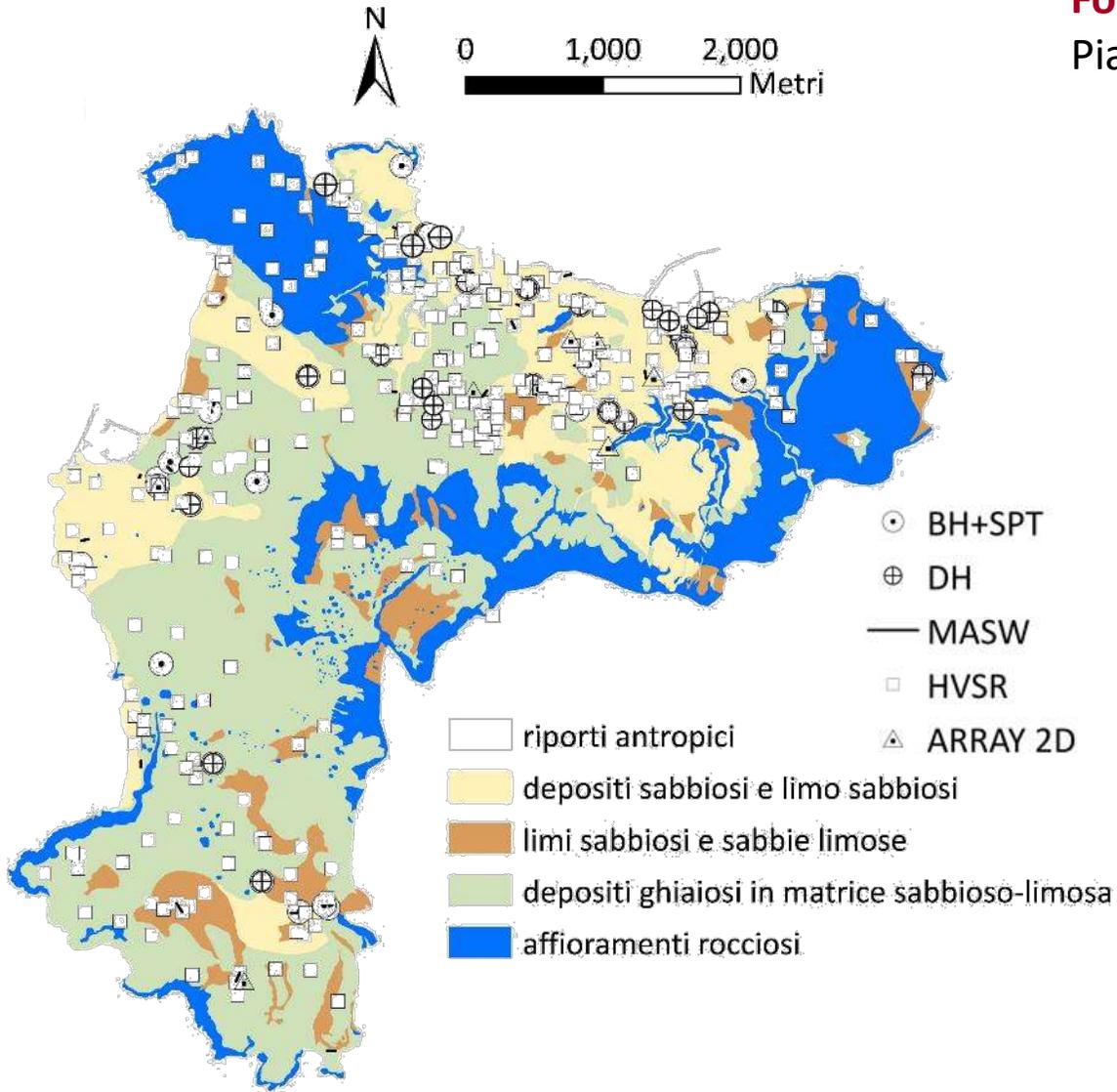
## Geological bedrock

- Tuff and lavas alternated (SFALS)
- Clay and siltstone (SFCO)
- Tuffite sandstone and tuffs stratified tuffs (SFGRS)
- Fractured lavas(SFLP)

Negli studi di Microzonazione Sismica (MS) la legenda della CARG è stata in parte semplificata e convertita nella codifica standard della *Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica (2020)*

cfr. tabelle di conversione legenda litotipi in [Mancini et al. \(2021\) - supplementary material](#)

# Fattori predisponenti - Caratteri litologici generali del sottosuolo



**Fonti delle indagini esistenti prima della frana del 25.XI.2022:**  
Piani Regolatori, studi di Microzonazione Sismica, progetto MASLIDE

Indagini in sito:

- 40 sondaggi + SPT
- 20 DH
- 296 HVSR
- 71 MASW
- 10 array 2D

Prove di laboratorio:

- 21 prove TD
- 4 prove TX
- 9 CTS
- 10 CSS
- 2 SS

**Indagini recenti nell'area della frana del 26.XI.2022**

- analisi granulometriche
- misure di permeabilità satura
- misure di suzione
- prove di taglio diretto

# Organizzazione del *database* sul sottosuolo (DICEA-Commissariato)

## Mappe e perimetrazioni

DTM, curve livello, pendenze, ortofoto  
CARG, carta geologico-tecnica MS, MOPS, MS III livello  
Perimetrazioni frane CARG, IFFI, PAI, storiche da letteratura  
Sorgenti sismiche, fenomeni co-sismici EMERGEIO e CEDIT  
Profondità plf  
Bacini, reticoli etc

## Indagini geo (localizzazioni e dati bruti sondaggi, geofisiche sup. e in foro, penetrometri, laboratorio, etc.)

Casamicciola Terme shp  
Casamicciola Terme pdf  
  
Lacco Ameno shp  
Lacco Ameno pdf  
  
Forio shp  
Forio pdf

PRG  
Studi MS  
Progetto UniNa MASLIDE  
Regione Campania x Pi.Ri.  
Altro (INGV, Prof., ...)

## Monitoraggio spostamenti (mappe, xls)

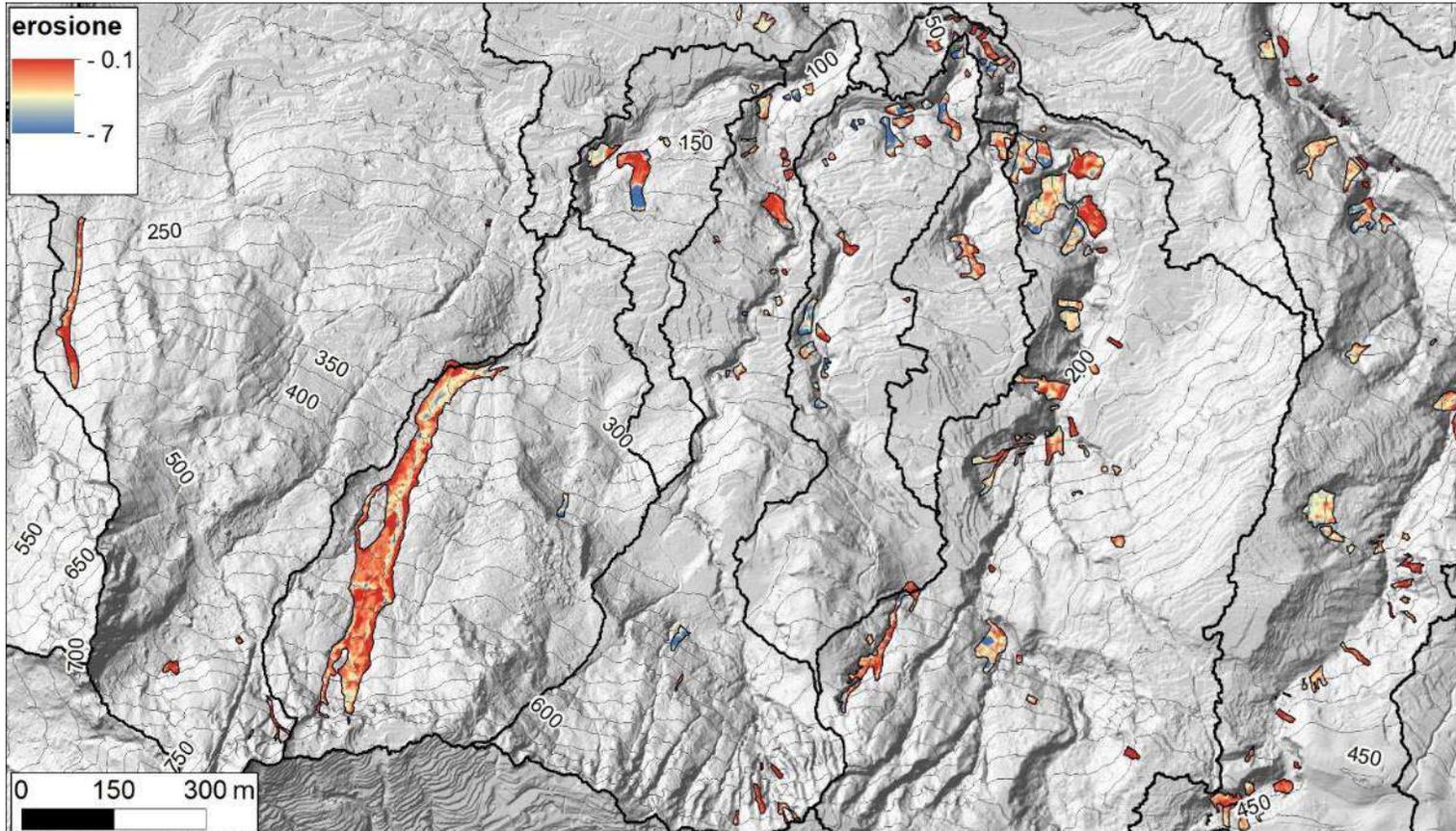
ERS 1992-2000  
ENVISAT 2003-2010  
COSMO SkyMed 2017-2019  
Inclinometri

## Elaborazione dati

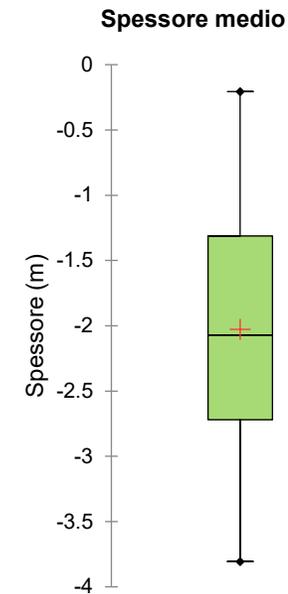
Sintesi prove lab e in sito (xls, pdf)  
Sezioni (dwg, pdf)  
Colonne stratigrafiche MOPS (pdf)  
Mappe parametriche e di zonazione x instabilità statica/sismica e liquefazione

# Fattori predisponenti - Caratteri stratigrafici: valutazione spessori erosi

**Valutazione degli spessori erosi durante l'evento del 2022:** effettuata confrontando cartografie differenti pre- e post-evento mediante DoD (*Dem of Difference*) → aree in erosione (differenze negative) vs. aree in accumulo (differenze positive)



Spessori medi dei corpi di frana compresi tra 1.5 e 2.7 m (media e mediana  $\approx 2$  m)



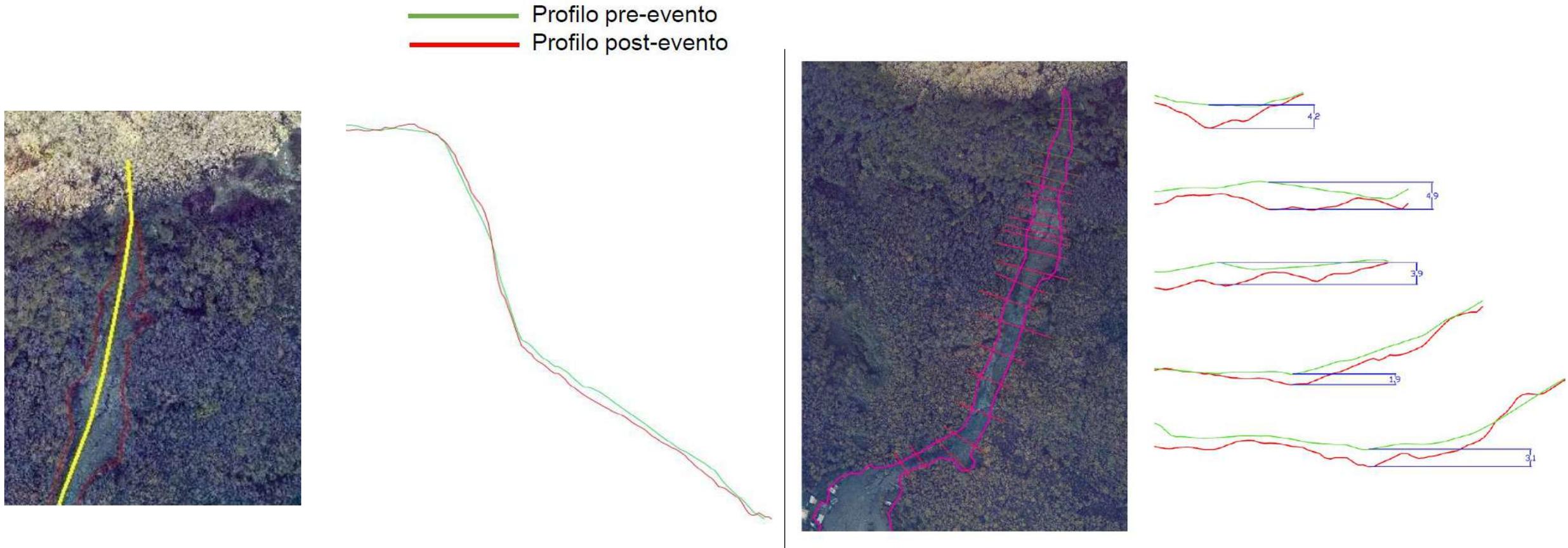
DTM pre-evento: rilievo lidar del 2009

DTM post evento: rilievo lidar del 2022

Stima volume totale mobilitato  $\approx 236.000 \text{ m}^3$

# Fattori predisponenti - Caratteri stratigrafici: valutazione spessori erosi

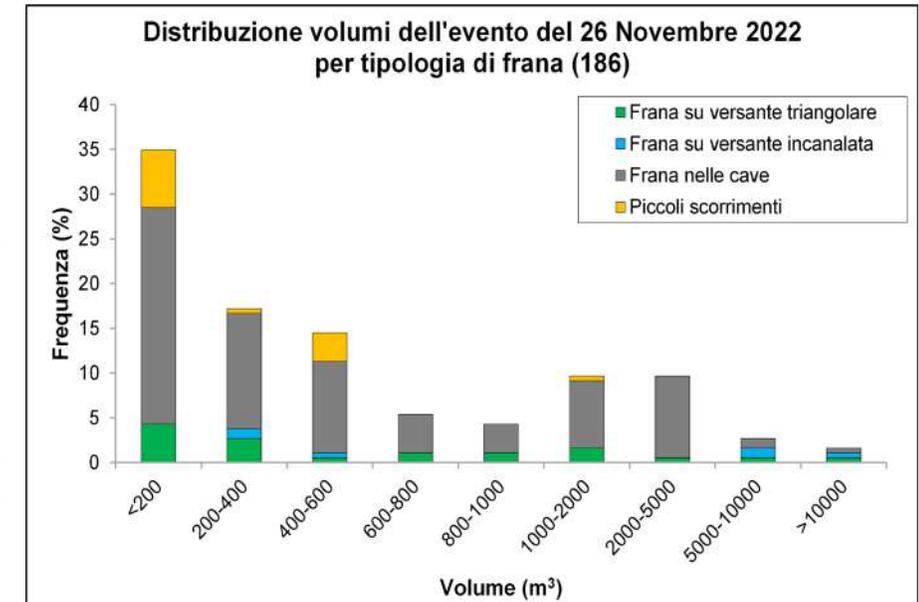
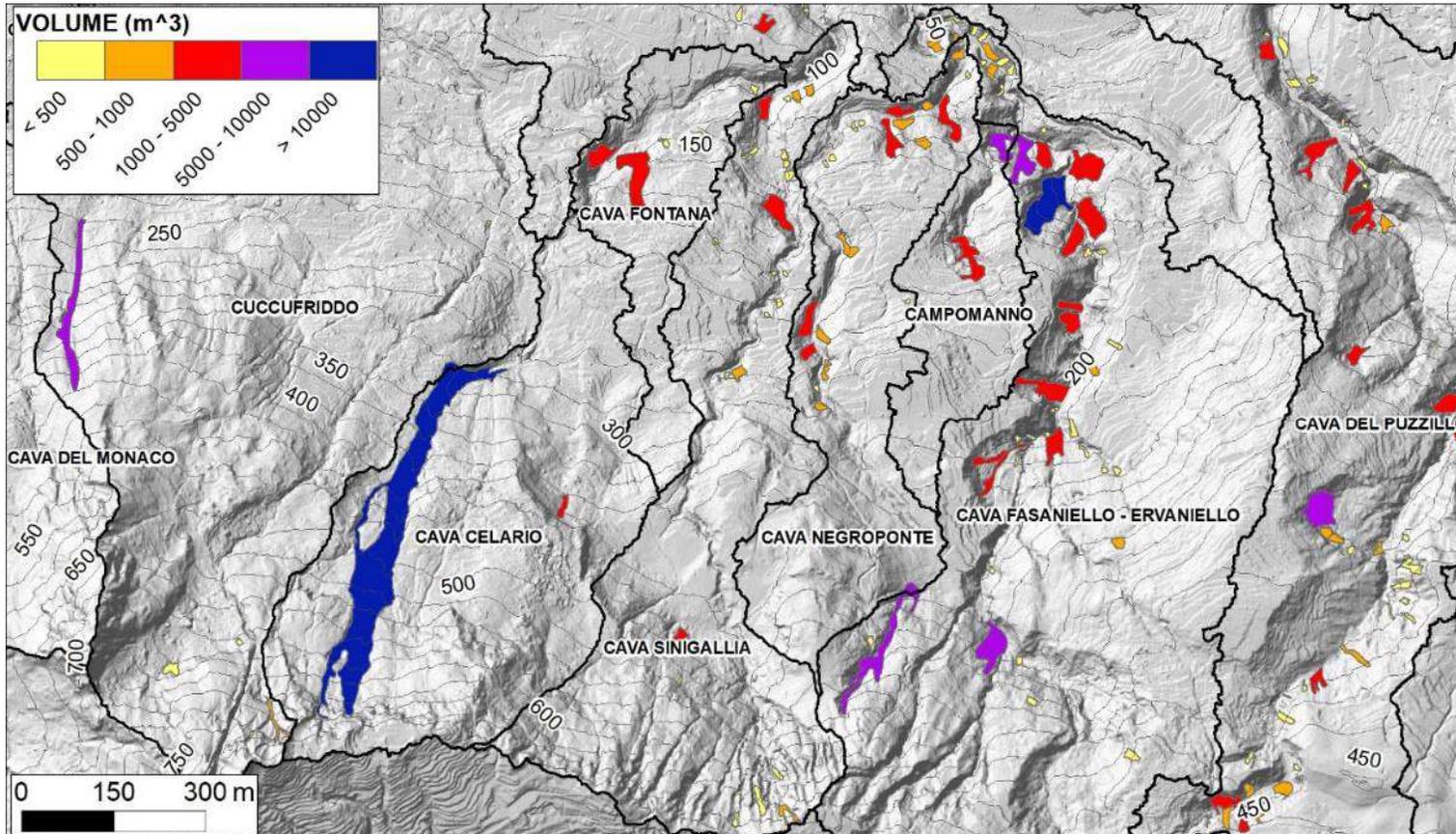
**Valutazione degli spessori erosi lungo Cava Celario effettuata mediante DoD nella prima emergenza dopo l'evento del 2022**



Analisi speditiva delle condizioni idrologiche e geomorfologiche del reticolo di drenaggio, dall'area sorgente delle colate fino all'area urbanizzata  
Rapporto Task 2 prima emergenza (*Santo et al., 2022*)

# Fattori predisponenti - Caratteri stratigrafici: valutazione volumi erosi

**Valutazione dei volumi erosi durante l'evento del 2022:** effettuata confrontando cartografie differenti pre- e post-evento mediante DoD (*Dem of Difference*) → aree in erosione (differenze negative) vs. aree in accumulo (differenze positive)

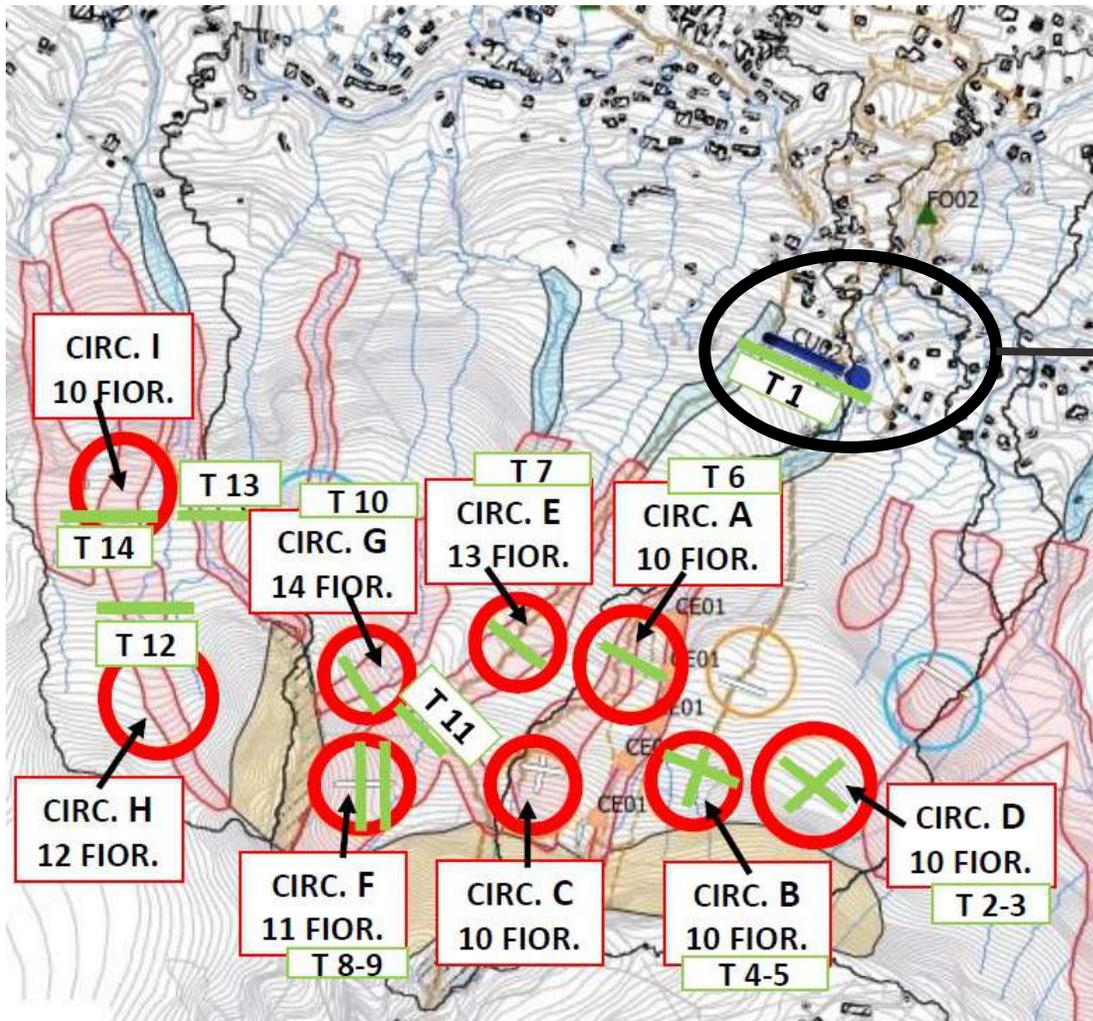


Bacini con max volumi mobilitati:

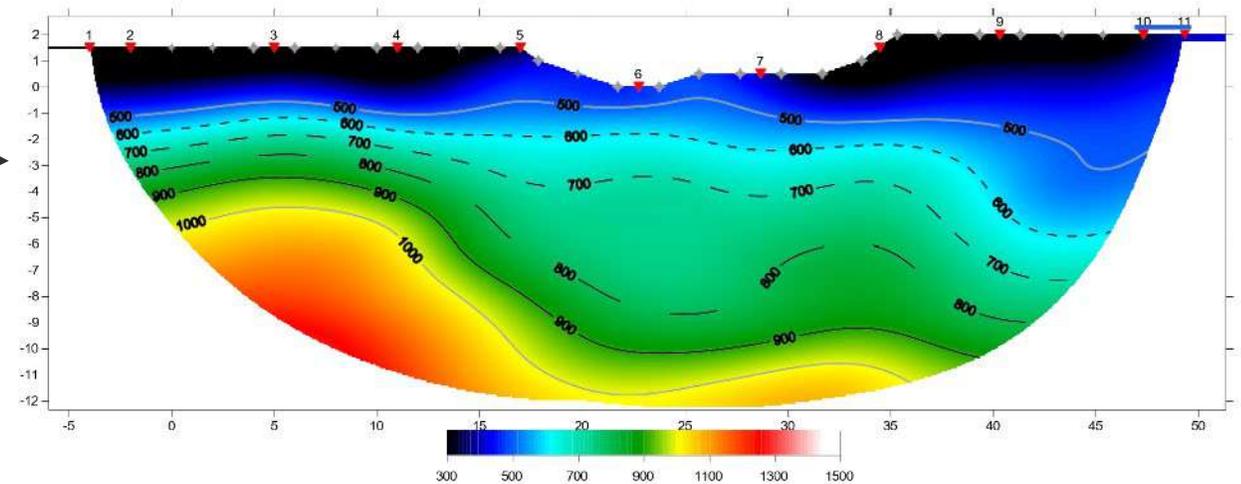
- Cava Fasaniello-Ervaniello  $\approx 65000 \text{ m}^3$
- Cava Celario  $\approx 56000 \text{ m}^3$
- Cava del Puzzillo  $\approx 48000 \text{ m}^3$

# Fattori predisponenti - Caratteri stratigrafici: valutazione spessori erodibili

Valutazione spessori potenzialmente erodibili: mediante 100 fioretture e 14 tomografie sismiche in 9 settori (A ÷ I) posizionati nella parte alta del versante nord del Monte Epomeo, e alla base di Cava Celario



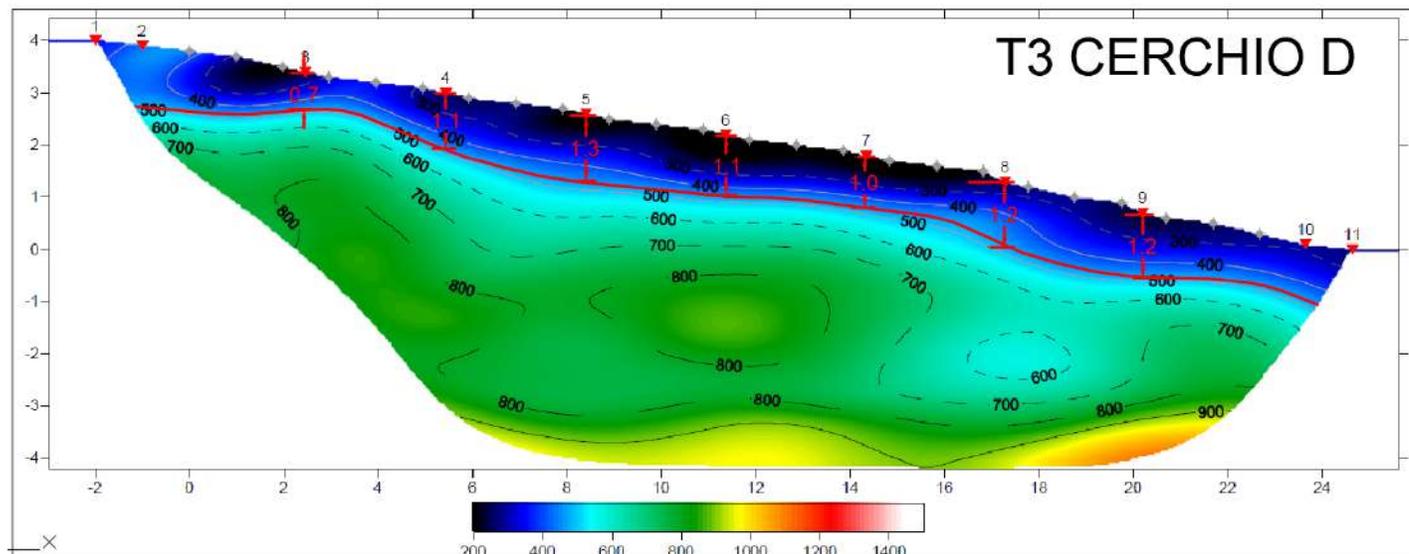
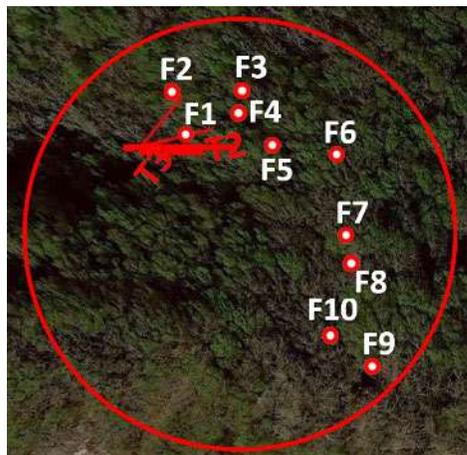
Spessore della coltre piroclastica  
identificato in base a velocità delle onde P  $V_p \leq 500$  m/s



estensione dell'area + difficoltà logistiche (e diplomatiche...)

indagini in numero minore del previsto  
allineamenti e distanze non regolari (tra 3 e 30 m)

# Fattori predisponenti - Caratteri stratigrafici: valutazione spessori erodibili



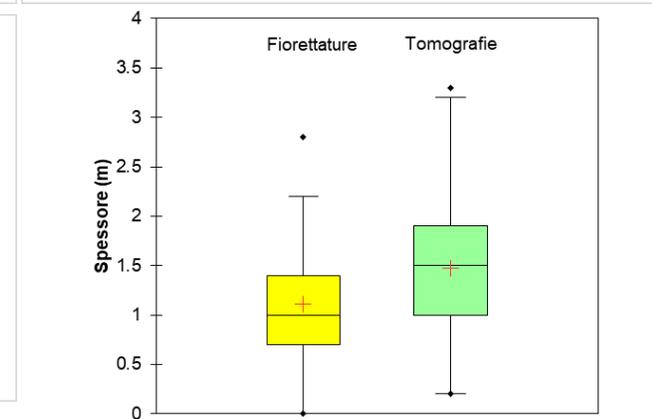
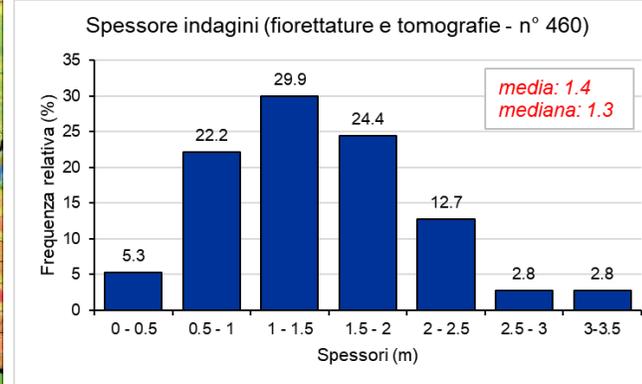
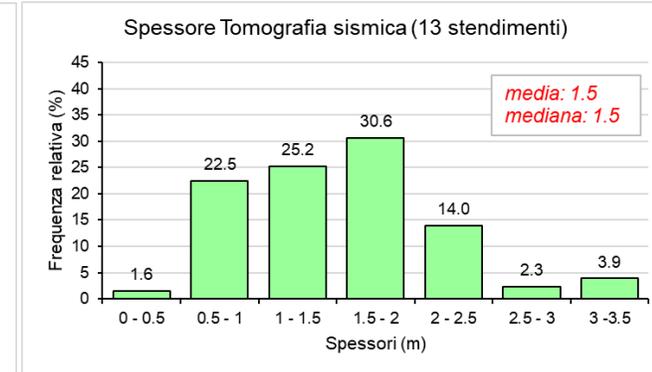
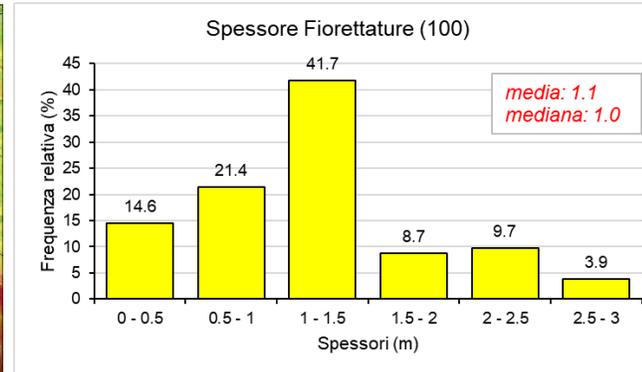
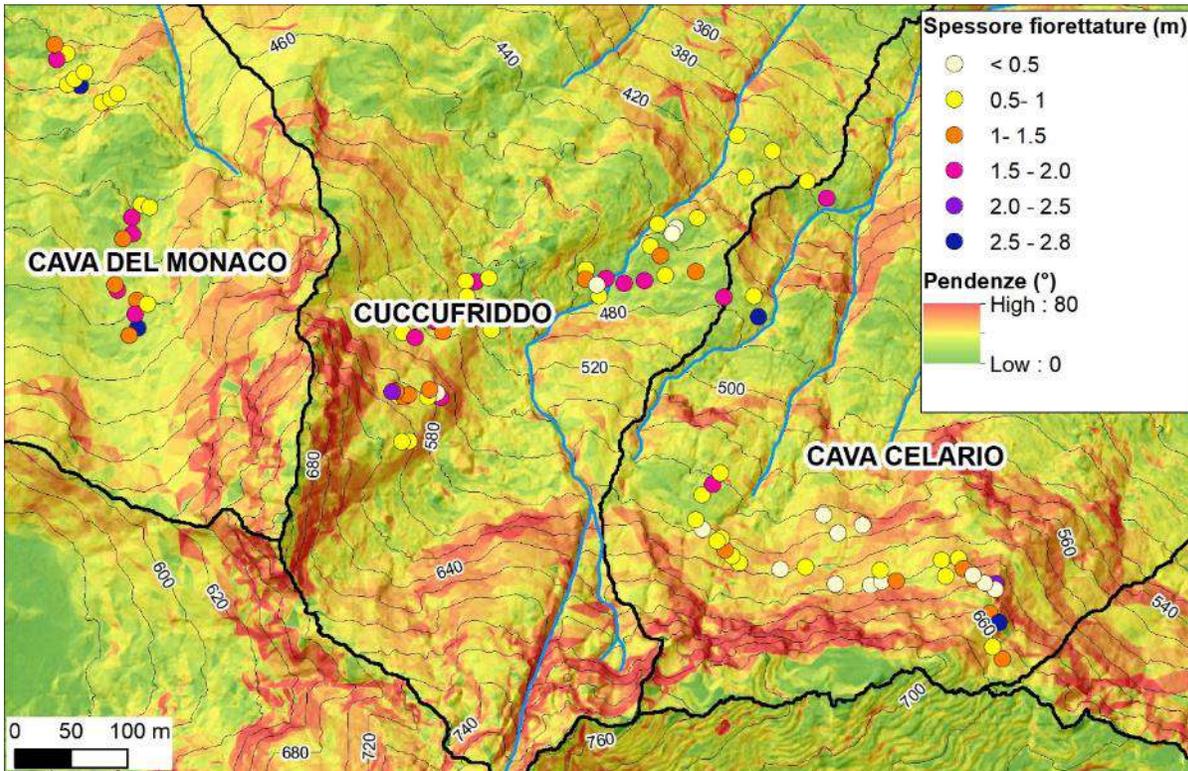
Prova F1		Prova F2		Prova F3		Prova F4		Prova F5	
Prof (m)	sec								
0,2	1	0,2	1	0,2	1	0,2	1	0,2	1
0,4	1	0,4	1	0,4	1	0,4	1	0,4	1
0,6	1	0,6	10	0,6	2	0,6	2	0,6	1
0,8	1	0,8		0,8	1	0,8	2	0,8	2
1,0	10	1,0		1,0	10	1,0	2	1,0	2
1,2		1,2		1,2		1,2	10	1,2	2
1,4		1,4		1,4		1,4		1,4	10

Prova F6		Prova F7		Prova F8		Prova F9		Prova F10	
Prof (m)	sec	Prof (m)	sec						
0,2	1	0,2	1	0,2	1	0,2	1	0,2	1
0,4	1	0,4	1	0,4	1	0,4	1	0,4	1
0,6	1	0,6	1	0,6	1	0,6	1	0,6	1
0,8	2	0,8	1	0,8	1	0,8	1	0,8	10
1,0	2	1,0	2	1,0	1	1,0	1	1,0	
1,2	2	1,2	10	1,2	3	1,2	10	1,2	
1,4	3	1,4		1,4	2	1,4	0	1,4	
1,6	3	1,6		1,6	2	1,6	0	1,6	
1,8	3	1,8		1,8	2	1,8		1,8	
2,0	3	2,0		2,0	3	2,0		2,0	
2,2	10	2,2		2,2	3	2,2		2,2	
2,4		2,4		2,4	3	2,4		2,4	
2,6		2,6		2,6	10	2,6		2,6	

FIORETTATURA CERCHIO D				
PROVA	PROF (m)	Max(m)	Min (m)	MEDIA (m)
F1	1	2,6	0,6	1,32
F2	0,6			
F3	1			
F4	1,2			
F5	1,4			
F6	2,2			
F7	1,2			
F8	2,6			
F9	1,2			
F10	0,8			

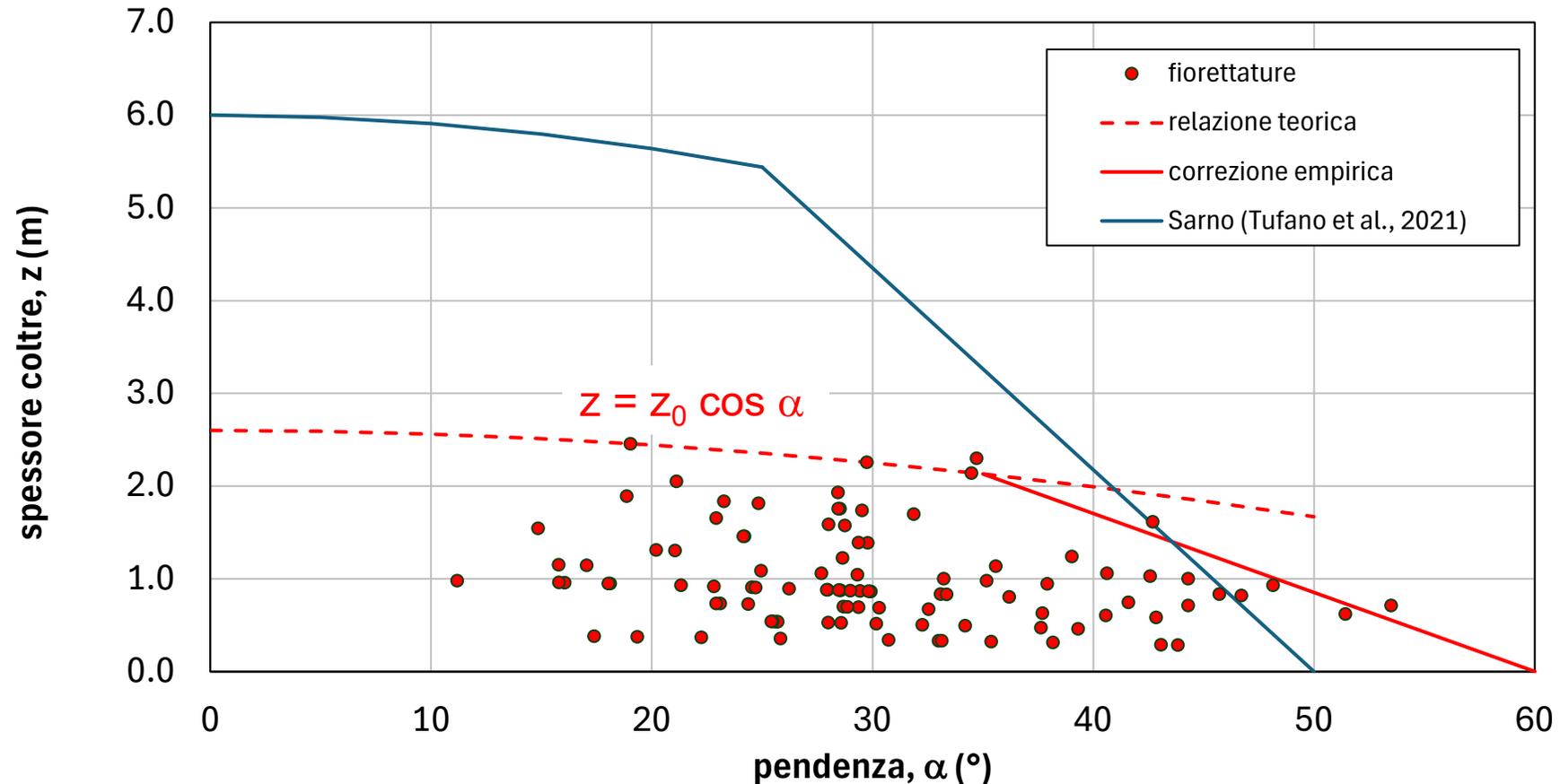
# Fattori predisponenti - Caratteri stratigrafici: valutazione spessori erodibili

Sintesi dei dati relativi a 100 fiorettature + 258 profondità di coltre ottenute dai 13 stendimenti delle tomografie sismiche



- Le fiorettature con spessori < 0.5 m e 0.5÷1 m sono localizzate soprattutto nella parte sommitale del versante N dell'Epomeo dove le pendenze sono più elevate (ex. Zona Cava Celario)
- Gli spessori > 1 m sono presenti nelle aree di impluvio concave e dove le pendenze sono relativamente più basse
- Intervalli valori per bacini: 0.4 - 2.6 m per Cava Celario  
0.4 - 2.2 m per Cava Cuccufriddo  
0.6 - 2.8 m per Cava del Monaco

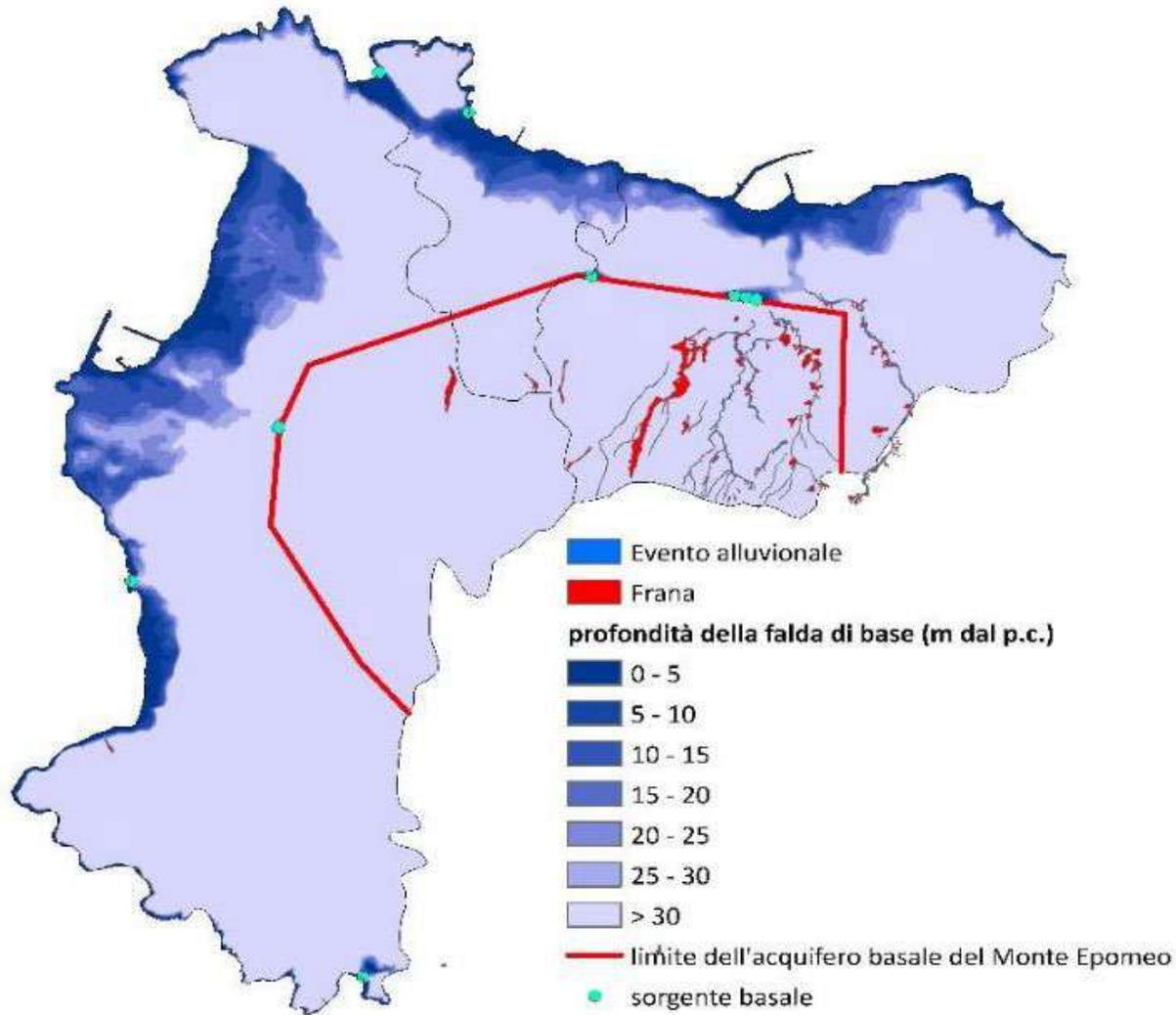
# Fattori predisponenti – Relazione tra spessore erodibile e pendenza



Lo spessore della coltre decresce con la pendenza del versante  
in misura diversa rispetto ad altri contesti in Campania  
(Sarno: terreni vulcanici da caduta)

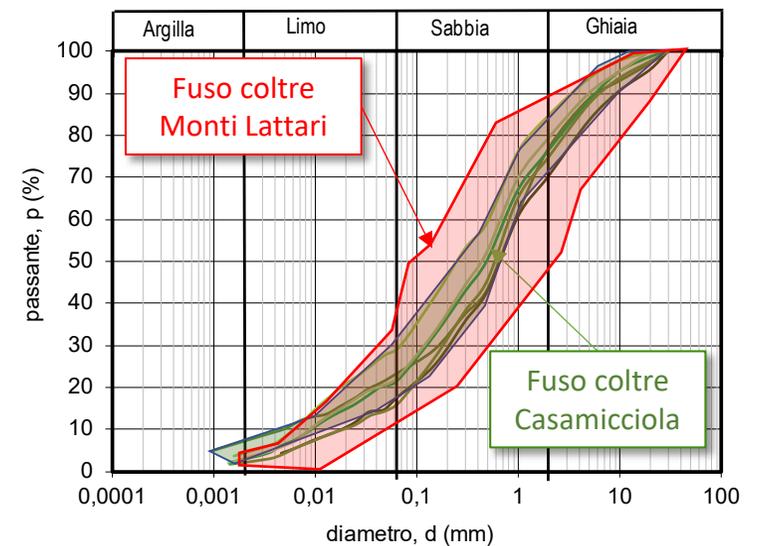
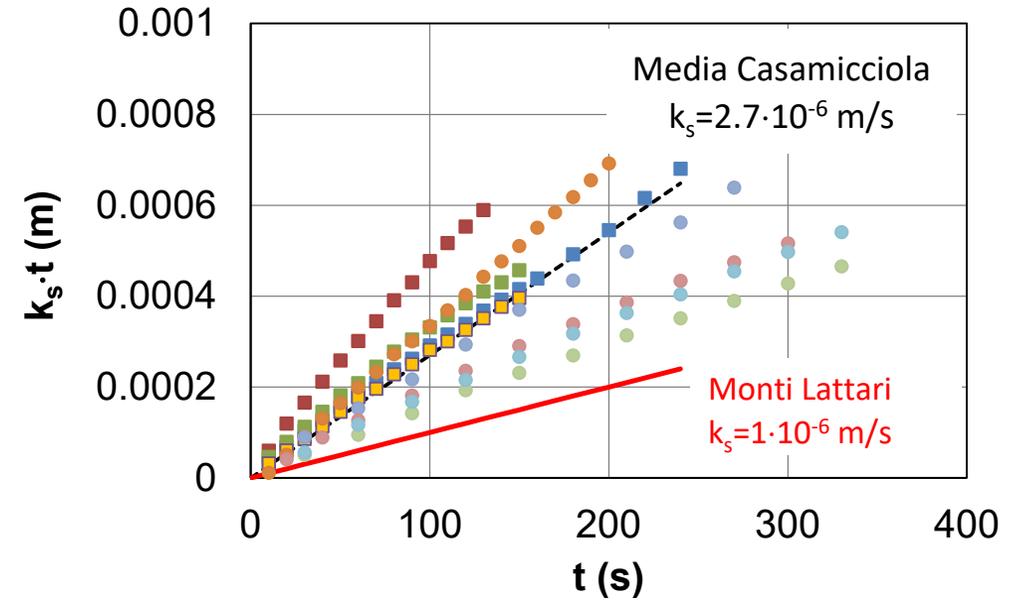
# Fattori predisponenti - Caratteri idrogeologici

## Profondità media stagionale dell'acquifero basale

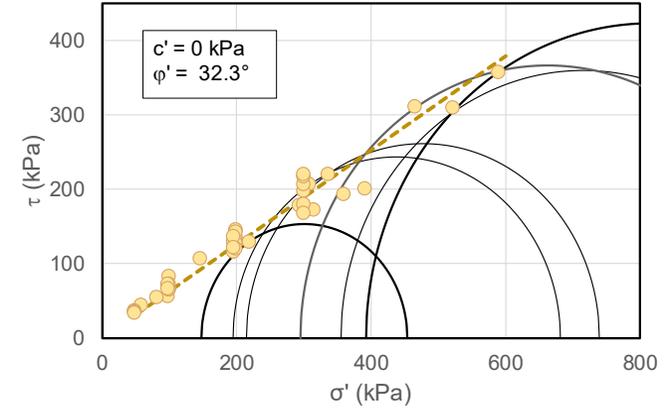
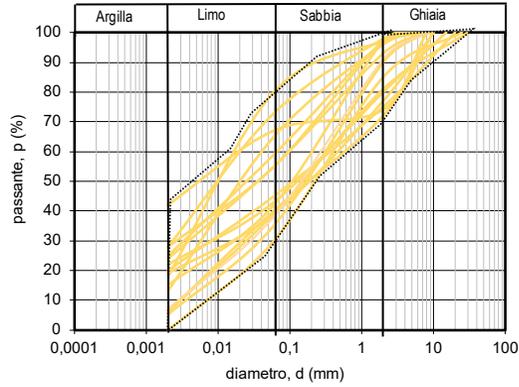
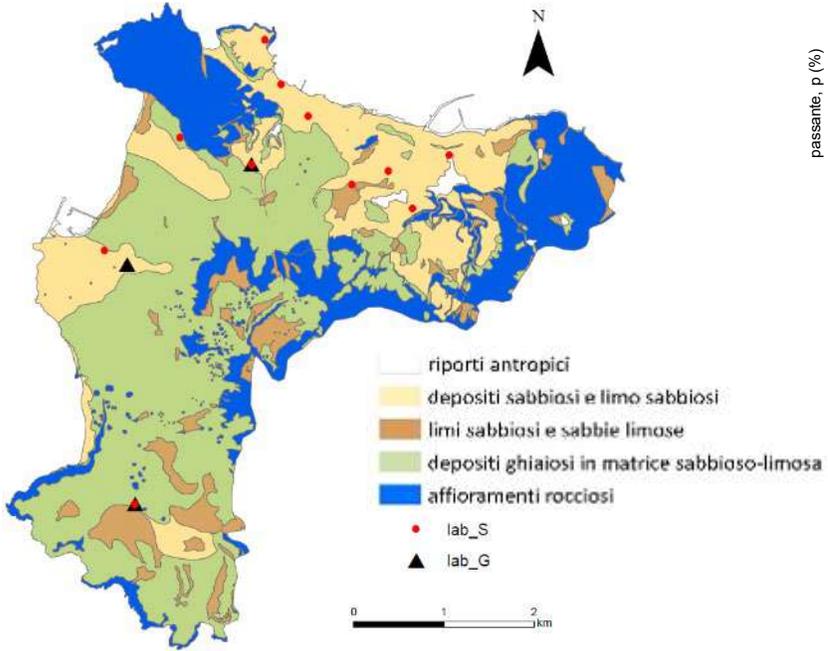


(mod. da *Piscopo et al., 2019*)

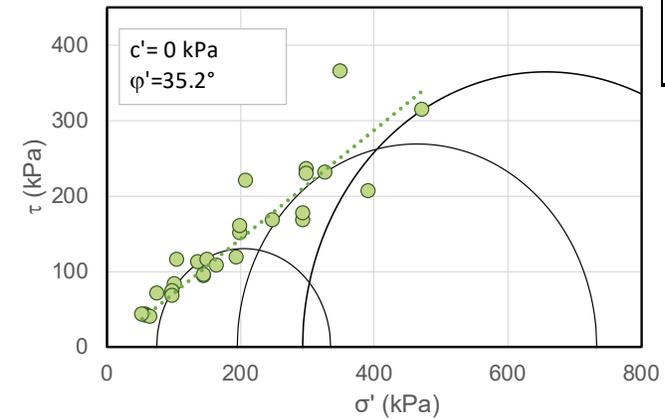
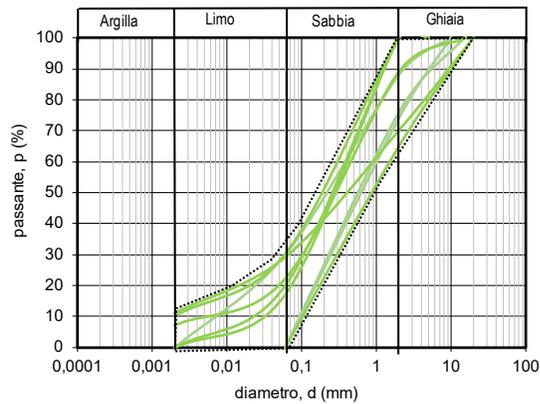
## Prove in permeametro a carico costante



# Fattori predisponenti - Resistenza al taglio dei terreni di copertura



24 prove di laboratorio  
(20 taglio diretto + 4 prove triassiali)



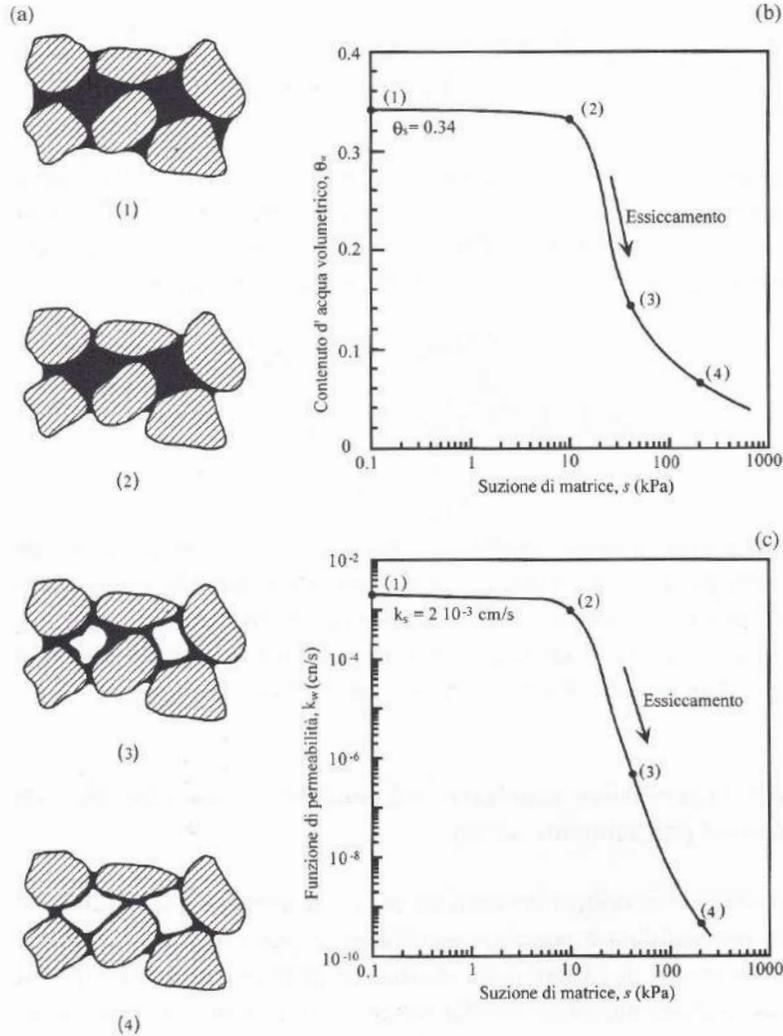
	X	μ	σ
γ (kN/m <sup>3</sup> )	15.7	2.3	
c' (kPa)	0		
φ' (°)	32.8	2.7	
γ (kN/m <sup>3</sup> )	14.9	7.7	
c' (kPa)	0		
φ' (°)	35,2	5.2	
γ (kN/m <sup>3</sup> )	15.0		no data
c' (kPa)	10		
φ' (°)	30		
γ (kN/m <sup>3</sup> )	14.0		no data
c' (kPa)	0		
φ' (°)	25		

# Fattori preparatori – Curva caratteristica del terreno non saturo

Contenuto d'acqua volumetrico

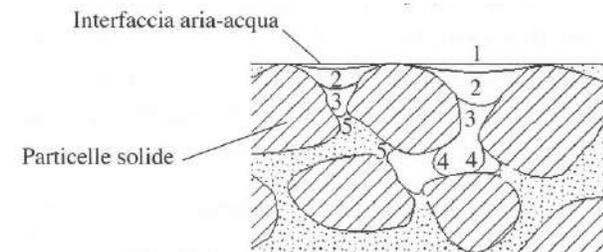
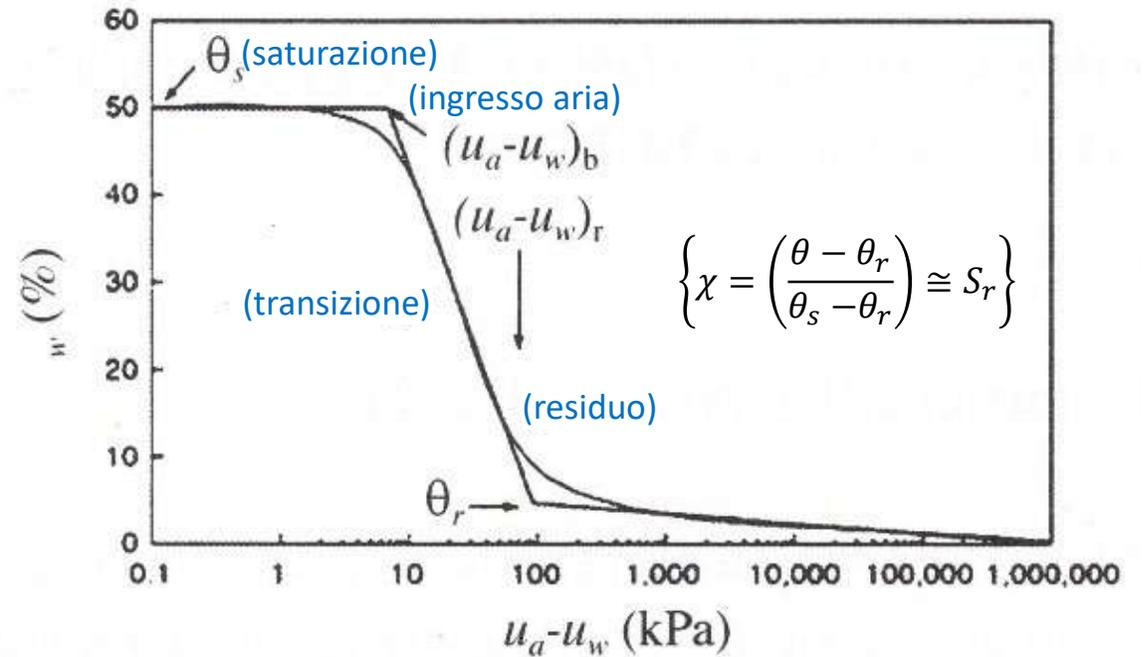
$$\theta = n_w = n S_r$$

(n = porosità;  $S_r$  = grado di saturazione)



Modello di curva caratteristica (van Genuchten, 1980)

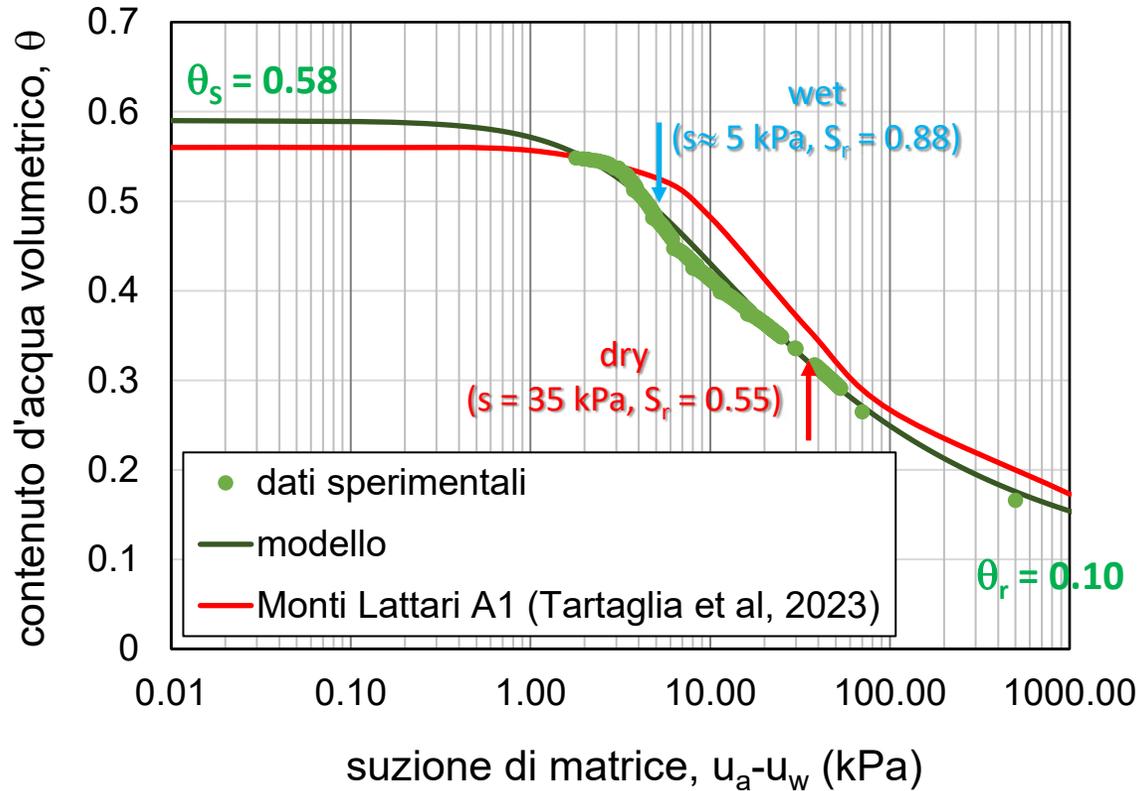
$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left( \frac{1}{1 + (\alpha(u_a - u_w))^n} \right)^m$$



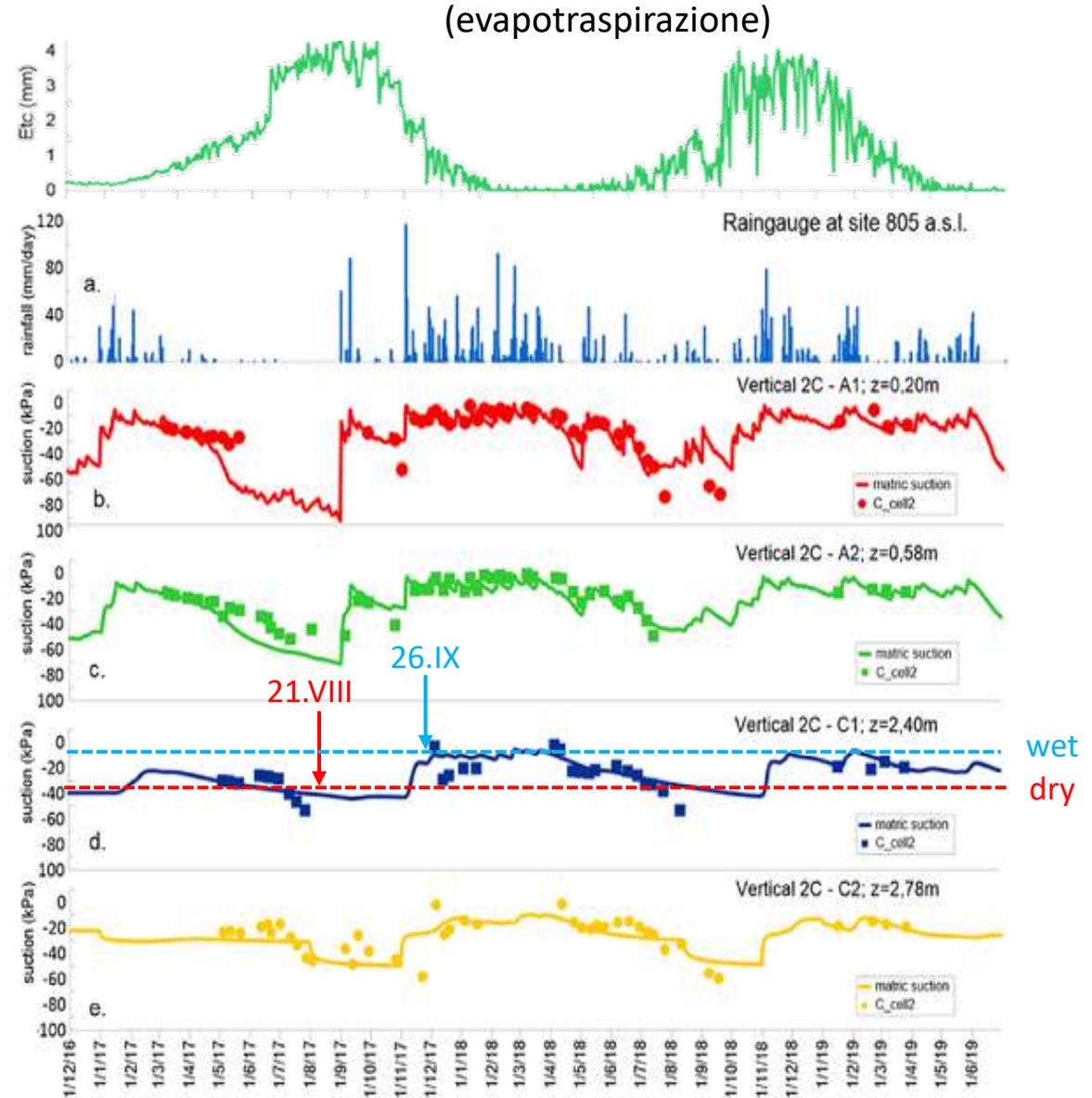
# Fattori preparatori – Curva caratteristica e variabilità stagionale della suzione

## Parametri curva caratteristica da prove di laboratorio DICEA

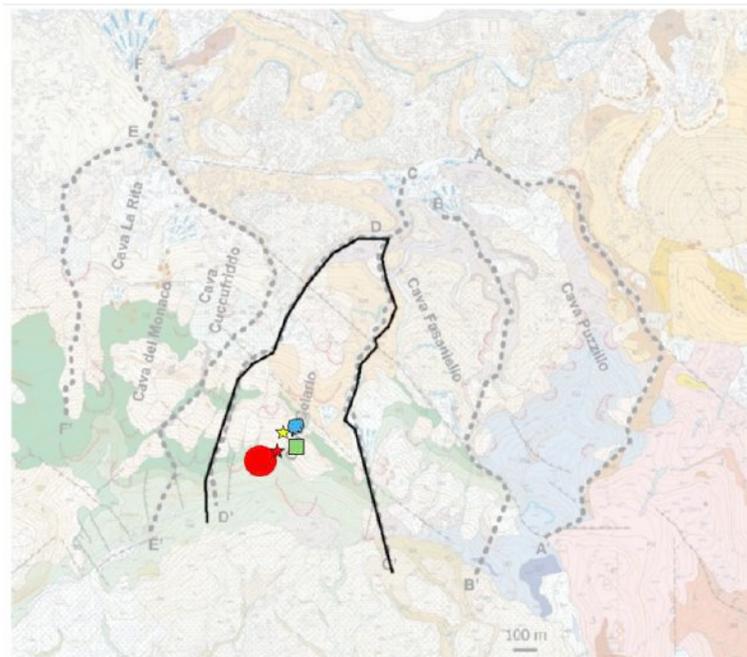
$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$ kPa <sup>-1</sup>	n	m
-	-	-	-	-
0.1	0.58	0.25	1.4	0.29



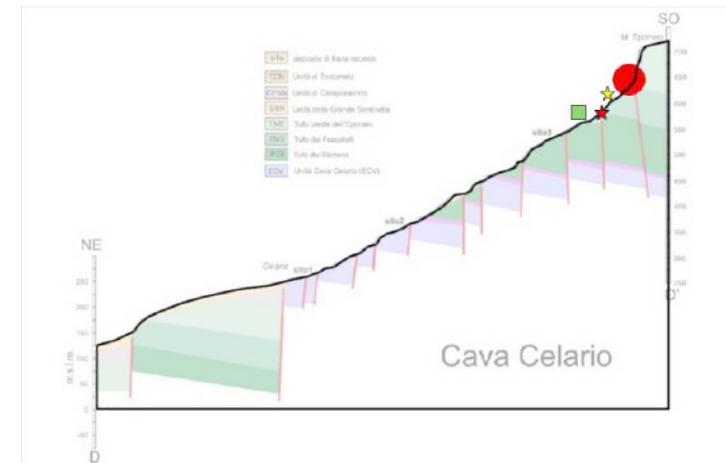
profondità dal p.c. ↓



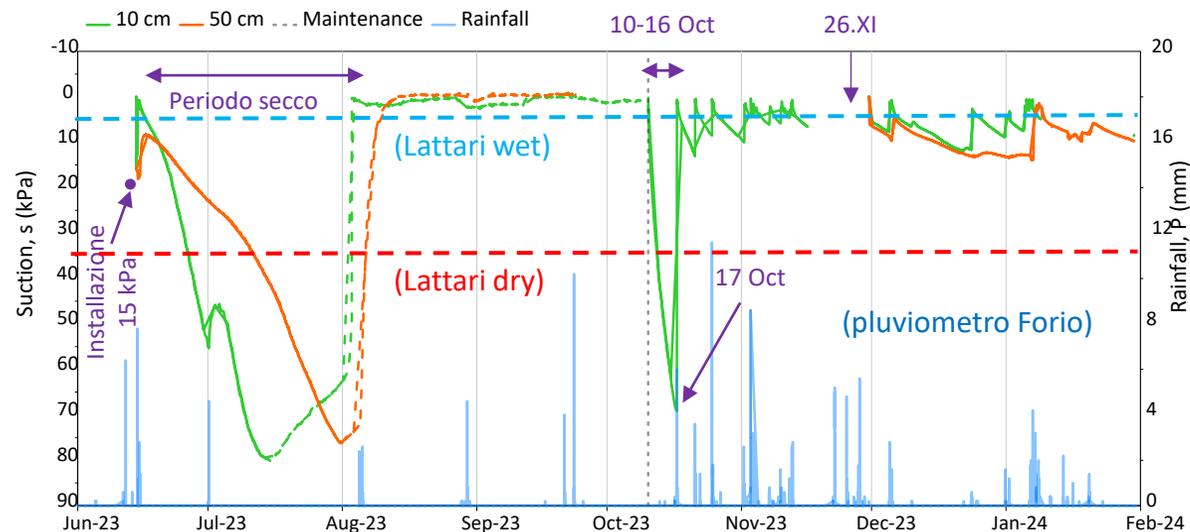
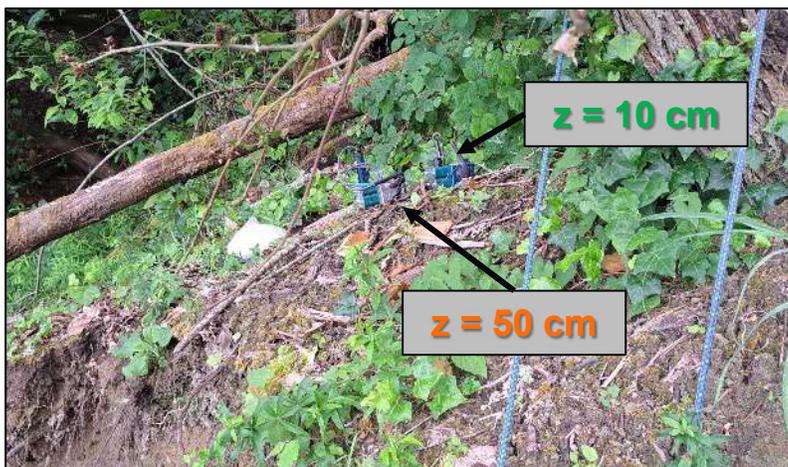
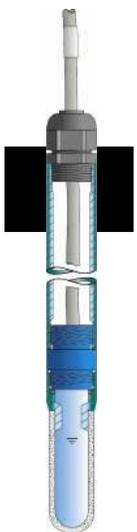
Sistema monitoraggio installato dal DICEA  
(e in corso di potenziamento)



- ★ tensioinclinometro (10 cm)
- ★ tensioinclinometro (50 cm)
- Sonde TDR multilivello (x2)
- ☁ Stazione meteo + datalogger

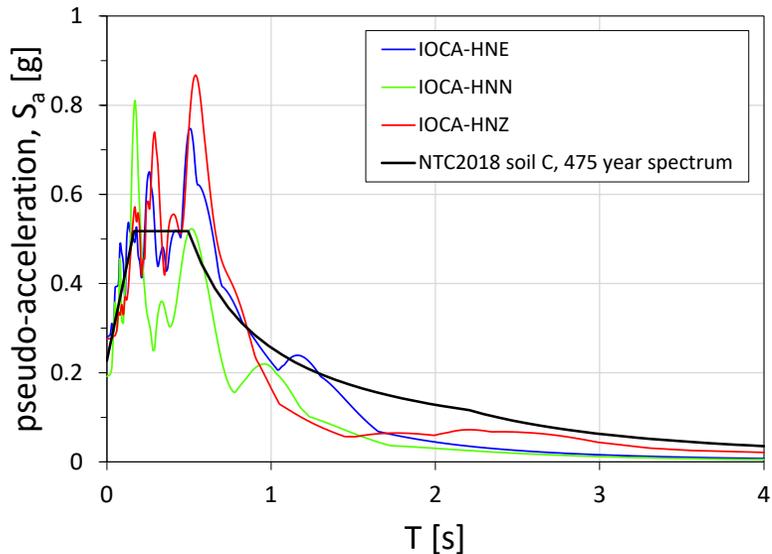
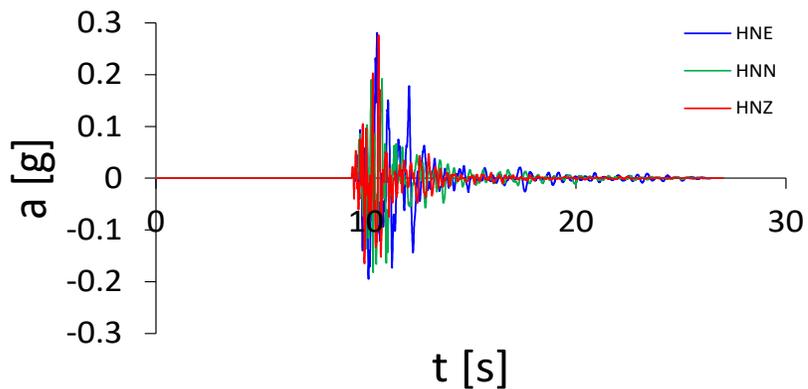


Tensio-inclinometro

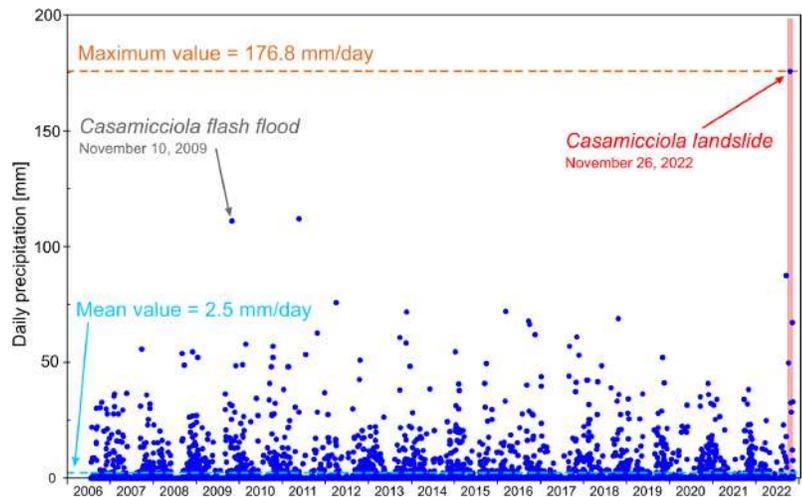
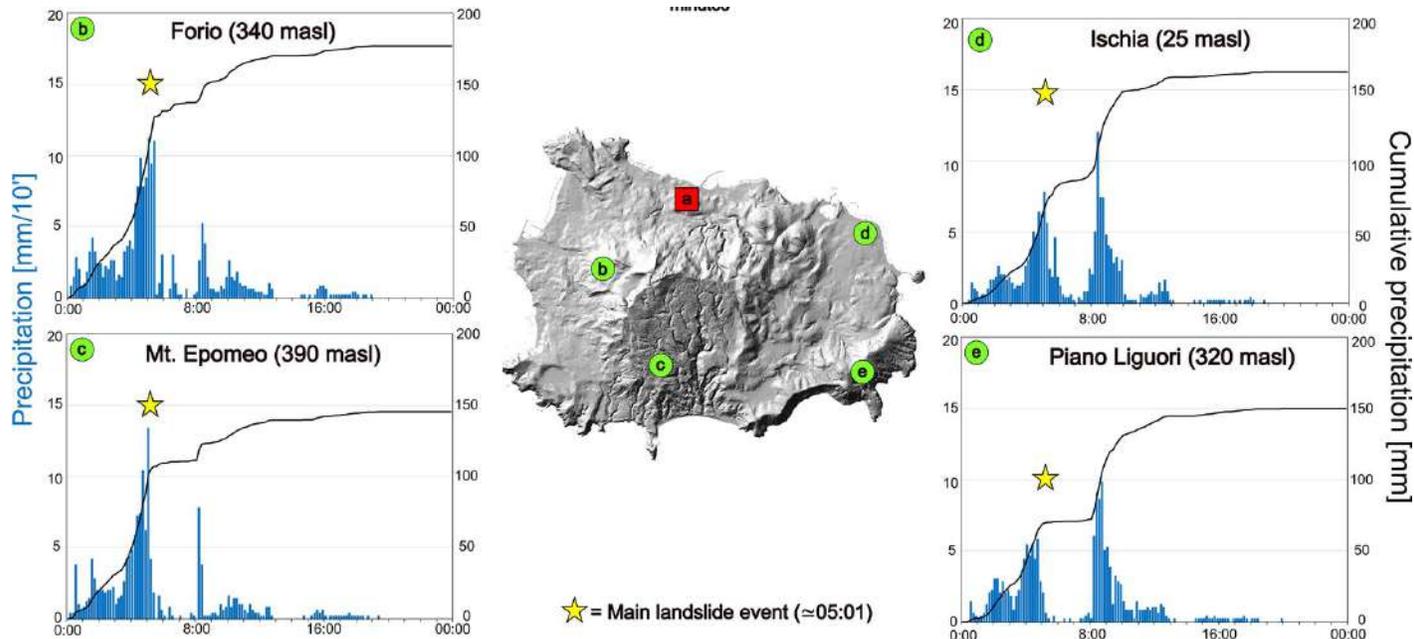


# Fattori d'innescò – Eventi sismici o meteorici estremi

Evento sismico 21.VIII.2017 - registrazione IOCA



Piogge registrate il 26.XI.2022



Piogge giornaliere registrate dal 2006

# Contenuti

---

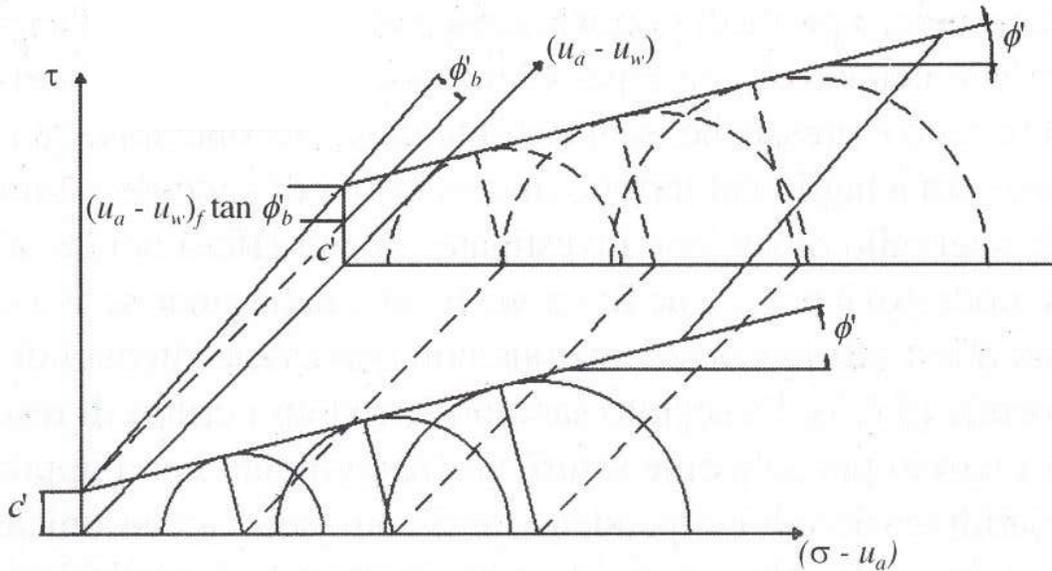
- Ischia come laboratorio multi-hazard sull'instabilità di versante
- Fattori d'influenza: predisponenti, preparatori, d'innescio
- **Effetti del grado di saturazione delle coltri sull'instabilità statica e sismica**
- Analisi multi-scalare dell'instabilità in condizioni sismiche
- Conclusioni

# Effetto della saturazione sulla resistenza al taglio dei terreni di copertura

## Estensione del criterio di Mohr-Coulomb ai terreni parzialmente saturi

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \left[ \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \varphi' \right]$$

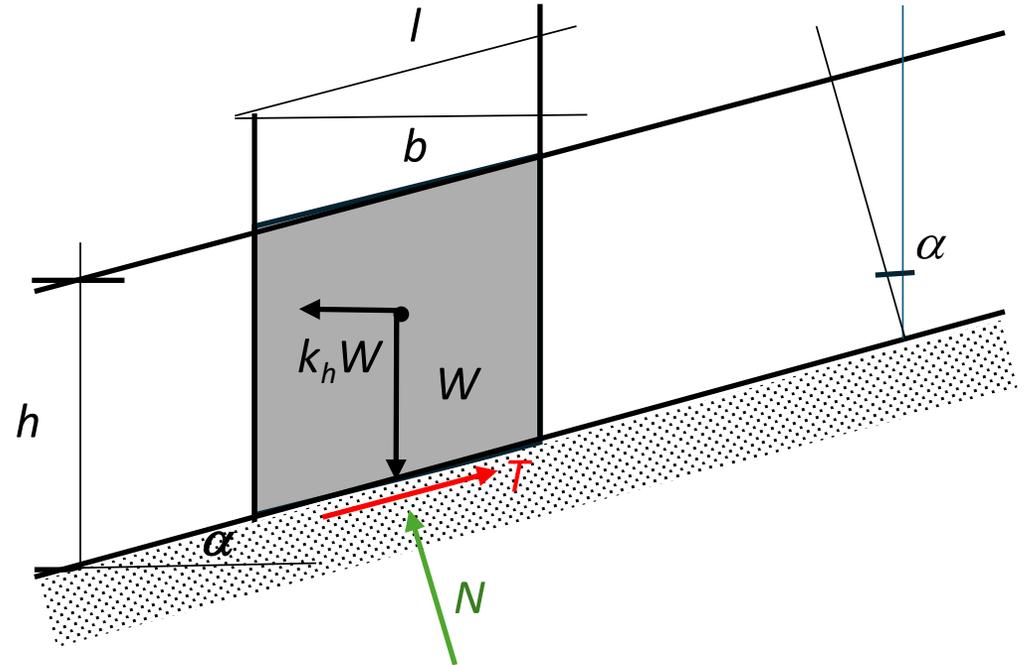
$$\left\{ \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \varphi' = \chi \tan \varphi' \cong S_r \tan \varphi' \doteq \tan \varphi'_b \right\}$$



$c'$  = coesione 'vera' efficace

$(u_a - u_w) \tan \varphi'_b$  = coesione 'apparente'

## Modello di pendio indefinito



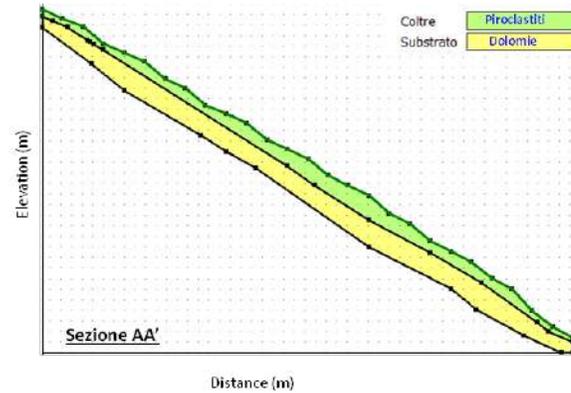
$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_{eq}} = \frac{c' + (\gamma h \cos^2 \alpha) \tan \varphi' - k_h \gamma h \sin \alpha \cos \alpha \tan \varphi' + (u_a - u_w) \left[ \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \varphi' \right] \cos^2 \alpha}{\gamma h \cos^2 \alpha (k_h + \tan \alpha)}$$

$$FS \cong \frac{c' + (\gamma h \cos^2 \alpha) \tan \varphi' - k_h \gamma h \sin \alpha \cos \alpha \tan \varphi' + (u_a - u_w) [S_r \tan \varphi'] \cos^2 \alpha}{\gamma h \cos^2 \alpha (k_h + \tan \alpha)}$$

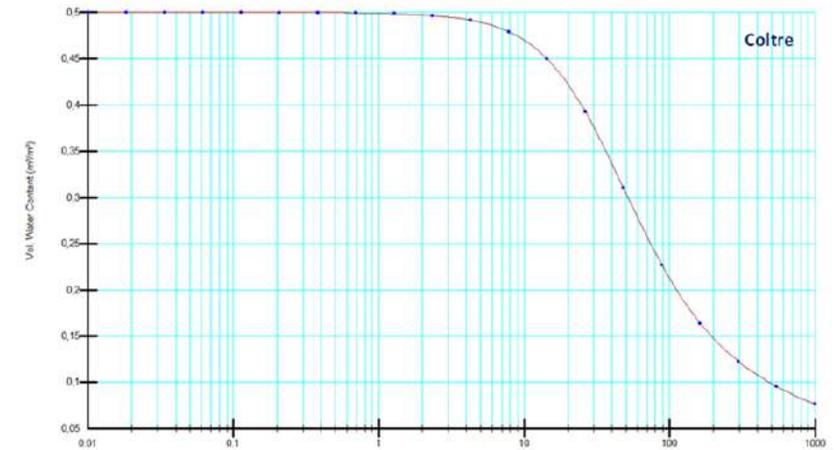
# Effetto della saturazione sulla stabilità delle coltri piroclastiche

## Il caso di Vallone Olivieri

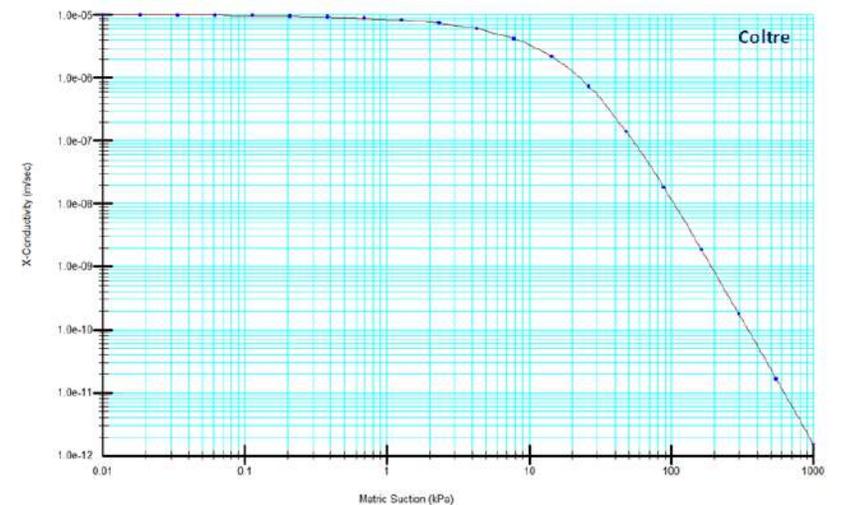
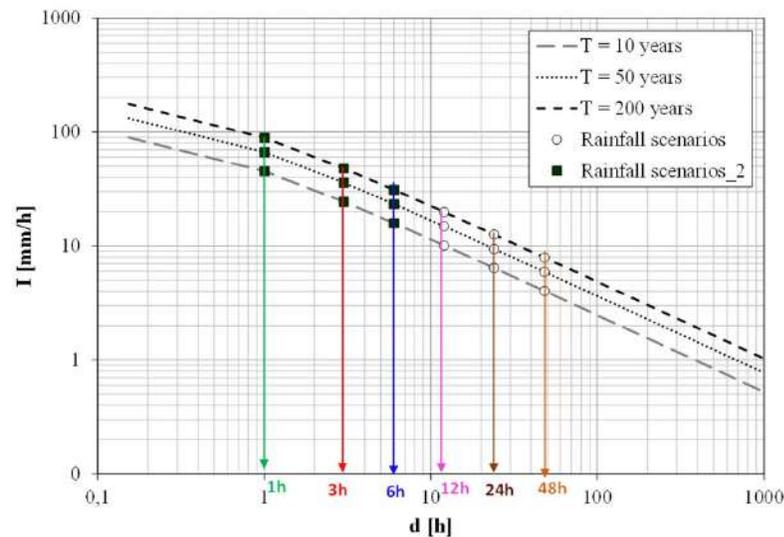
(Progetto CUR-CIS 2020, Vitale et al., 2021)



Curve di ritenzione e di conducibilità idraulica assunte per la coltre di terreno piroclastico



Selezione di diversi eventi di pioggia con intensità e durata variabili e tempi di ritorno crescenti



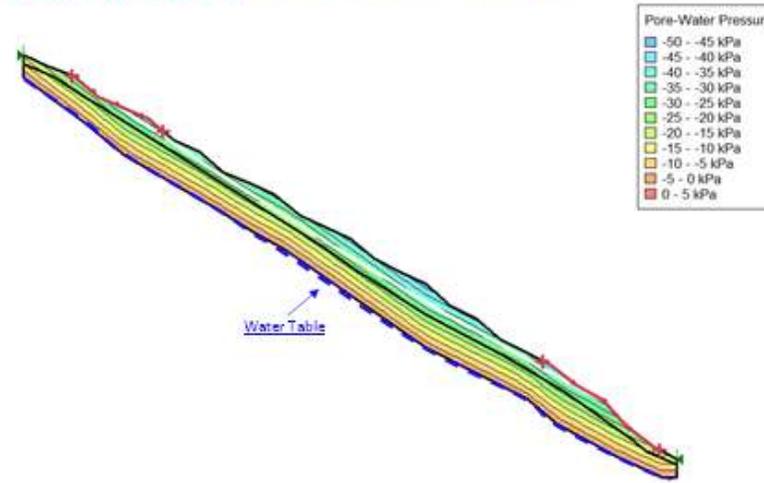
# Influenza di diversi profili di suzione sulla stabilità delle coltri piroclastiche

Valore medio annuale ( $S_r = 0.70$ )

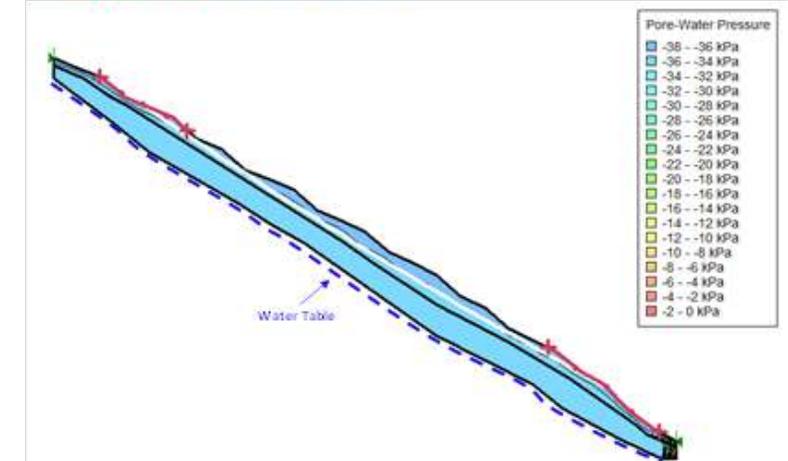
Profilo idrostatico:

p.l.f = tetto formazione rocciosa di base

Condizione iniziale: profilo idrostatico di suzione



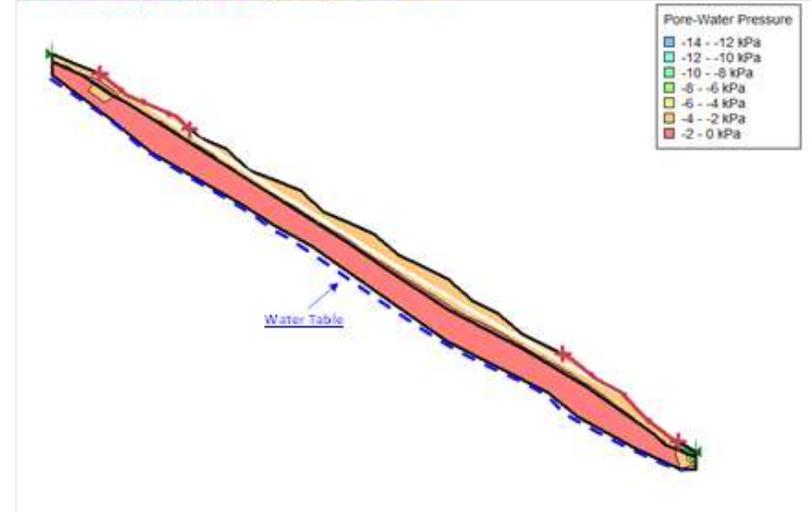
Condizione iniziale: SUZIONE = 36 kPa



Condizione iniziale: SUZIONE = 10 kPa



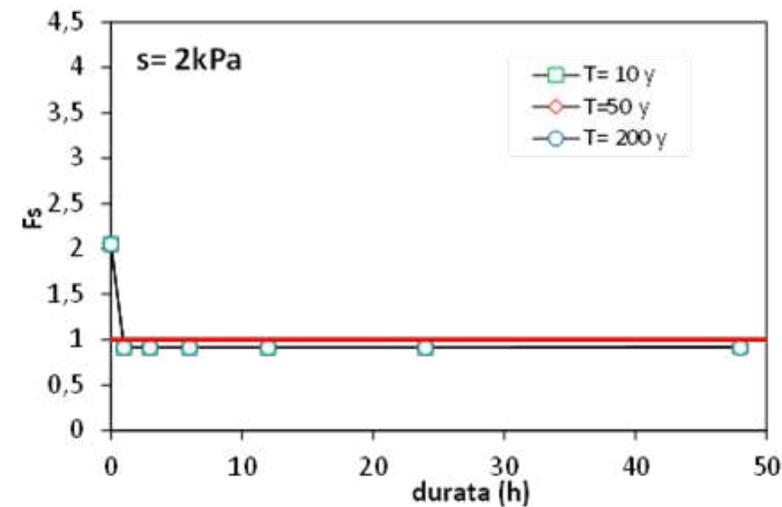
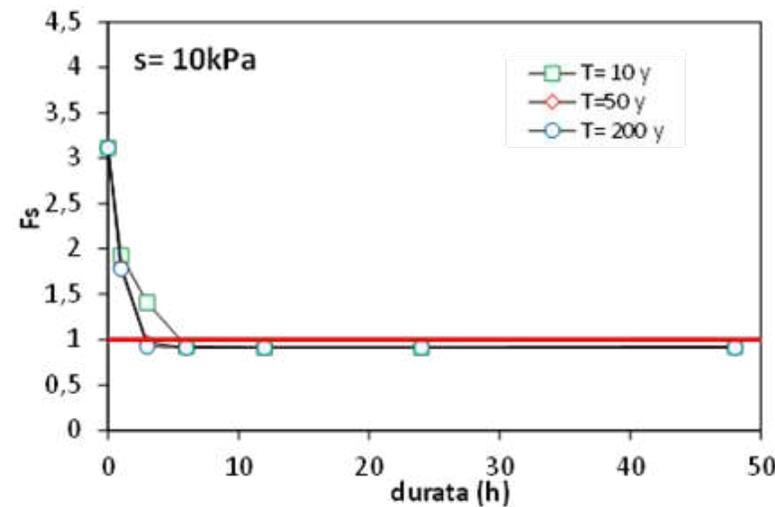
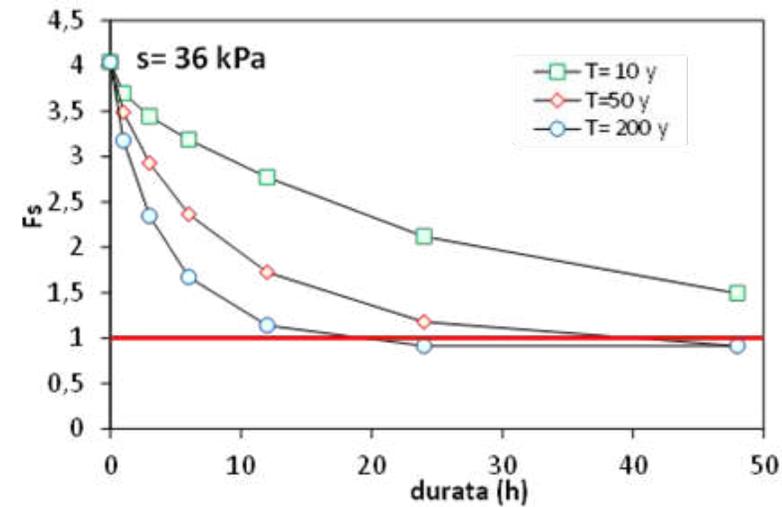
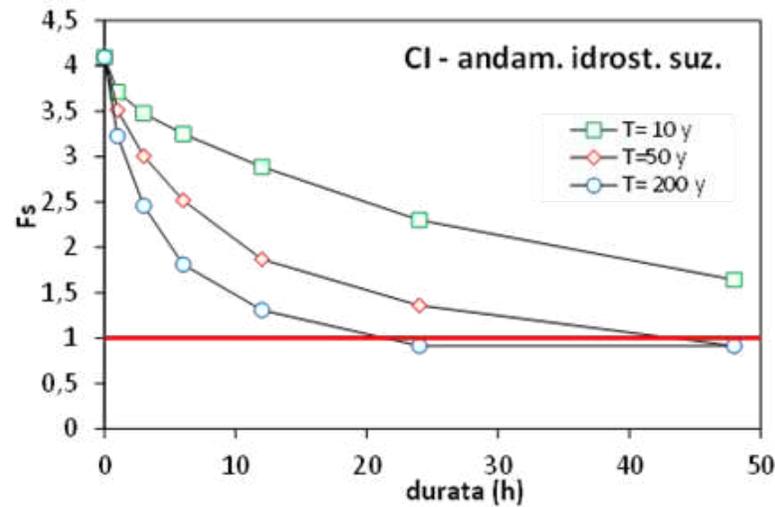
Condizione iniziale: SUZIONE = 2 kPa



Valori tipici da fine stagione piovosa

# Influenza dei diversi profili di suzione sulla stabilità al variare della piovosità

Valor medio e andamento idrostatico di suzione: instabilità solo per piogge di lungo periodo e lunga durata

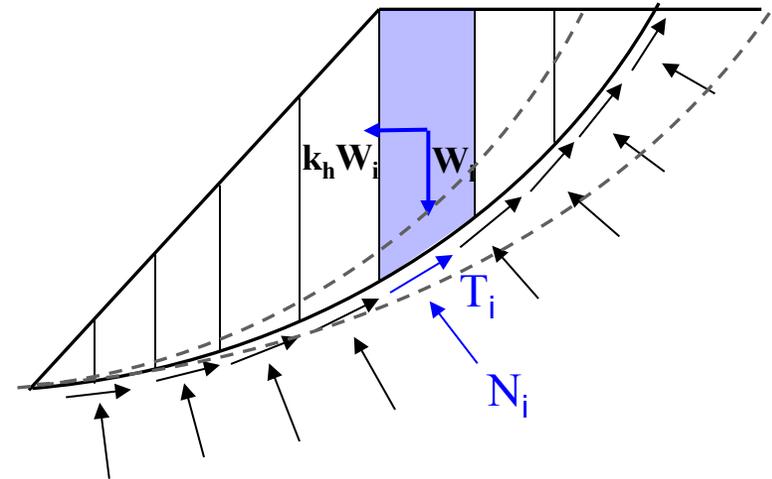
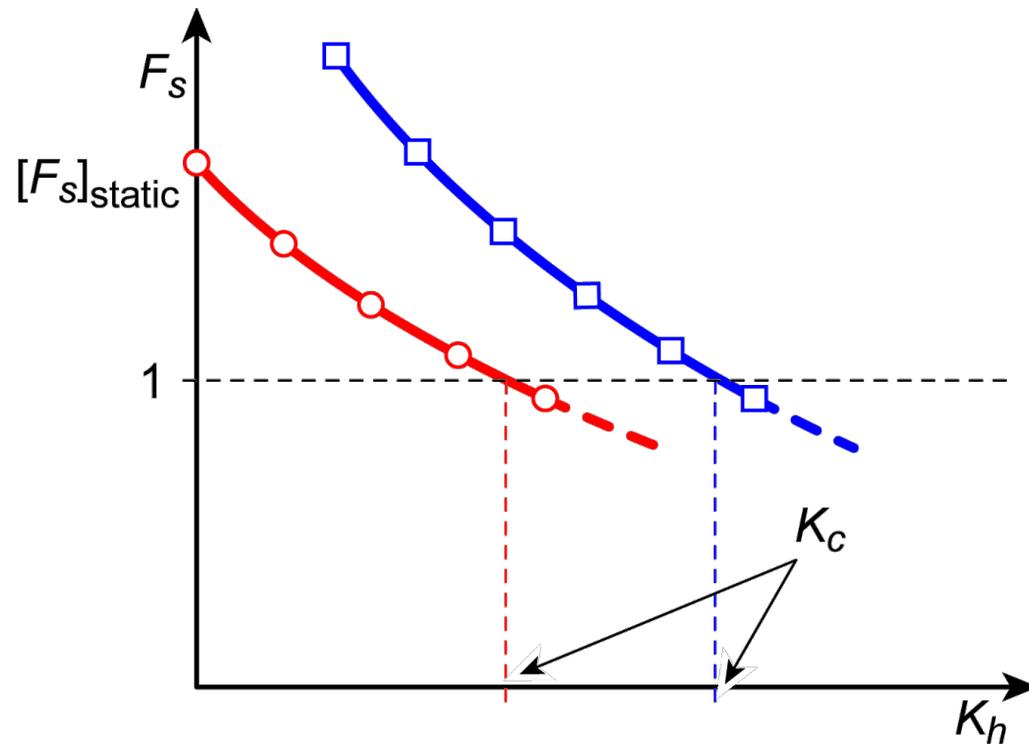


Periodi 'umidi': instabilità anche per piogge frequenti e di breve durata

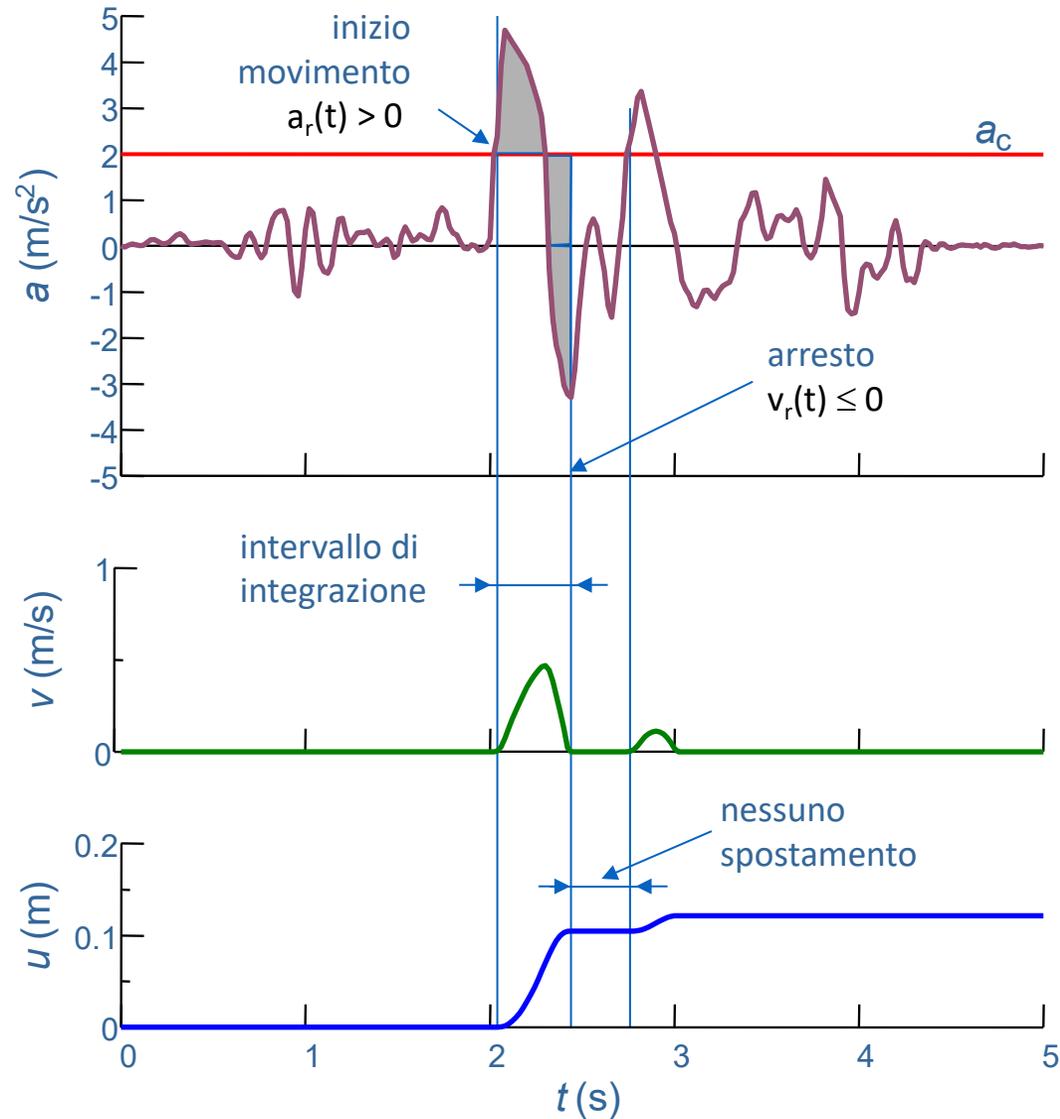
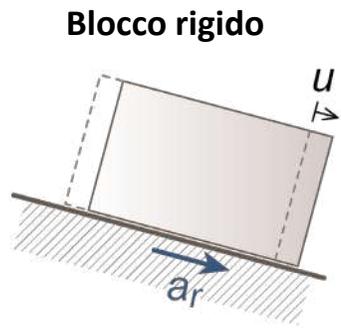
# Stabilità in condizioni sismiche: determinazione dell'accelerazione critica

Procedimento con metodi dell'equilibrio limite:

- 1) Assegnare un valore di tentativo del coefficiente sismico  $K_h$
- 2) Ricercare il  $F_{s\min}$  e la superficie di scorrimento associata
- 3) Plottare la curva  $F_s - K_h$  ottenuta con uno o più metodi d'analisi
- 4) Determinare  $K_c (= a_c/g)$  come il valore di  $K_h$  (ev. minimo tra i vari metodi) per cui  $F_s=1$



# Stabilità in condizioni sismiche: calcolo spostamenti (metodo di Newmark)



Integrando le ordinate  $a(t) - a_c$

$$a_r(t) = a(t) - a_c$$

limitatamente agli intervalli  
in cui la velocità relativa  $v_r(t)$   
tra massa rigida e superficie è  $> 0$   
(anche con  $a_r(t) < 0$ )

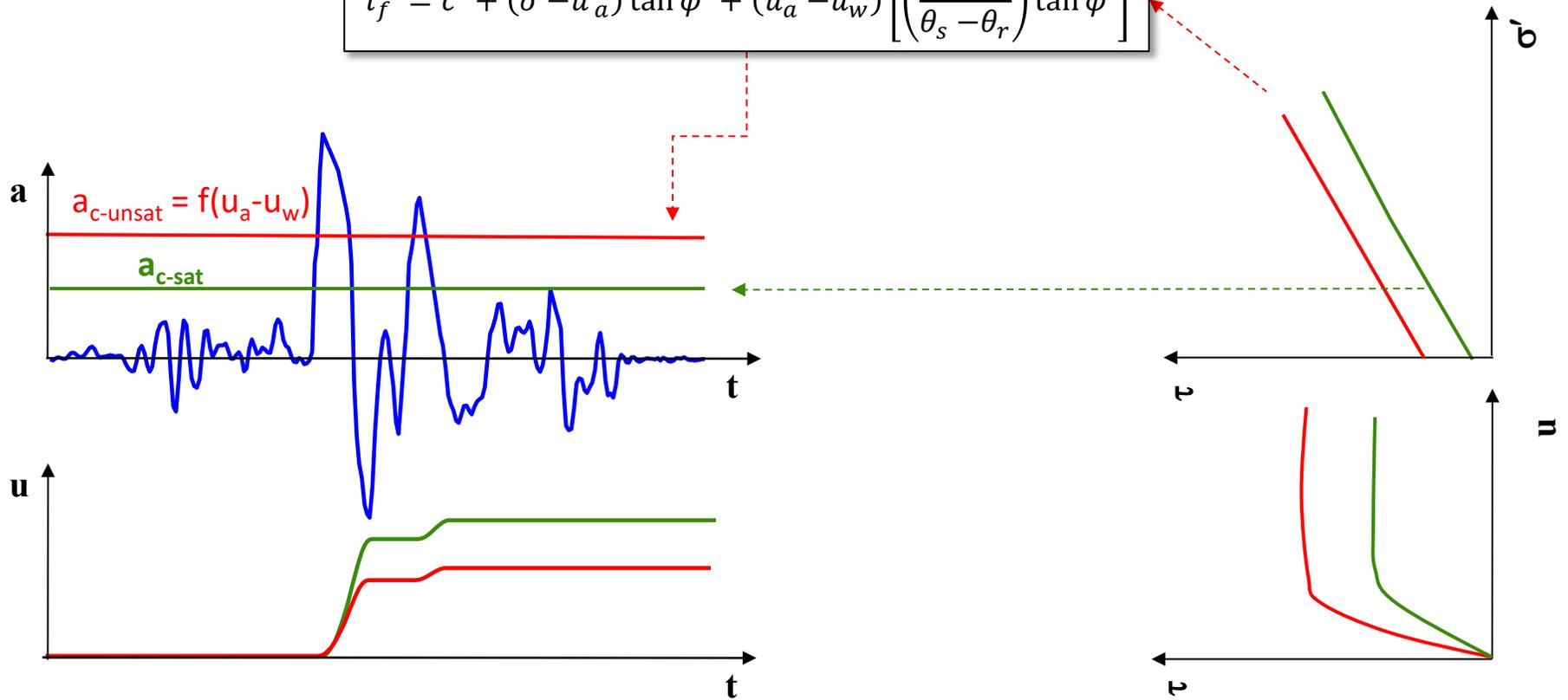
$$v_r(t) = \int a_r(t) dt$$

si ottiene lo  
**spostamento relativo residuo  $u_r$**

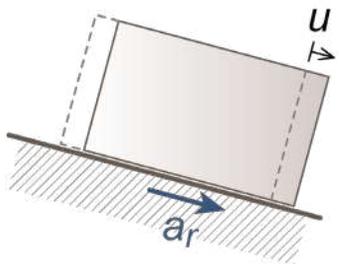
$$u(t) = \int v_r(t) dt$$

# Stabilità in condizioni sismiche: effetti della parziale saturazione

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \left[ \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \varphi' \right]$$



Blocco rigido

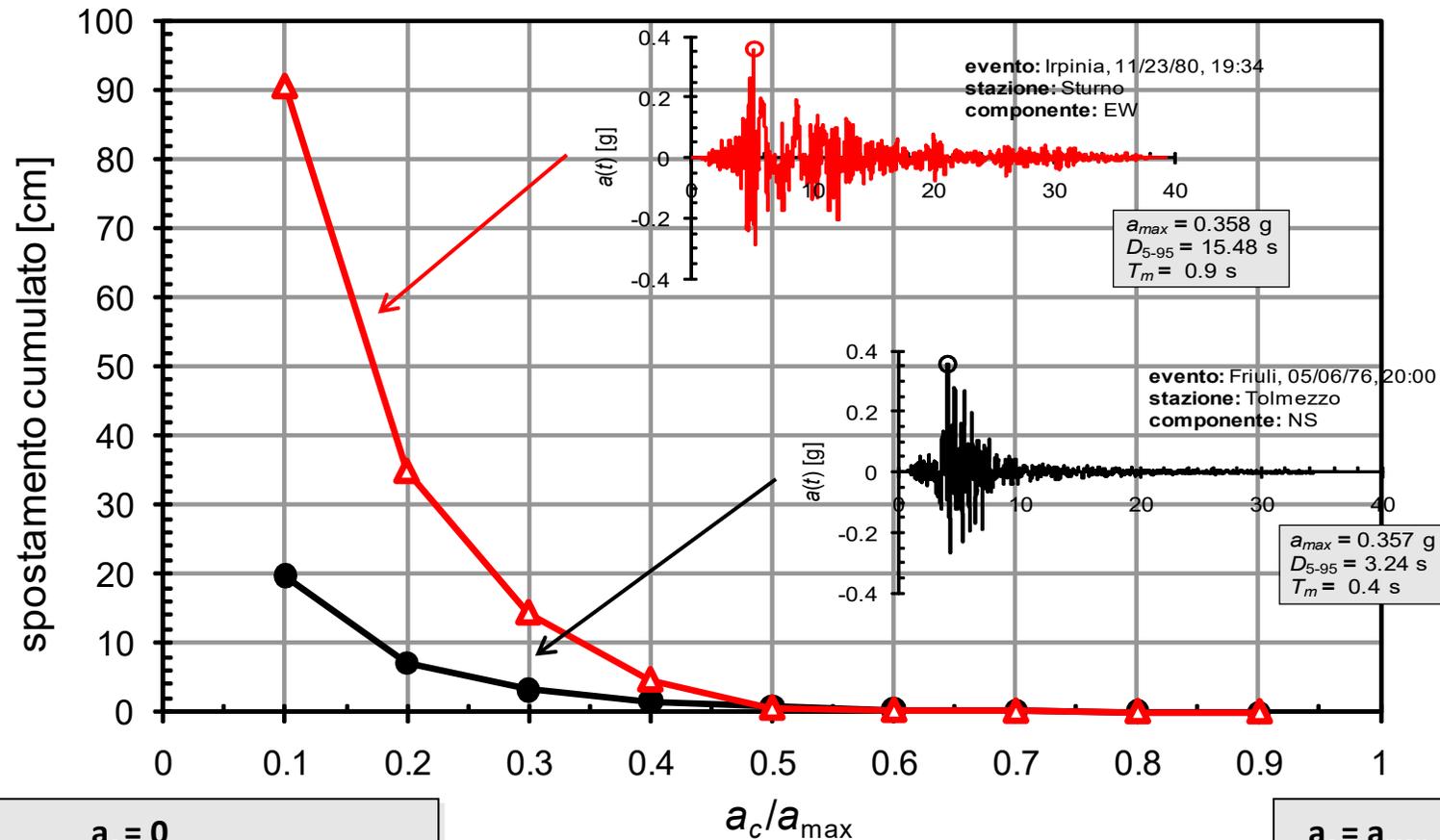


Pendio indefinito  $\rightarrow$

$$a_c = \frac{c'}{\gamma h \cos^2 \alpha (1 + \tan \alpha \tan \varphi')} + \frac{\tan \varphi' - \tan \alpha}{(1 + \tan \alpha \tan \varphi')} + \frac{S_r \tan \varphi' (u_a - u_w)}{\gamma h (1 + \tan \alpha \tan \varphi')}$$

# Stabilità in condizioni sismiche: stima degli spostamenti da relazioni empiriche

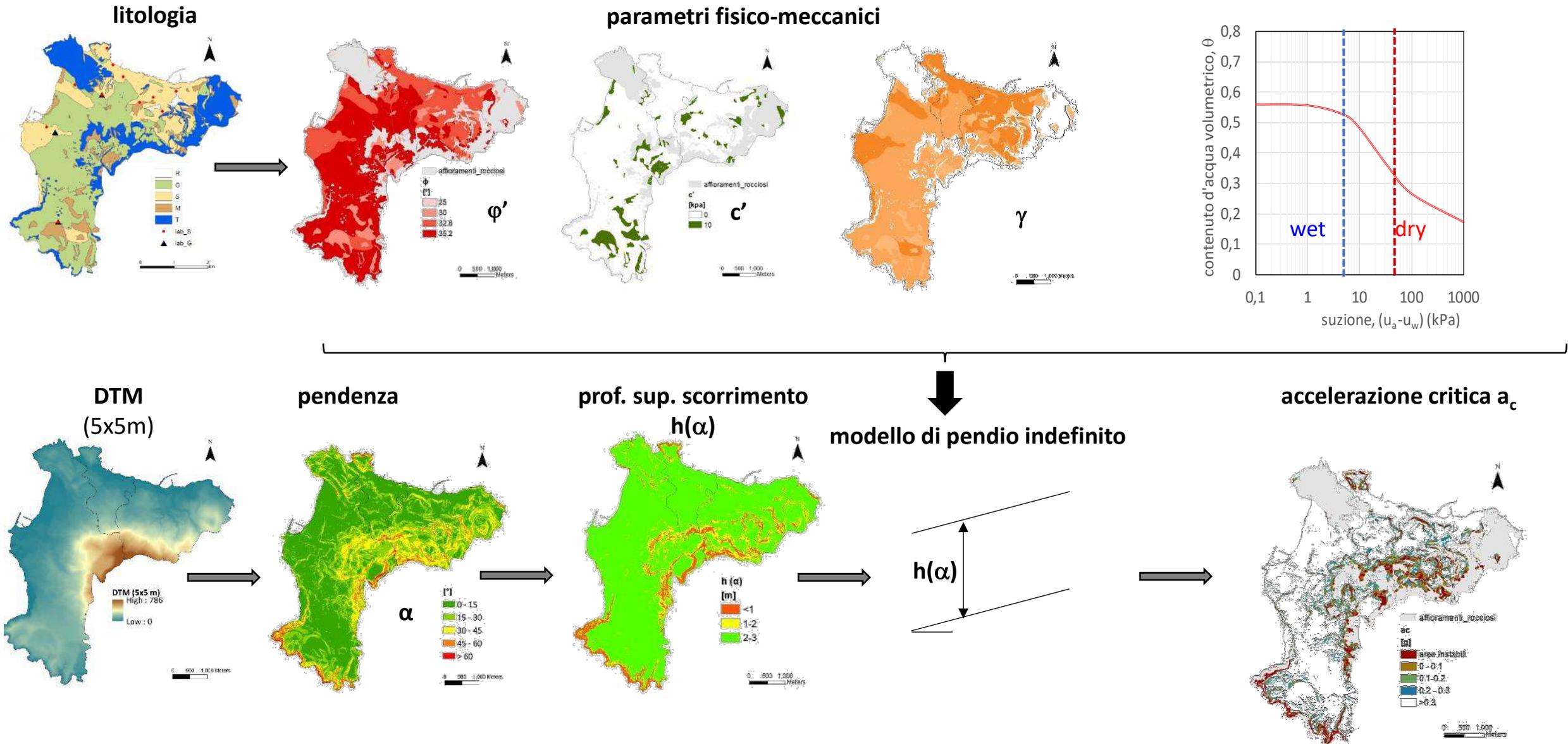
Applicando estensivamente il metodo con database accelerometrici, sono state ottenute relazioni predittive empirico-statistiche tra spostamenti e rapporto  $a_c/a_{max}$



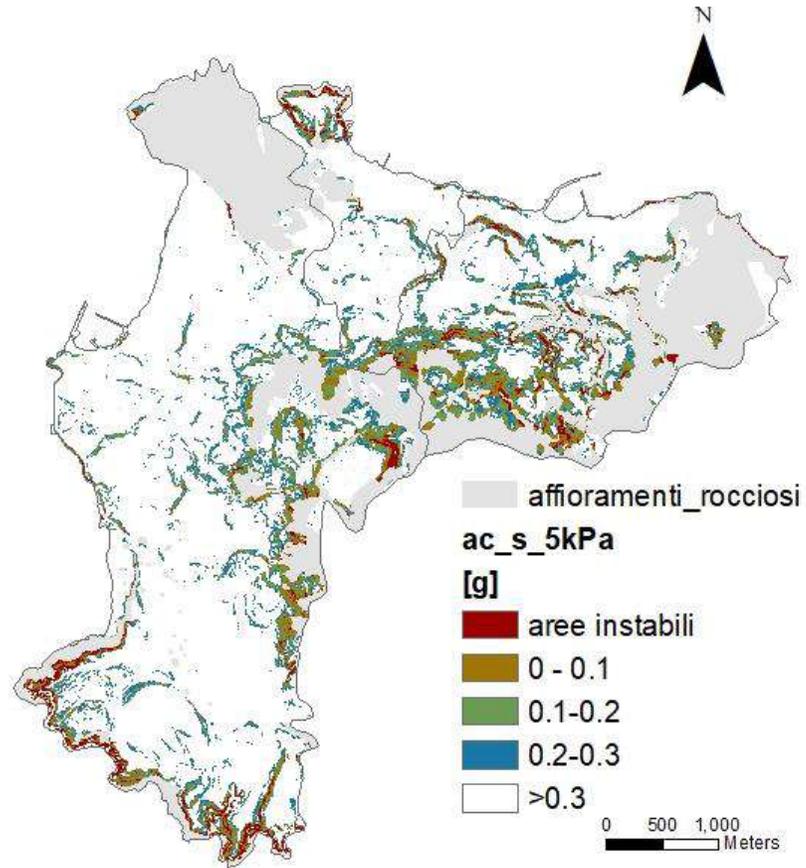
$a_c = 0$   
↓  
pendio instabile in condizioni statiche

$a_c = a_{max}$   
↓  
 $u=0$

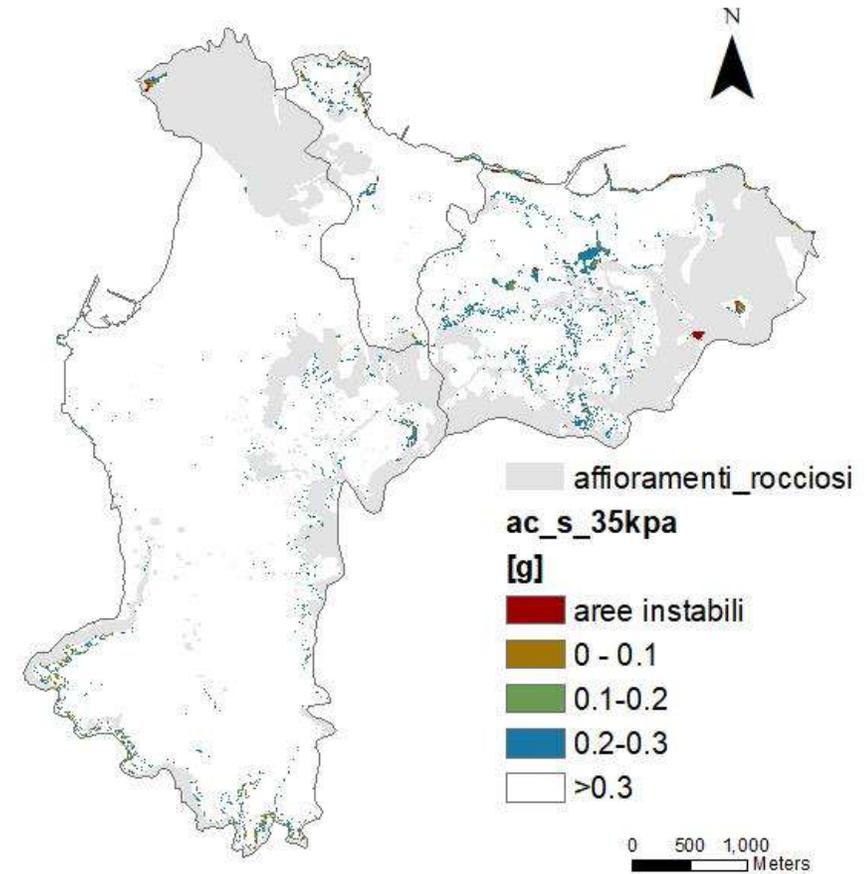
# Stabilità in condizioni sismiche: mappatura della suscettibilità in termini di $a_c$



# Stabilità in condizioni sismiche: dipendenza della suscettibilità dalla suzione



**Condizione 'wet'**  
(suzione = 5 kPa)



**Condizione 'dry'**  
(suzione 35 kPa)

# Contenuti

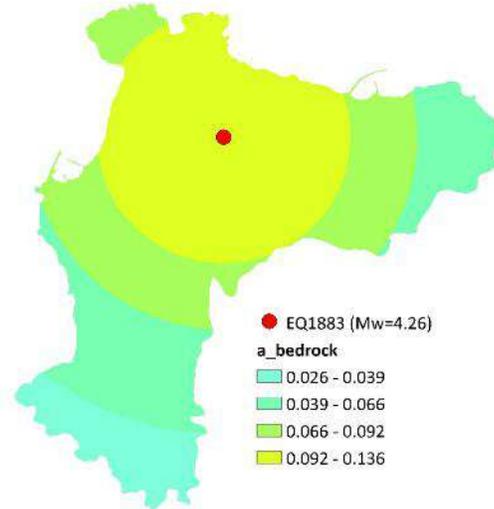
---

- Ischia come laboratorio multi-hazard sull'instabilità di versante
- Fattori d'influenza: predisponenti, preparatori, d'innescio
- Effetti del grado di saturazione delle coltri sull'instabilità statica e sismica
- **Analisi multi-scalare dell'instabilità in condizioni sismiche**
- Conclusioni

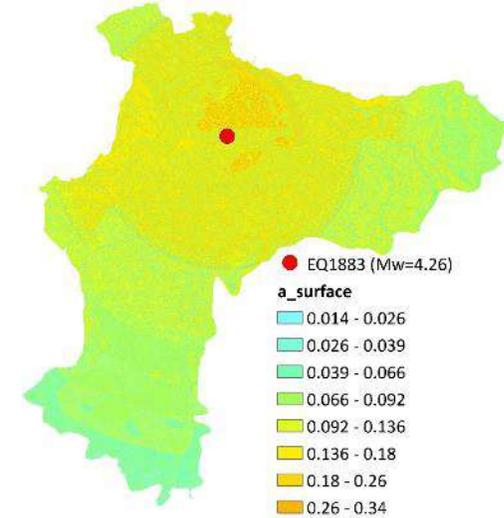
# Azione sismica - Approccio Deterministico vs Probabilistico

DSHA

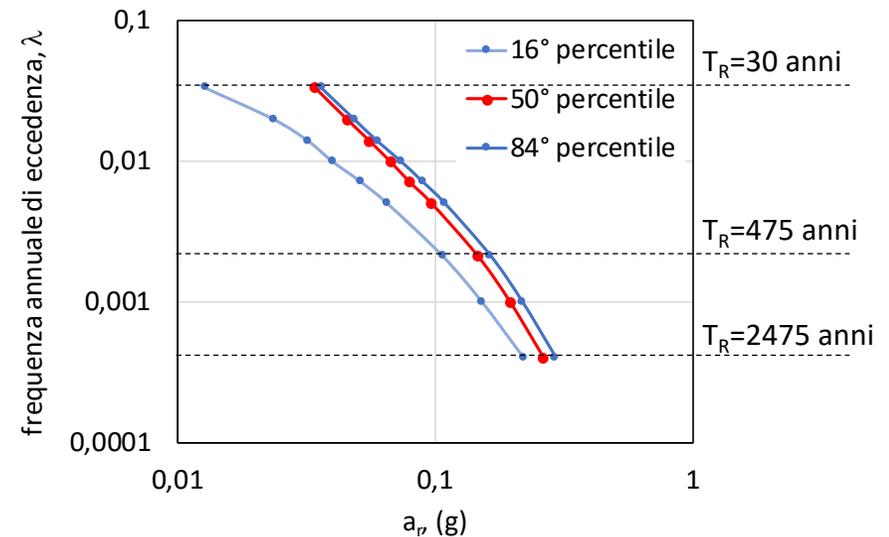
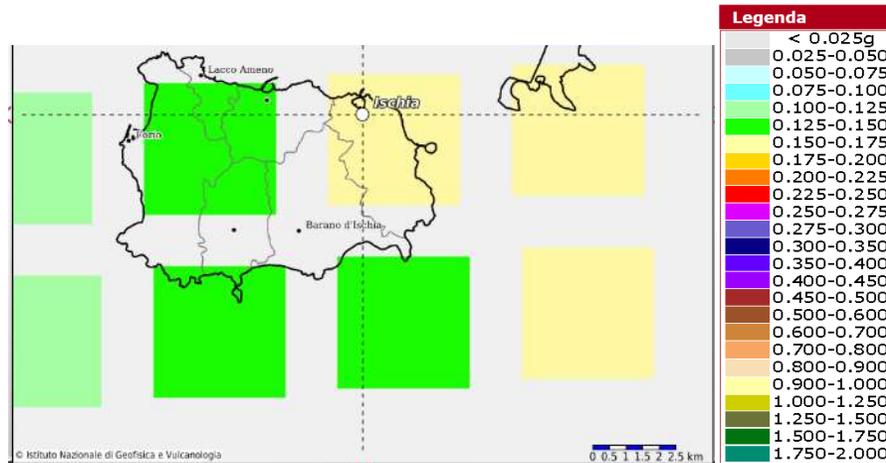
**Legge di attenuazione (GMPE)**  
*ad hoc* per terremoti in area vulcanica  
 (Lanzano & Luzi, 2019)  
 $a_r = f(M, R)$



$$a_s = S_S \cdot S_T \cdot a_r$$

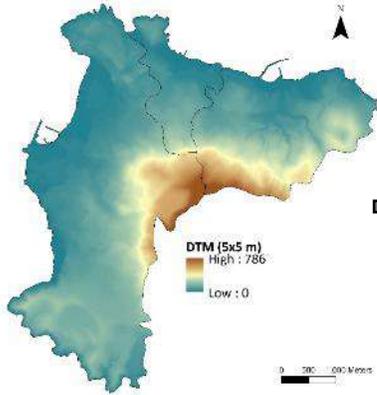


PSHA

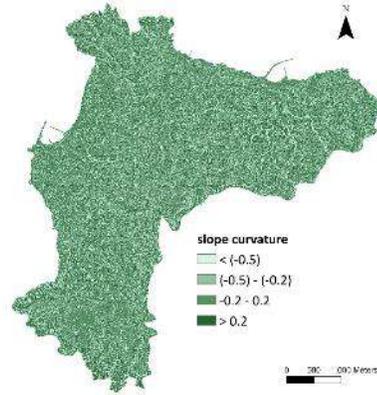


# Mappa probabilistica degli spostamenti sismo-indotti

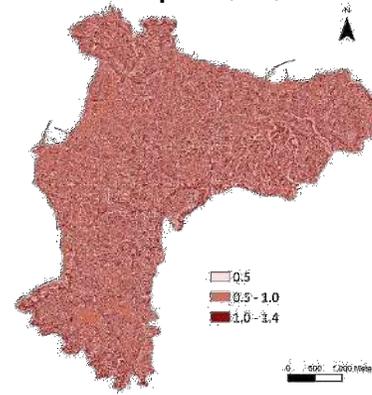
DTM



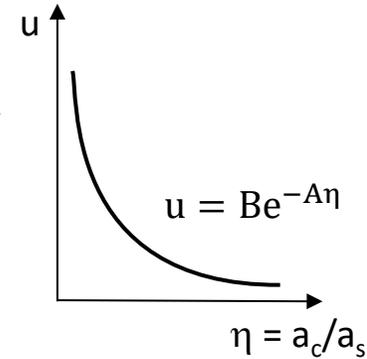
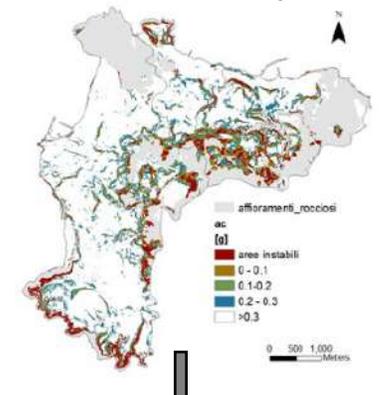
curvatura  
 $\alpha'$



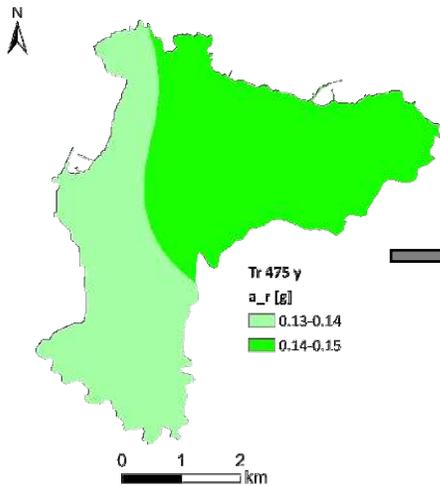
amplificazione topografica  
 $S_T = f(\alpha')$



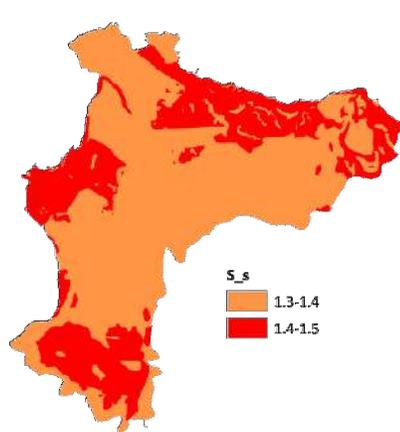
accelerazione critica  
 $a_c$



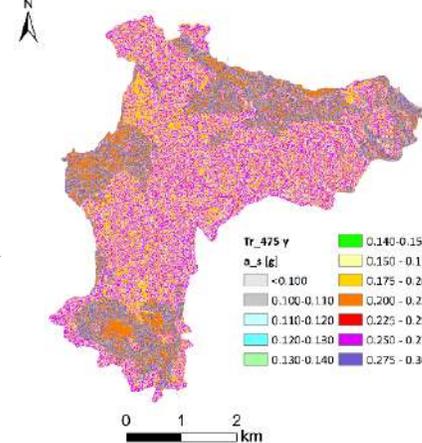
mappa probabilistica dell'accelerazione di riferimento  
 $a_r = f(T_{Rr}, p)$



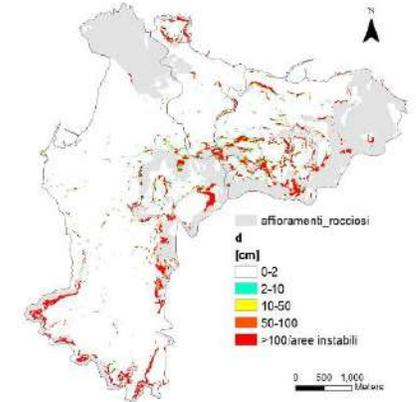
amplificazione stratigrafica  
(Tropeano et al., 2018)  
 $S_s = f(a_r, \text{cat. di sottosuolo, MS})$



$a_s = S_T S_s a_r$

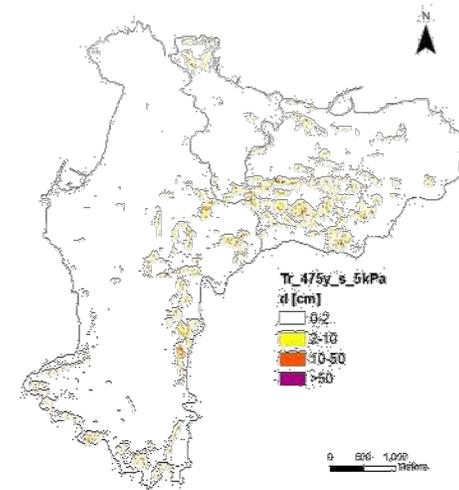
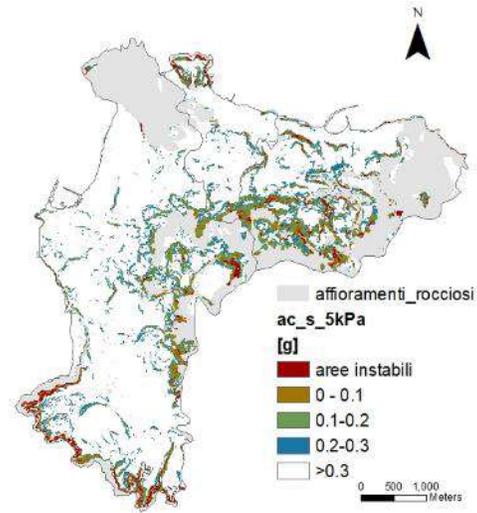


spostamenti sismo-indotti  
(Gaudio et al., 2020)  
 $u = f(a_c/a_s)$

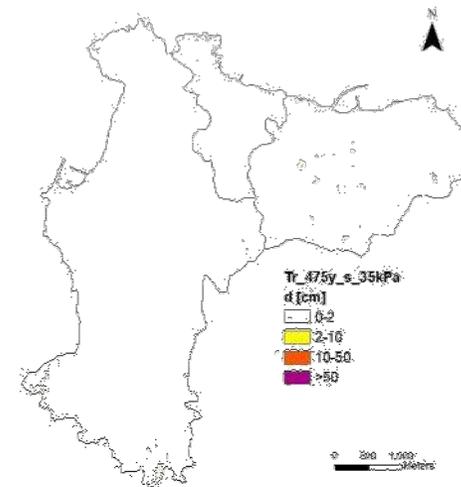
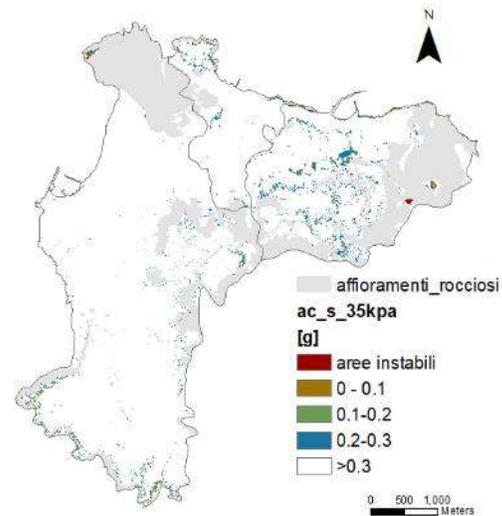


# Effetto della saturazione sugli spostamenti sismo-indotti

Condizione 'wet'  
(suzione = 5 kPa)



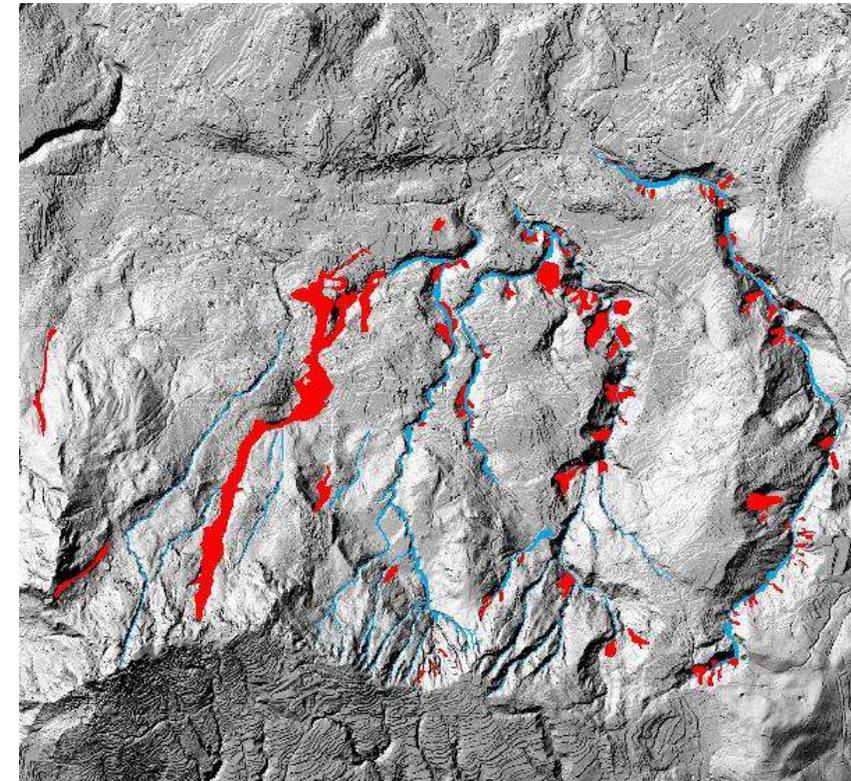
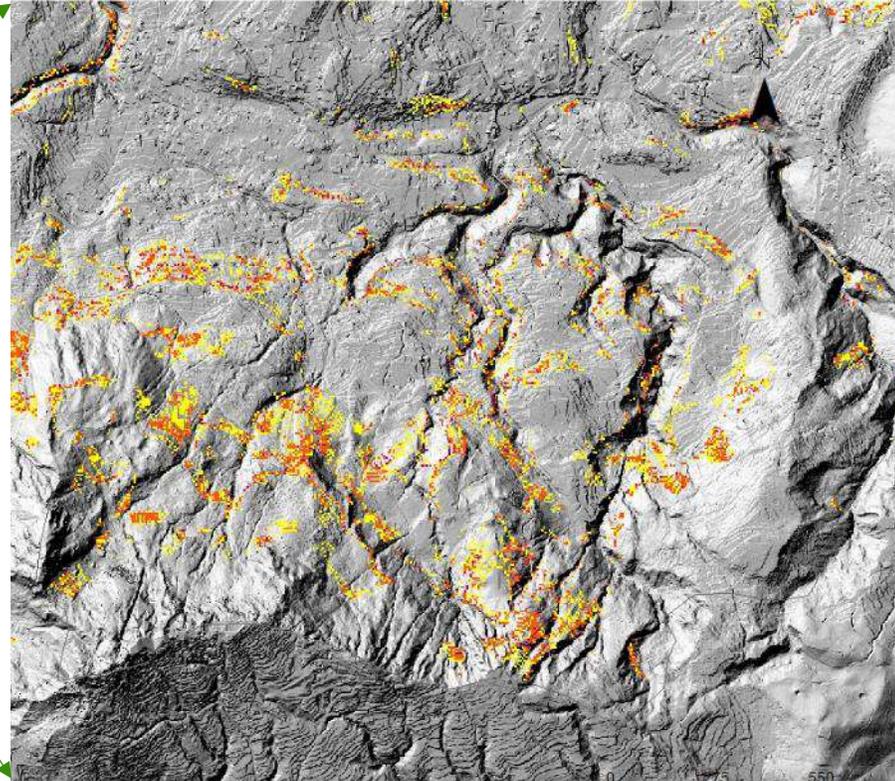
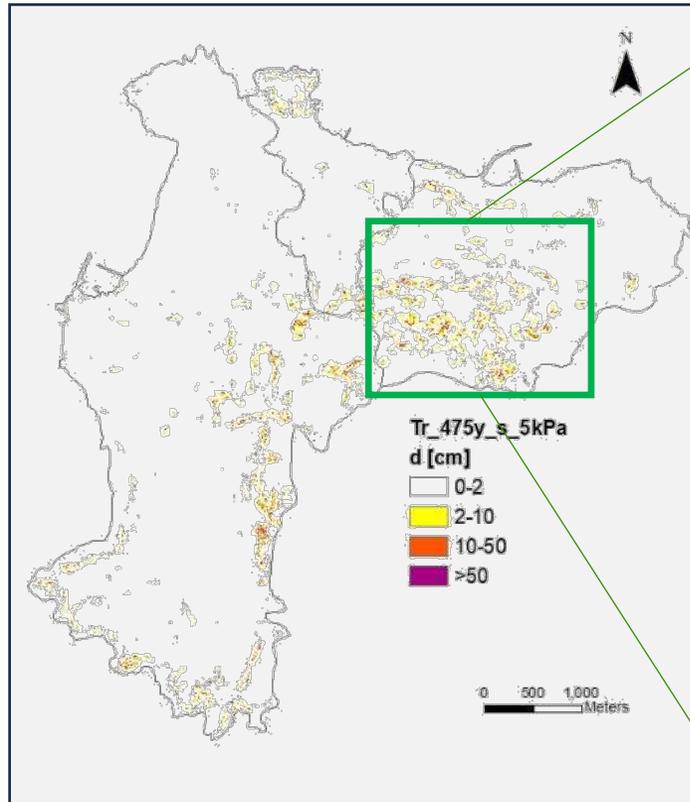
Condizione 'dry'  
(suzione 35 kPa)



# Aree critiche lungo il versante N dell'Epomeo – Condizione 'wet'

$T_R=475\text{anni} - s=5\text{ kPa}$

Fenomeni franosi 26-XI-2022



Le zone caratterizzate dagli spostamenti più significativi corrispondono:

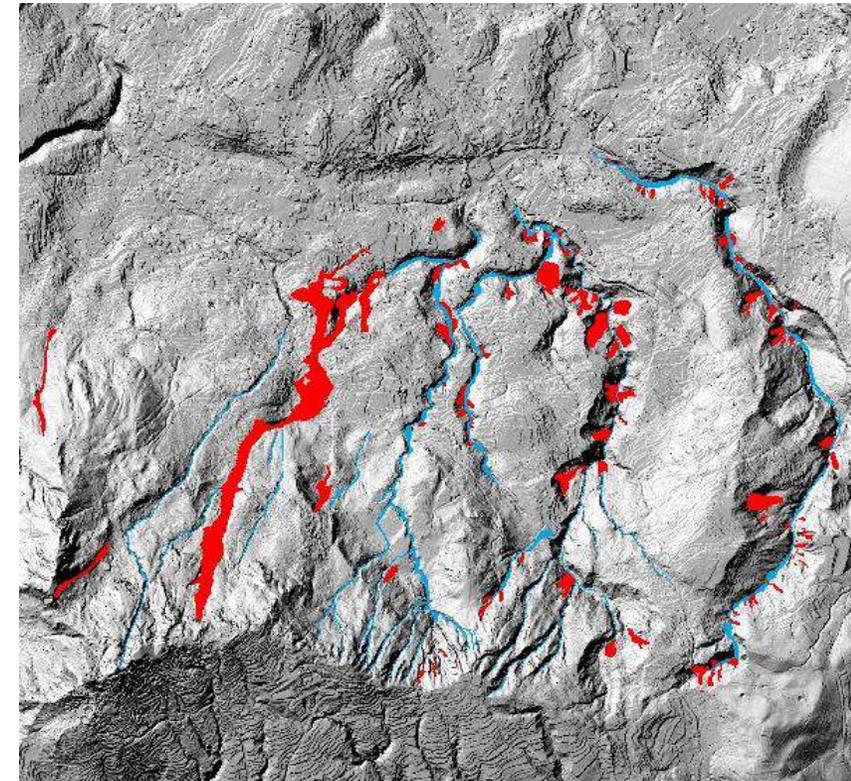
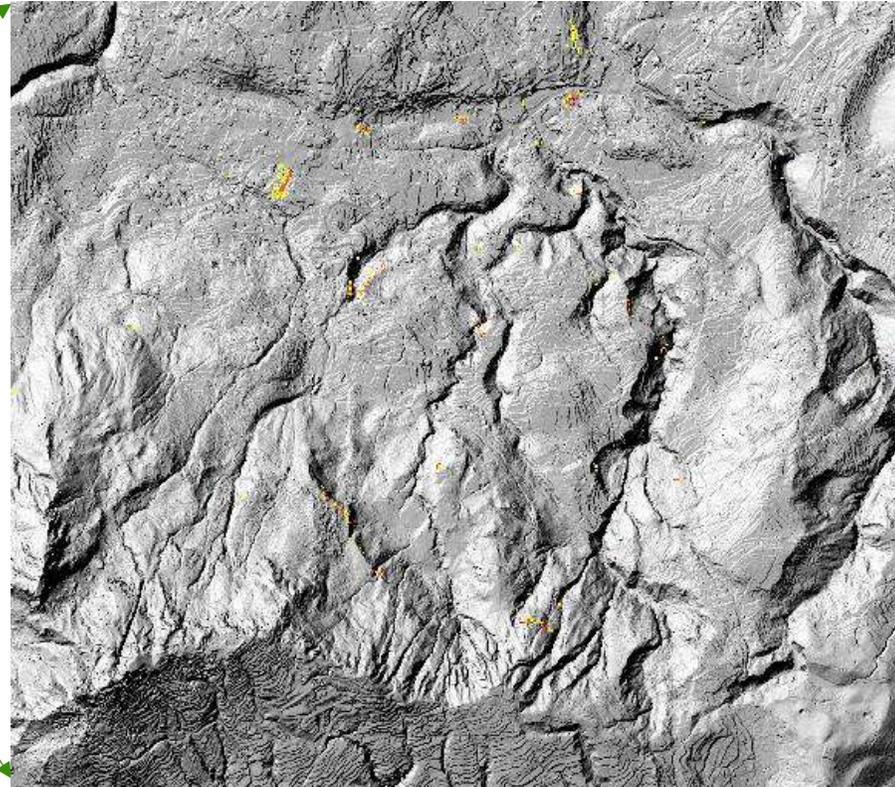
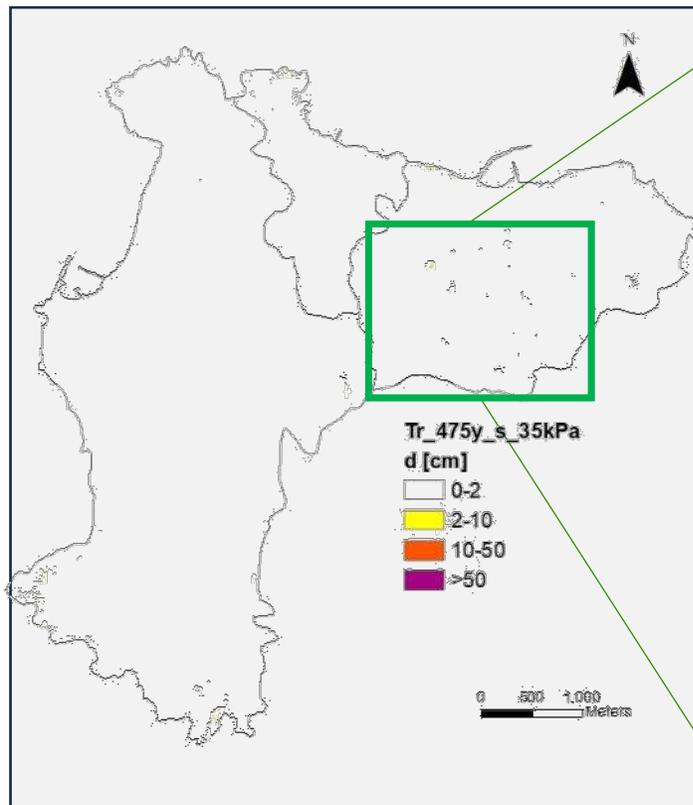
- alle nicchie di distacco lungo la cornice sommitale
- alle sponde ripide dei valloni

Le stesse zone sono state interessate da scorrimenti in corrispondenza dell'evento franoso del 26.XI.2022

# Aree critiche lungo il versante N dell'Epomeo – Condizione 'dry'

$T_R=475\text{anni} - s=35\text{ kPa}$

Fenomeni franosi 26-XI-2022



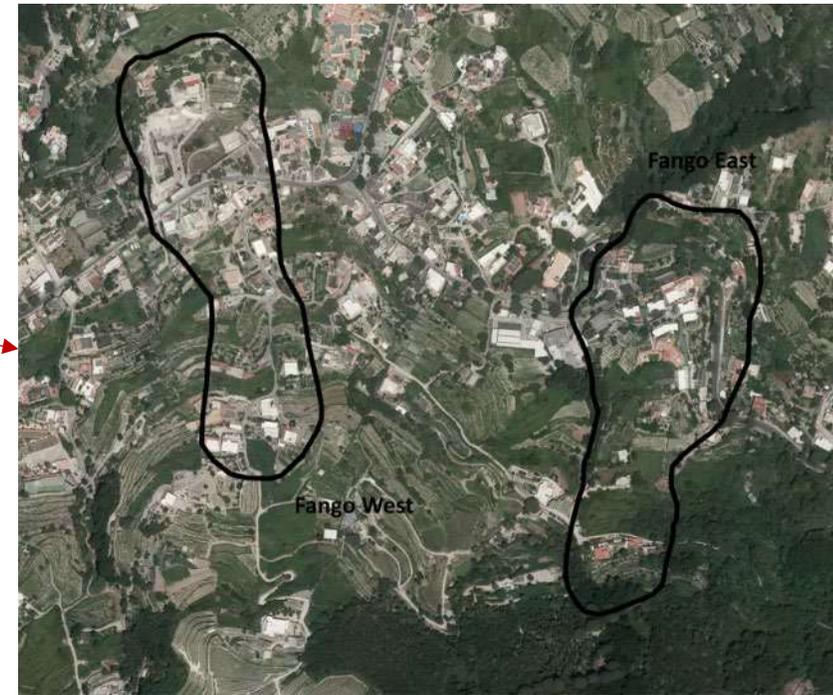
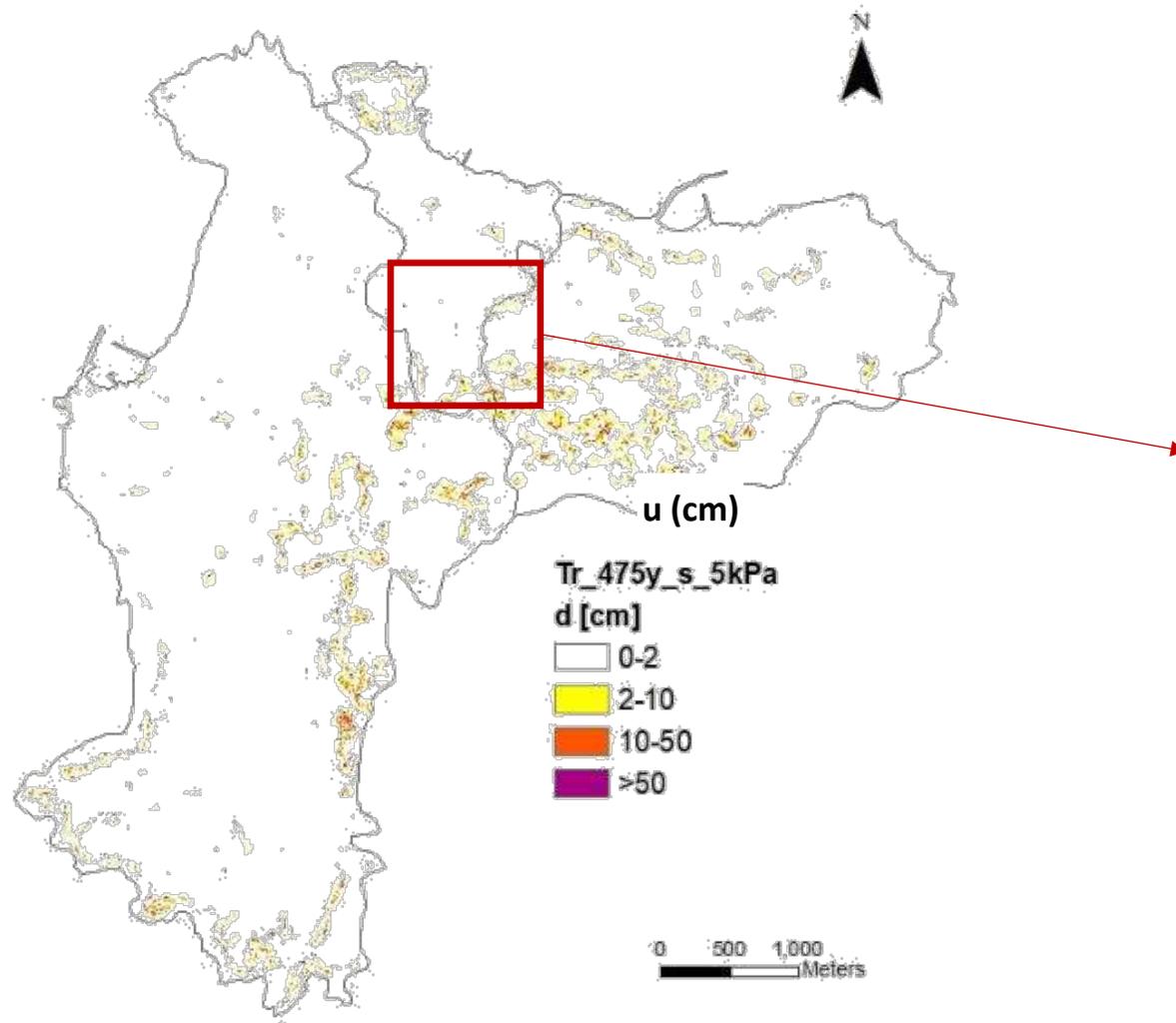
Le zone caratterizzate dagli spostamenti più significativi corrispondono:

- alle nicchie di distacco lungo la cornice sommitale
- alle sponde ripide dei valloni

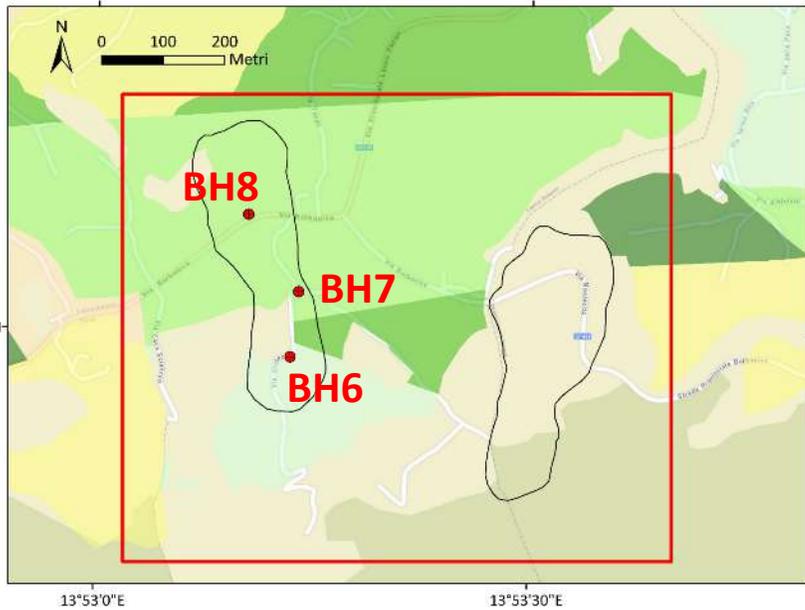
Le stesse zone sono state interessate da scorrimenti in corrispondenza dell'evento franoso del 26.XI.2022

In presenza di suzioni elevate (stagione asciutta) le stesse aree non sarebbero interessate da instabilità sismoindotta

# Area di studio progetto 'MASLIDE': Fango (Lacco Ameno)



# Area studio Fango: inquadramento geolitologico + MOPS + sondaggi UniNa



- Accumuli gravitativi di materiale eterogeneo ed eterometrico fino a blocchi monolitici di grandi dimensioni in matrice sabbioso argillosa
- Depositi epiclastici massivi molto grossolani formati da mega blocchi (>10cm) o blocchi di tufo intensamente fratturati. Trattasi di debris avalanche derivanti dal collasso gravitativo del settore settentrionale del blocco risorgente del Monte Epomeo.
- Epiclastiti da debolmente a mediamente litificate di colore giallastro e verdastro da massive a debolmente strutturate, composte da ceneri fine, litici lavici e tufi in matrice fine argillosa
- Tufi massivi di colore da verde smeraldo a verde chiaro, costituiti da lapilli e bombe pomicee e scoriacee. Tufi ignimbricitici litoidi massivi organizzati in grandi bancate tabulari



## Deposito di frana

Accumuli gravitativi di materiale eterogeneo (tufi, tufi saldati, piroclastiti) ed eterometrico, clasto-sostenuti o a sostegno di matrice argilloso-sabbiosa.  
*OLOCENE SUPERIORE - ATTUALE*



## Deposito di frana antico

Accumuli gravitativi di materiale eterogeneo (tufi, tufi saldati) ed eterometrico, fino a blocchi di dimensioni superiori a vari mc, in matrice argillo-sabbiosa. Talora affiorano monoliti di tufo verde, messi in evidenza dall'azione morfoselettiva dei processi erosivi.  
*OLOCENE*

**MOPS**  
Fango

GC  
297 m/s

GM  
448 m/s

SFCO  
570-690 m/s

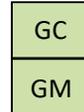
SFGRS  
670 m/s

980 m/s

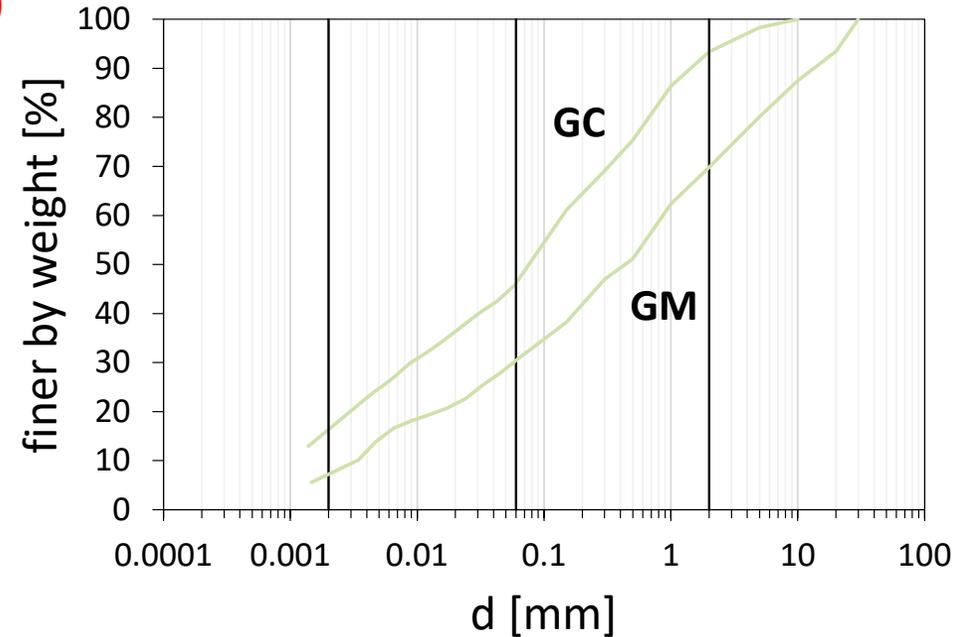
**BH6**  
**(20m)**



**BH7**  
**(10m)**

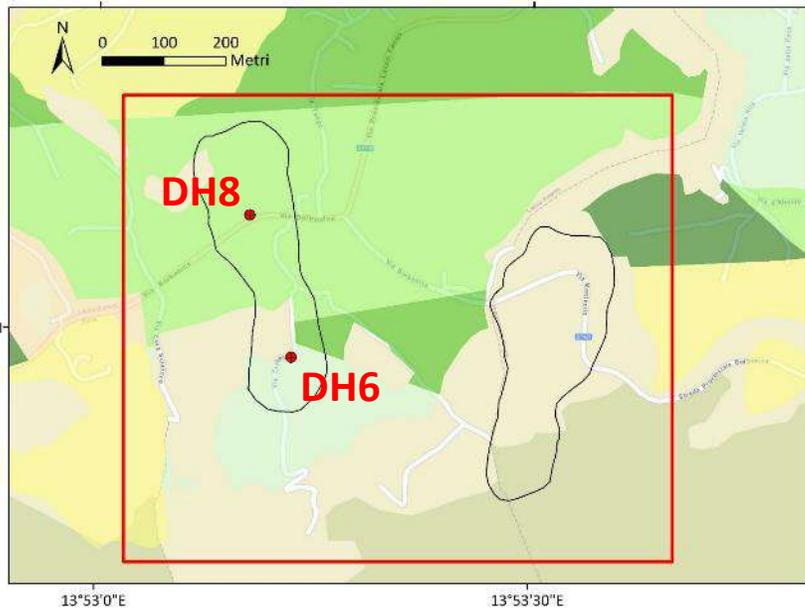


**BH8**  
**(20m)**

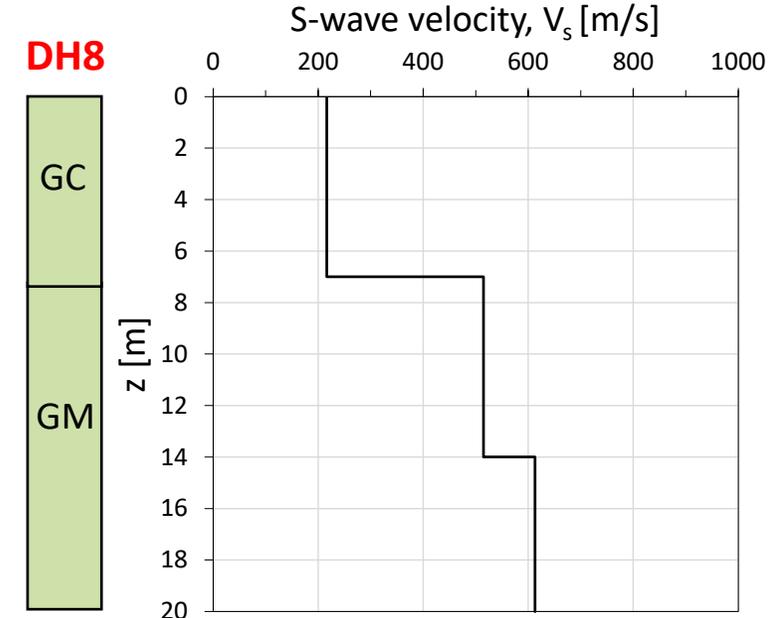
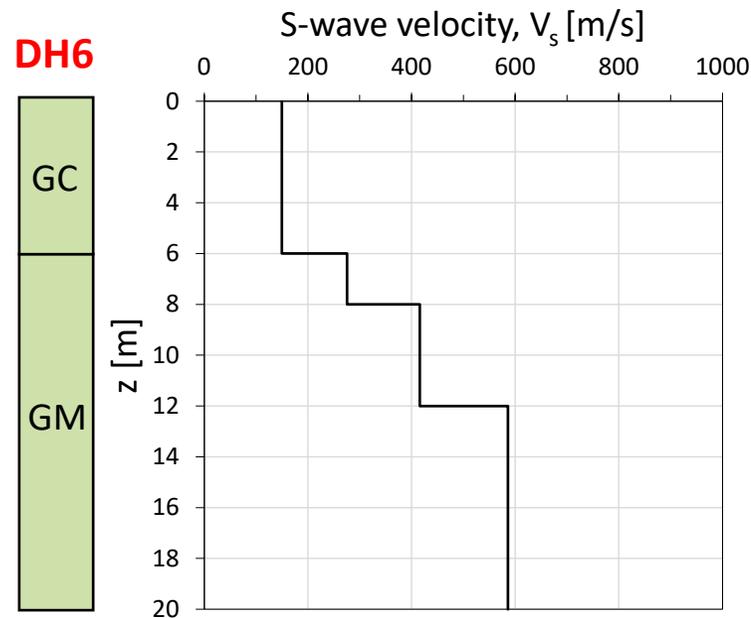
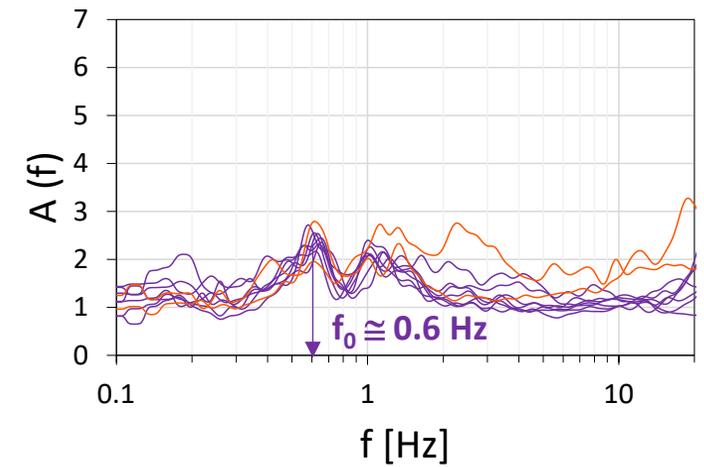
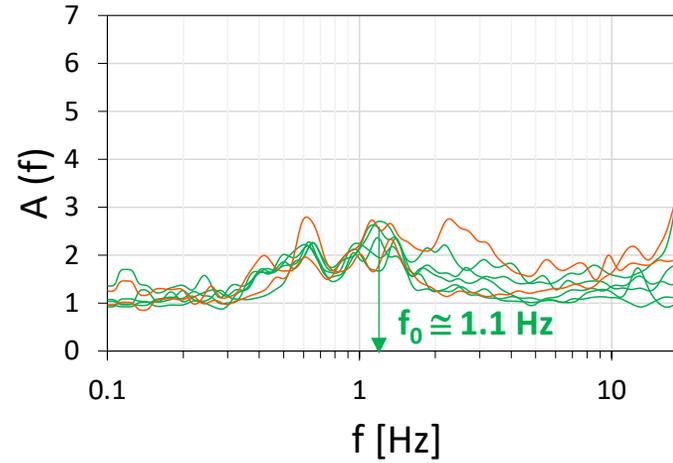


**MOPS = Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica**

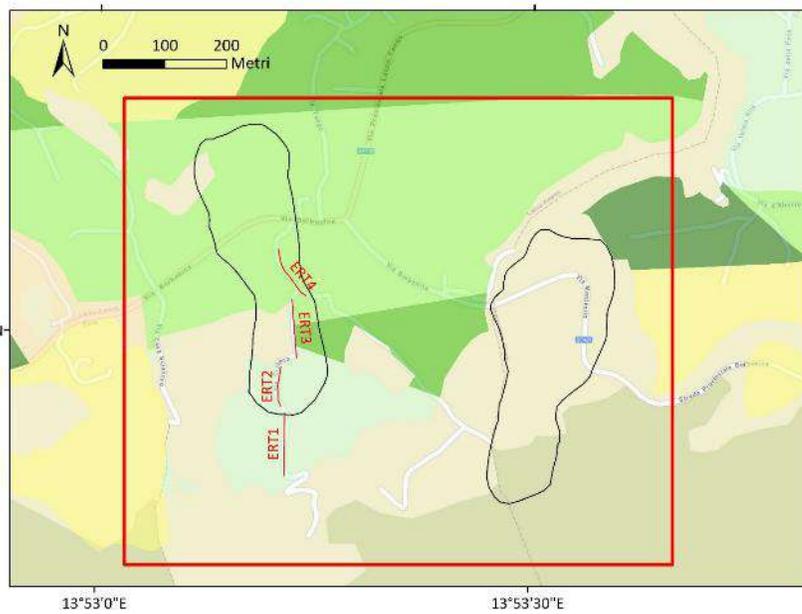
# Area studio Fango: rapporti spettrali HVSR e prove downhole



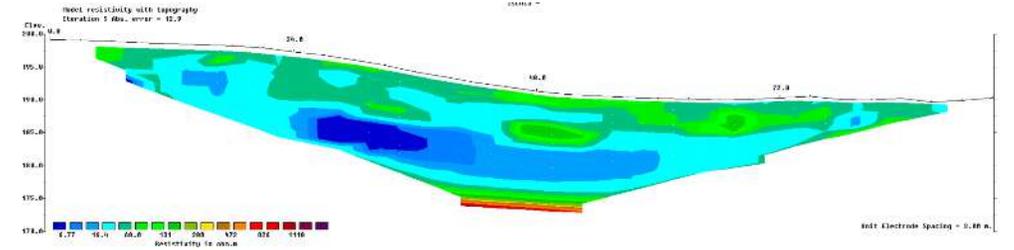
- Accumuli gravitativi di materiale eterogeneo ed eterometrico fino a blocchi monolitici di grandi dimensioni in matrice sabbioso argillosa
- Depositi epiclastici massivi molto grossolani formati da mega blocchi (>10cm) o blocchi di tufo intensamente fratturati. Trattasi di *debris avalanche* derivanti dal collasso gravitativo del settore settentrionale del blocco risorgente del Monte Epomeo.
- Epiclastiti da debolmente a mediamente litificate di colore giallastro e verdastro da massive a debolmente strutturate, composte da ceneri fine, litici lavici e tufi in matrice fine argillosa
- Tufi massivi di colore da verde smeraldo a verde chiaro, costituiti da lapilli e bombe pomicee e scoriacee. Tufi ignimbrici litoidi massivi organizzati in grandi bancate tabulari



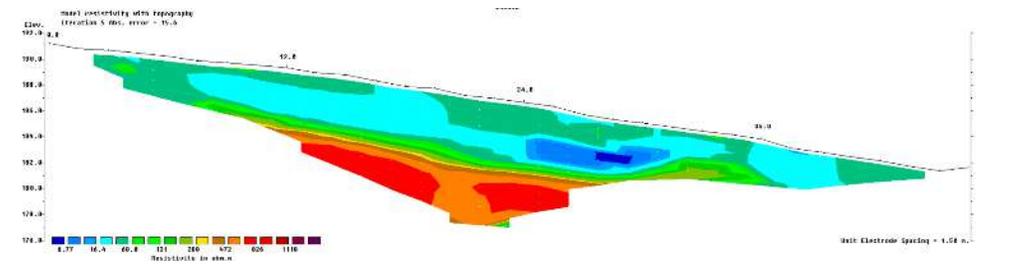
# Area studio Fango: tomografie di resistività elettrica (ERT)



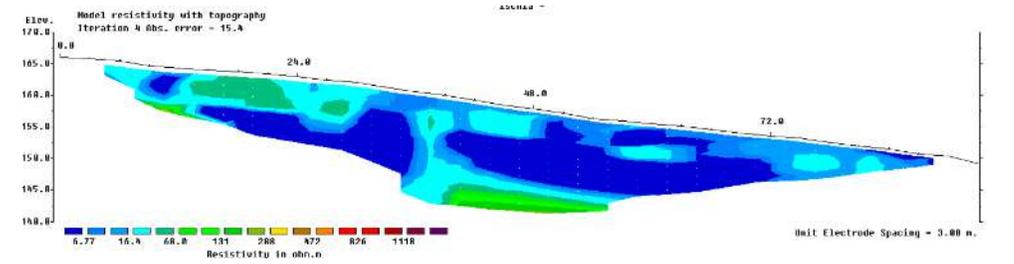
**ERT1**



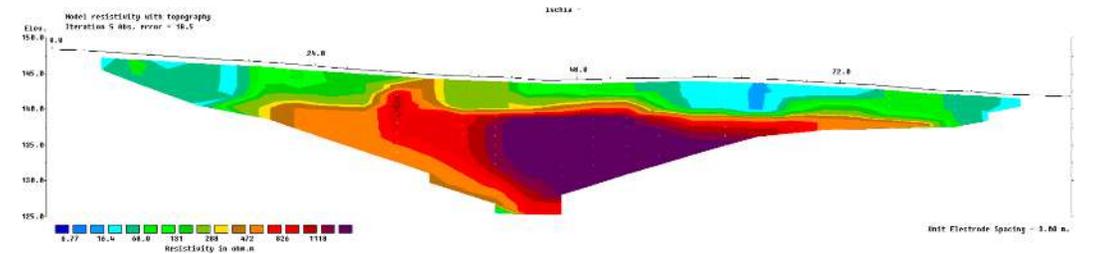
**ERT2**



**ERT3**



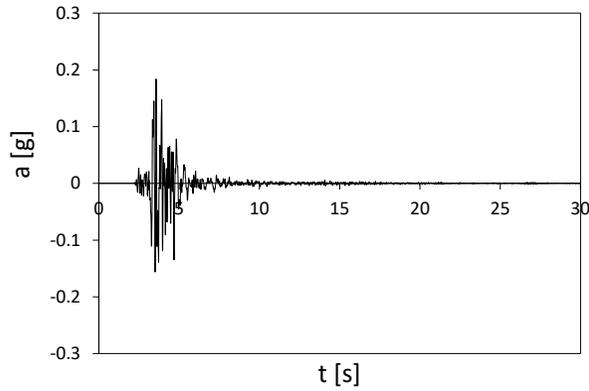
**ERT4**



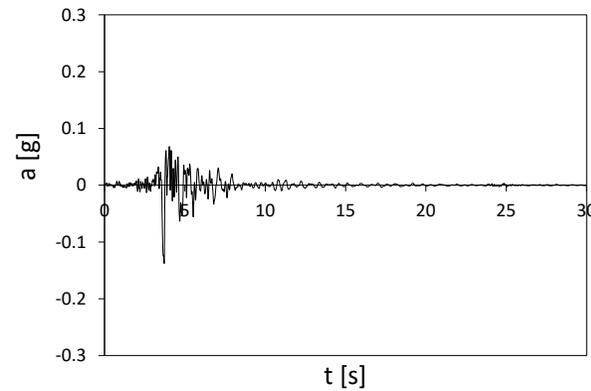
# Azione sismica per analisi dinamiche: accelerogrammi spettro-compatibili

criteri di selezione:  $4.0 \leq M_w \leq 5.5$   
 $0 \text{ km} \leq R_{\text{epi}} \leq 20 \text{ km}$

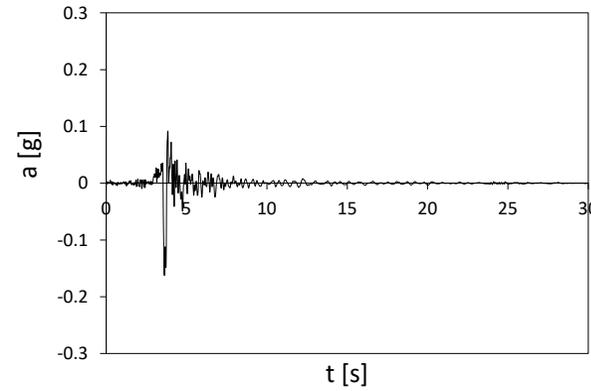
acc1



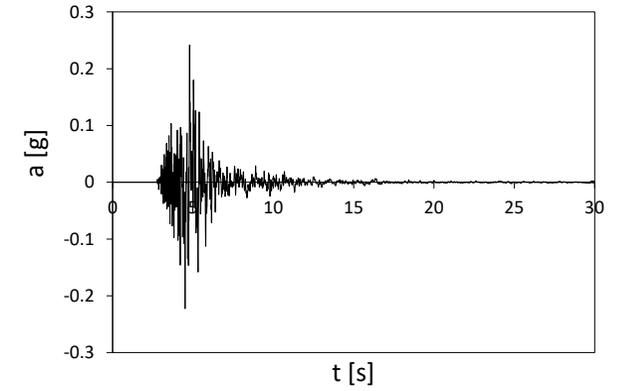
acc2



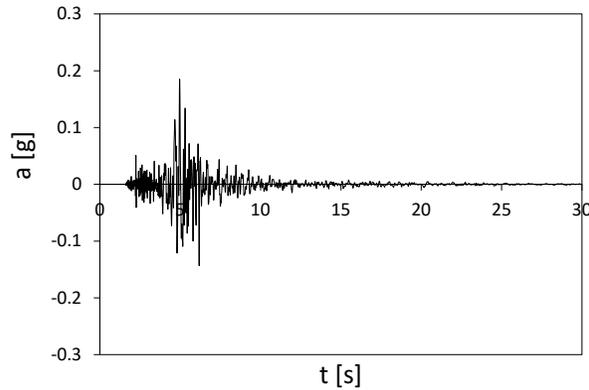
acc3



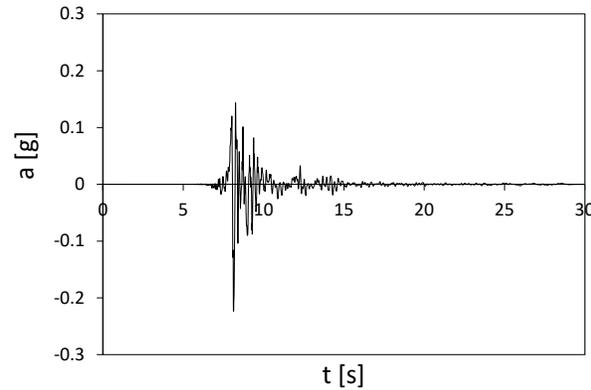
acc4



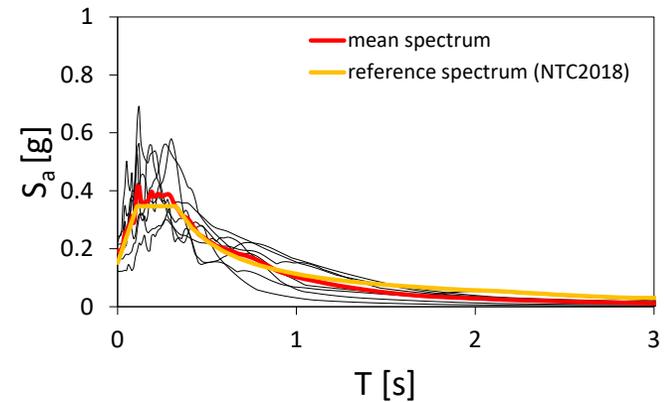
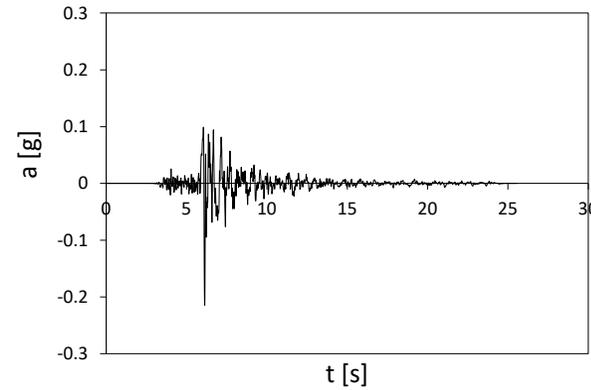
acc5



acc6

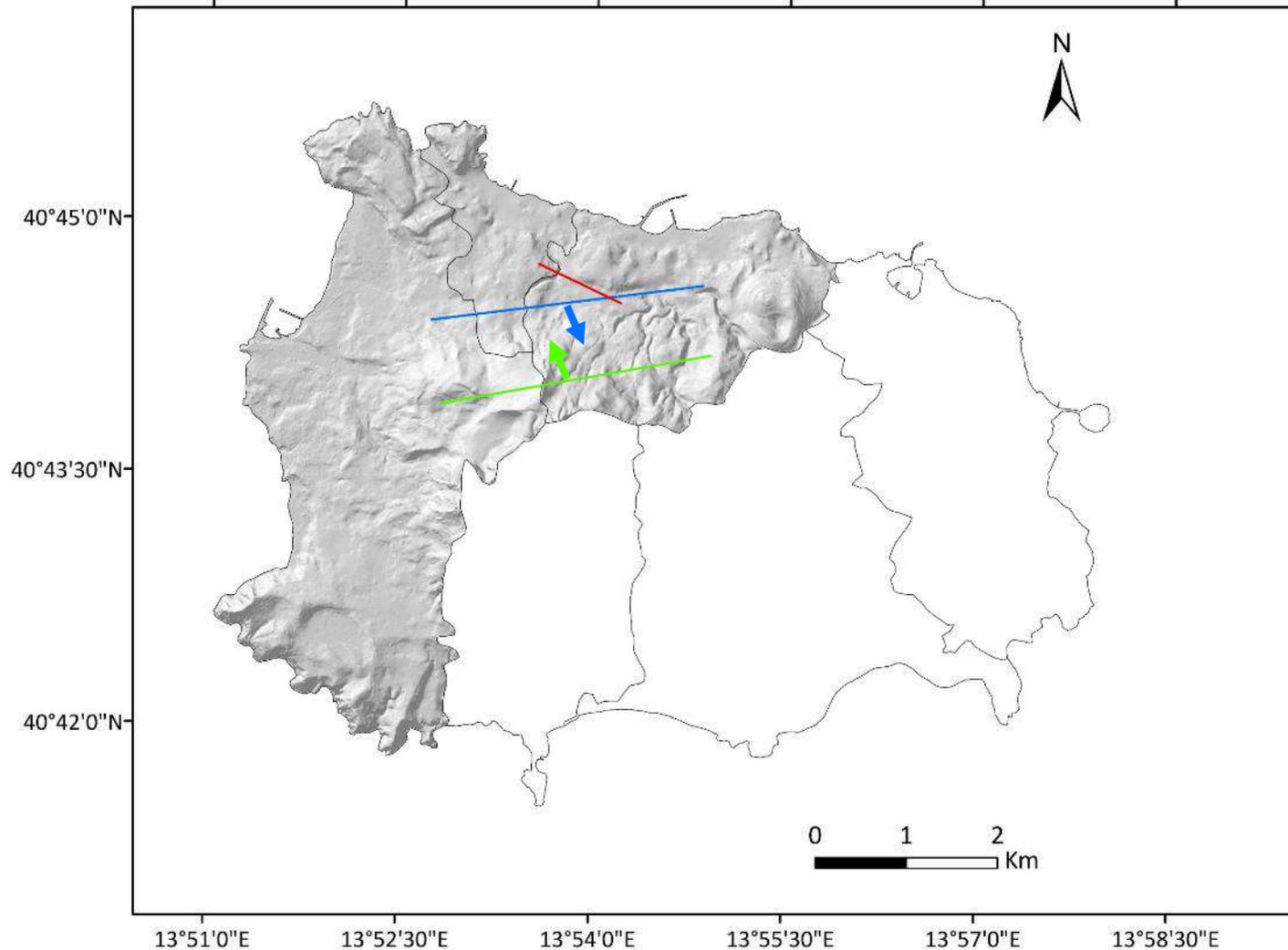


acc7



# Azione sismica per analisi dinamiche: ipotesi sulla sorgente sismica

Modelli di sorgente proposti in letteratura per l'evento del 21.VIII.2017



**DN** – De Novellis et al. 2018

**C** – Calderoni et al. 2019

**N** – Nazeri et al. 2021

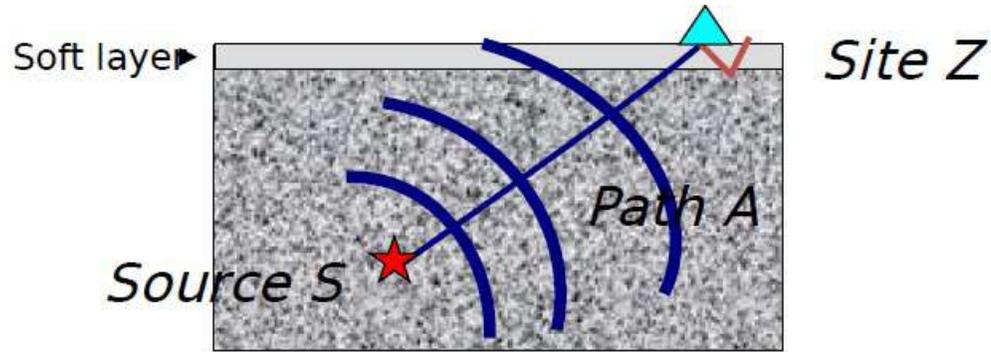
	<b>DN</b>	<b>C</b>	<b>N</b>
<b>L [m]</b>	3000	3000	1000
<b>w [m]</b>	1800	1458.1	800
<b>depth [m]</b>	0	0	700
<b>strike [°]</b>	83	260	115
<b>dip [°]</b>	67	50	55
<b>rake [°]</b>	-85	-102	145
<b>fault type</b>	N	N	R
<b>M<sub>0</sub> [Nm]</b>	1.8E+15	1.2E+15	2.5E+15
<b>M<sub>w</sub></b>	4.1	4.0	4.2
<b>σ [bar]</b>	1.57	1.60	33.16

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.3$$

$$\sigma = \frac{8}{3\pi} \cdot \frac{M_0}{w^2 L}$$

(Madariaga, 1977)

# Azione sismica per analisi dinamiche: generazione accelerogrammi sintetici



Approccio del codice EXSIM  
(Motazedian & Atkinson, 2005)

$$U_{ij}(f, R) = S_i(f) \cdot A_{ij}(f, R) \cdot Z_i(f)$$

Sorgente

$$S_i(f) = \frac{\Omega_0}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right]}$$

$$\Omega_0 = \frac{2\Phi M_0}{4\pi\rho V_s^3 R}$$

$f_c$  = frequenza d'angolo  
 $\Phi$  = direttività  
 $M_0$  = momento sismico  
 $\rho$  = densità  
 $V_s$  = velocità onde S

Propagazione

$$A_{ij}(f, R) = \frac{1}{R} e^{-\frac{\pi f R}{Q(f) V_s}}$$

$$Q(f) = Q_0 f^\alpha$$

Amplificazione locale  $Z_i(f)$

# Azione sismica per analisi dinamiche: accelerogrammi generati

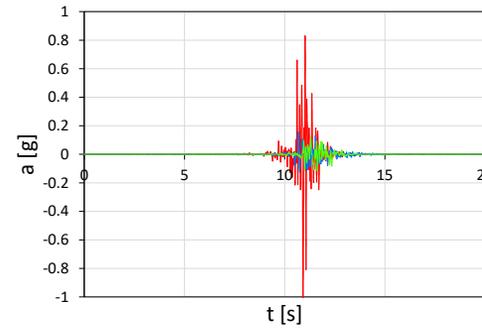
(Siti di studio per analisi di liquefazione)

**DN** – De Novellis et al. 2018

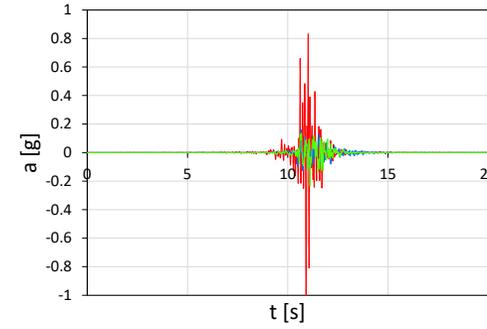
**C** – Calderoni et al. 2019

**N** – Nazeri et al. 2021

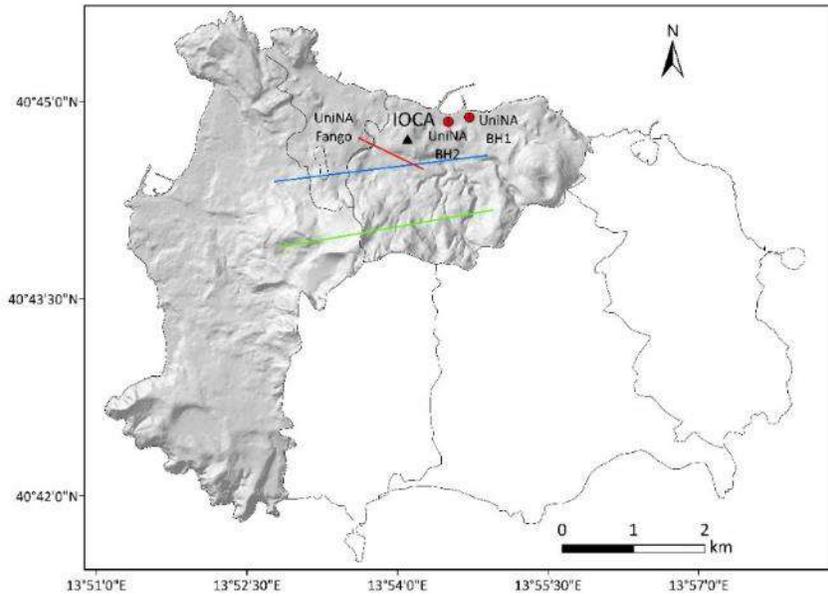
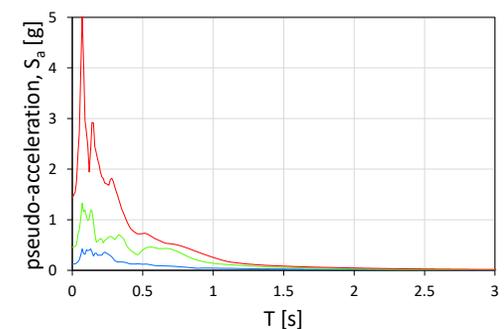
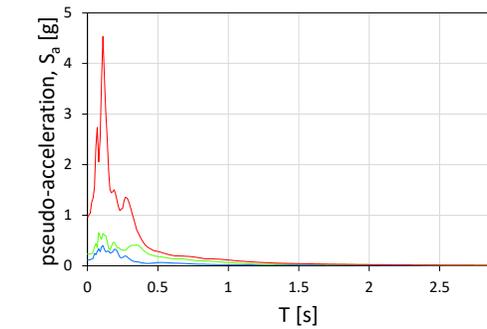
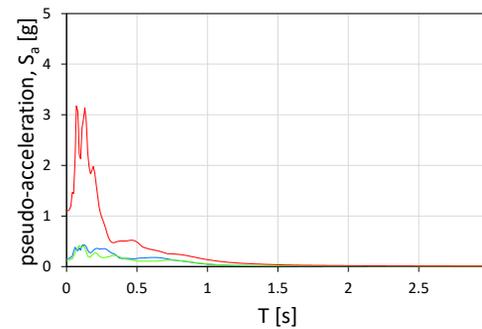
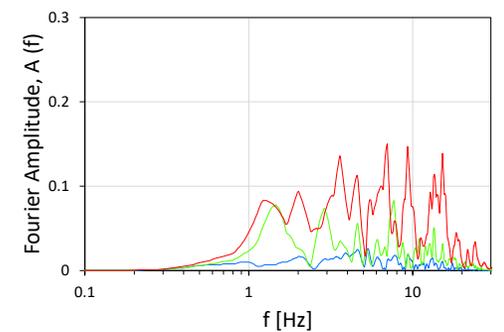
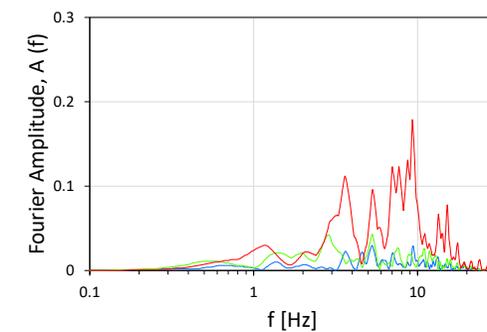
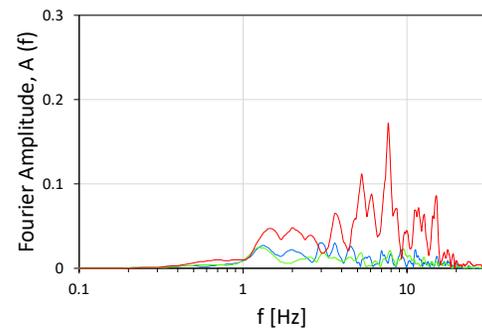
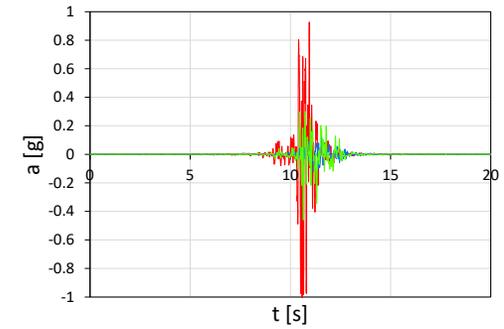
UniNA-BH1 (Pio Monte)



UniNA-BH2 (Piazza Scuole)

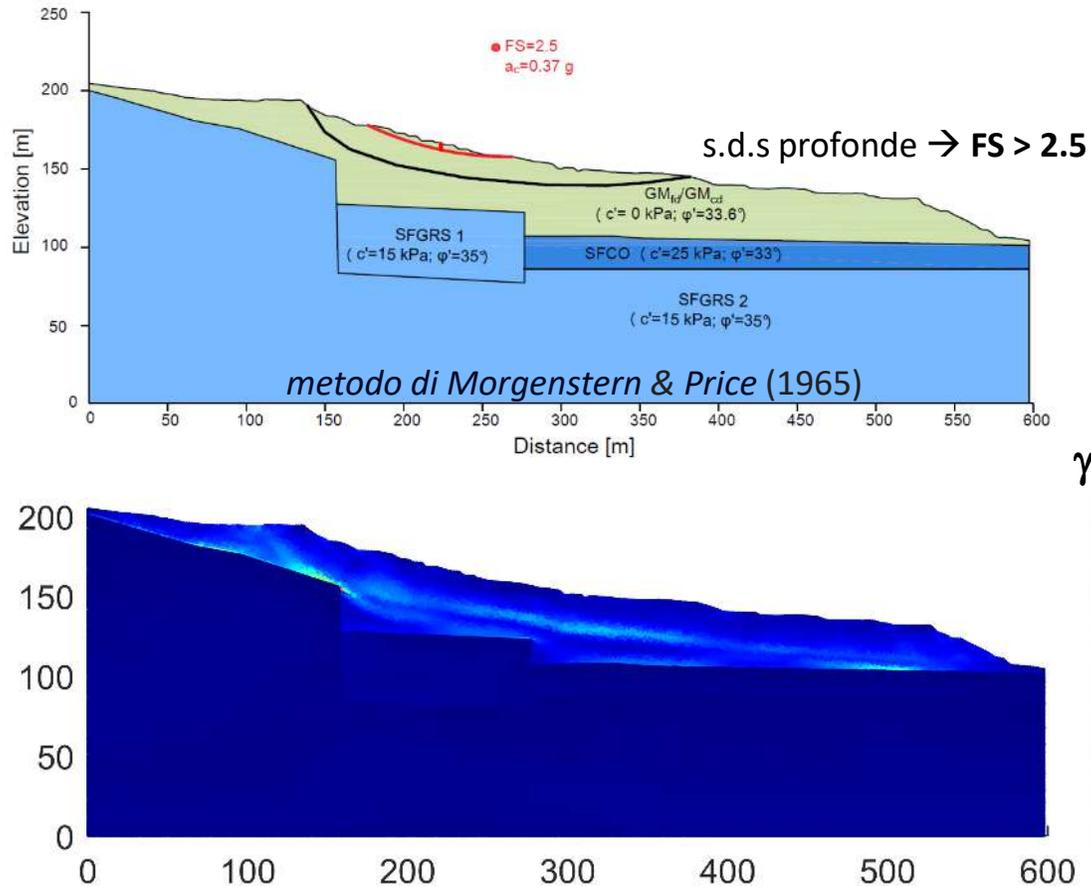


UniNA-Fango



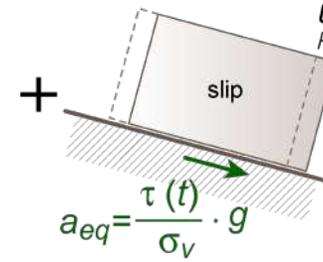
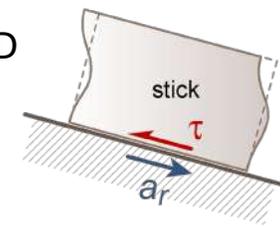
# Area studio Fango - analisi dinamica disaccoppiata

Le superfici di scorrimento «critiche»  
hanno fattori di sicurezza elevati

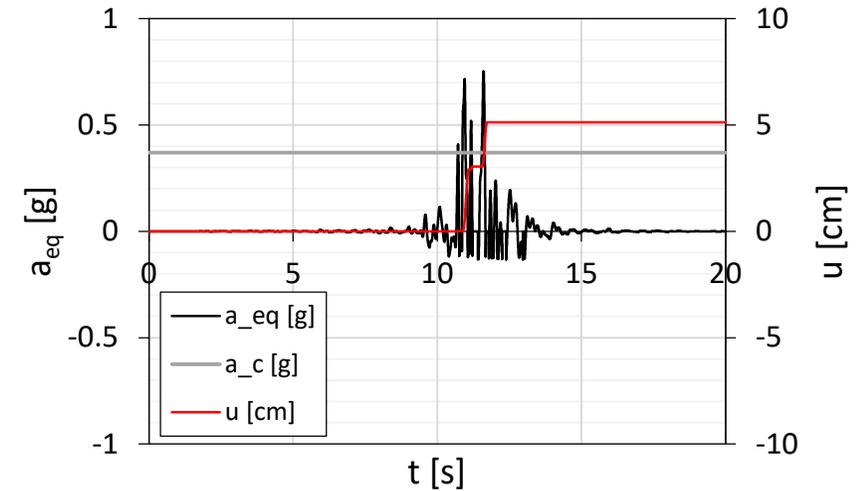


## Approccio disaccoppiato

Analisi FEM 2D  
(QUAD4M)



Analisi Newmark  
con  $a_{eq}(t)$

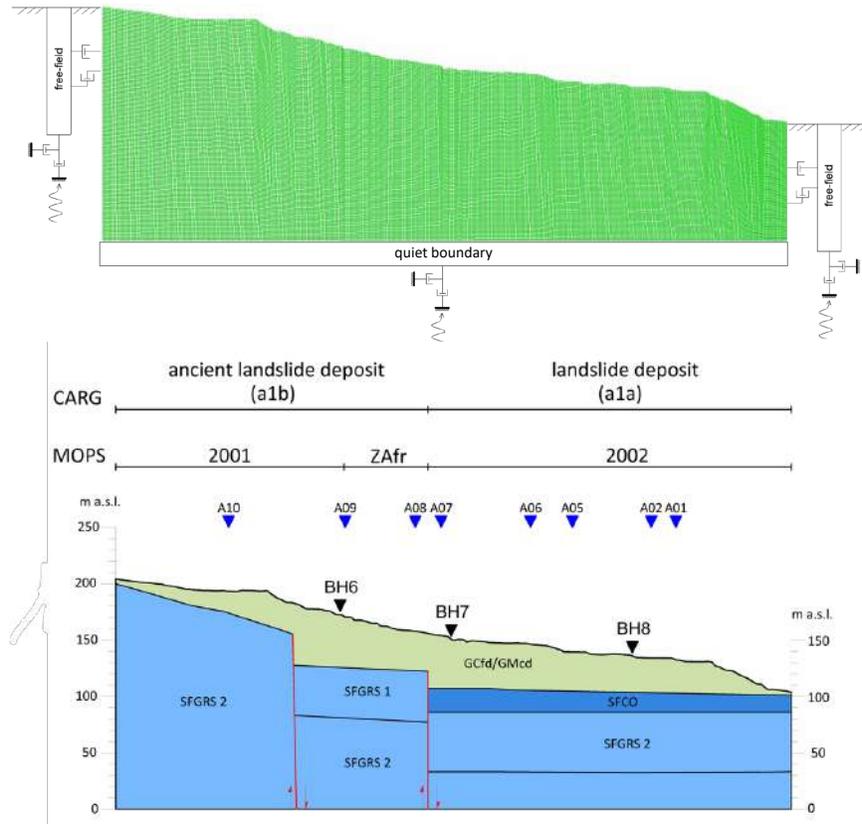


Con il modello di sorgente di *Nazeri et al. (2021)*  
si ottengono spostamenti dell'ordine dei **5 cm**

Negli altri casi, così come dalle mappe a scala territoriale,  
non viene mai superata l'accelerazione critica!!!

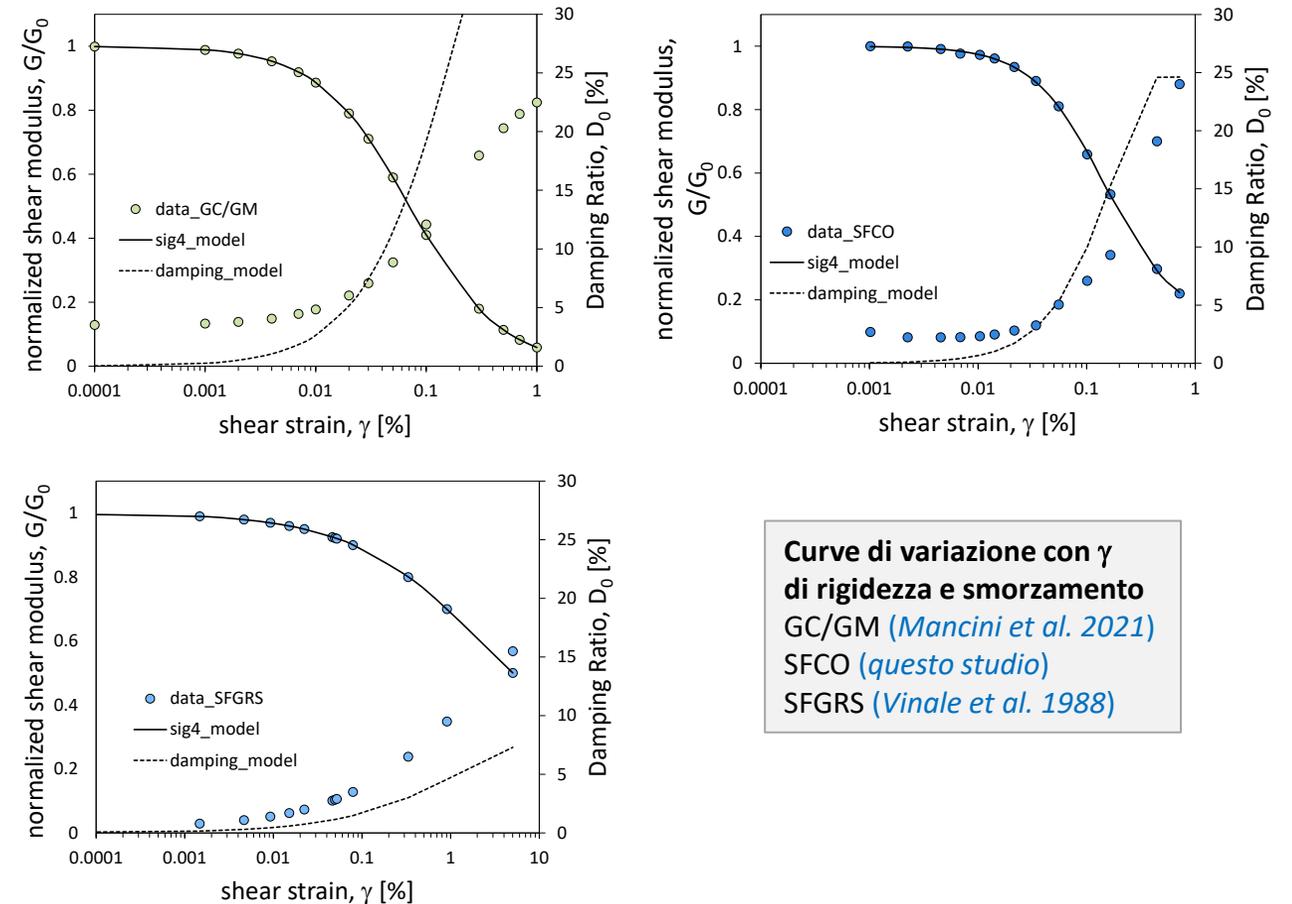
# Area studio Fango – modello per analisi dinamica avanzata

## Modello alle differenze finite 2D (FLAC)



	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'$ [kPa]	$\varphi'$ [°]	$V_s$ [m/s]	$G$ [MPa]	$K$ [MPa]
GC/GM	15.1	0	33.6	300	139	647
SFCO	20.3	25	33.0	700	1016	4741
SFGRS1	17.9	15	35.0	700	894	4172
SFGRS2	17.9	15	35.0	974	1731	8077

## Legame non lineare isteretico



**Curve di variazione con  $\gamma$  di rigidezza e smorzamento**  
 GC/GM (*Mancini et al. 2021*)  
 SFCO (*questo studio*)  
 SFGRS (*Vinale et al. 1988*)

$$M_s = y_0 + \frac{a}{1 + \exp\left(-\frac{L - x_0}{b}\right)}$$

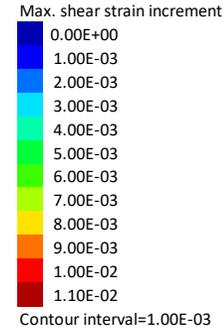
	$a$	$b$	$x_0$	$y_0$
GC/GM	1.0000	-0.4136	-1.15036	0.0000
SFCO	0.8759	-0.3340	-0.83125	0.1241
SFGRS1/SFGRS2	0.8020	-0.7334	0.33203	0.1980

# Area studio Fango – risultati analisi dinamica avanzata

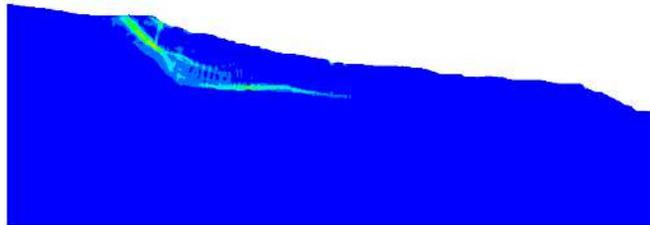
deformazione distorsionale

$$SSI = \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + 4\varepsilon_{xy}^2}$$

*De Novellis et al. 2018*

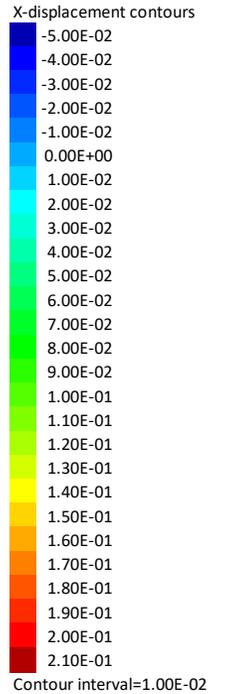
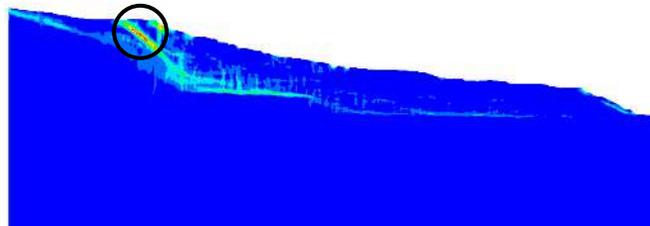


*Calderoni et al. 2019*

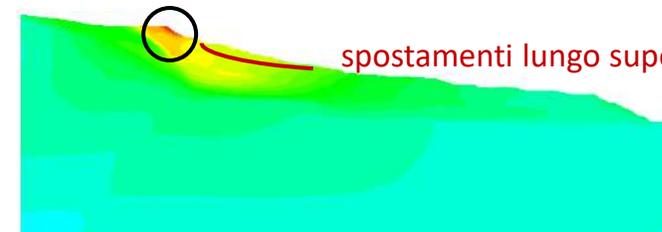


la superficie di rottura «non si chiude»  
deformazioni max ~ 1%

*Nazeri et al. 2021*



spostamento max ~20 cm



spostamenti lungo superficie critica ~ 10 cm

# Contenuti

---

- Ischia come laboratorio multi-hazard sull'instabilità di versante
- Fattori d'influenza: predisponenti, preparatori, d'innescio
- Effetti del grado di saturazione delle coltri sull'instabilità statica e sismica
- Analisi multi-scalare dell'instabilità in condizioni sismiche
- **Conclusioni**

## Conclusioni (per ora...)

- Ischia è un caso paradigmatico di area vulcanica affetta da **interazione tra hazard idro-meteorico e sismico**
- Il sottosuolo ha una **morfologia e litologia** molto articolata: i meccanismi di instabilità indotti da eventi idro-meteorici e sismici possono essere localmente molto variabili ma si ripetono in maniera sistematica...
- I dati geotecnici disponibili sul territorio per le formazioni dominanti (un '*database* consortile' in embrione) hanno permesso di poter derivare mappe indicative di **stabilità e spostamenti in condizioni sismiche** tenendo conto dell'effetto del **grado di saturazione** (suzione di matrice) sulla resistenza delle coltri instabili
- Le analisi preliminari in **condizioni 'wet' e 'dry'** (in attesa di dati dal monitoraggio di lungo periodo) hanno mostrato che uno stesso evento sismico potrebbe determinare effetti significativamente diversi in funzione della variabilità dei fattori preparatori legati alla **stagionalità del regime di suzione**
- Nel sito di studio di Fango le **analisi dinamiche** (basate su azioni sismiche stimate con approccio deterministico) forniscono previsioni di spostamenti confrontabili a parità di ampiezza dell'azione sismica
- I risultati sono fortemente influenzati dal **meccanismo di sorgente**, ma anche nel caso più pessimistico il contenuto energetico complessivo del segnale non è tale da produrre spostamenti preoccupanti (dell'ordine dei 10-20 cm)

# Buona lettura!

Mancini M., Caciolli M.C., Gaudiosi I., Alleanza G.A., Cavuoto G., Coltella M., Cosentino G., Di Fiore V., d'Onofrio A., Gargiulo F., Milana G., Pietrosante A., Pompa P.P., Silvestri F., Vassallo M. (2021). *Seismic microzonation in a complex volcano-tectonic setting: the case of northern and western Ischia Island (southern Italy)*. Italian Journal of Geosciences, 140(3), pp. 382-408, [doi.org/10.3301/IJG.2021.10](https://doi.org/10.3301/IJG.2021.10)

Gargiulo F., d'Onofrio A., Silvestri F. (2021). *Approccio multi-livello per le verifiche a liquefazione: un'applicazione all'isola di Ischia*. Incontro Annuale dei Ricercatori di Ingegneria Geotecnica (online). Ed. Associazione Geotecnica Italiana, ISBN: 9788897517153.

Gargiulo F., Forte G., d'Onofrio A., Santo A., Silvestri F. (2022). *Seismic performance of slopes at territorial scale: the case of Ischia Island*. In: Wang, L., Zhang, JM., Wang, R. (eds) Proceedings of the 4th International Conference on Performance Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering (Beijing 2022). PBD-IV 2022. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, vol 52, pp 1324–1331. Springer, Cham. [doi.org/10.1007/978-3-031-11898-2\\_113](https://doi.org/10.1007/978-3-031-11898-2_113)

Alleanza G.A., d'Onofrio A., Gargiulo F., Silvestri F., Mancini M., Gaudiosi I., Caciolli M., Cavuoto G., Di Fiore V., Milana G., Vassallo M. (2022). *Valutazione della risposta sismica locale di alcune aree dell'Isola di Ischia per la pianificazione di interventi di mitigazione del Rischio Sismico*. XXVII Convegno nazionale di Geotecnica, 'La geotecnica per lo sviluppo sostenibile del territorio e per la tutela dell'ambiente'.

Gargiulo F., Ceres R., Mele L., Forte G., d'Onofrio A., Silvestri F. (2022). *Verifiche a liquefazione mediante l'utilizzo di segnali simulati*. Incontro Annuale dei Ricercatori di Ingegneria Geotecnica - IARG 2022, Caserta. Ed. Associazione Geotecnica Italiana, ISBN:9788897517108.

Gargiulo F. (2023). *Multi-level analysis of seismic ground instability in the volcanic island of Ischia (Italy)*. Tesi di Dottorato in Ingegneria Strutturale, Geotecnica e Rischio Sismico, XXXV ciclo, Università di Napoli Federico II

De Falco M., Forte G., Marino E., Massaro L., Santo A. (2023). *UAV and field survey observations on the November 26th 2022 Celario flowslide, Ischia Island (Southern Italy)*. Journal of Maps, 19:1, 2261484, [doi.org/10.1080/17445647.2023.2261484](https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2261484)

Ceres R., d'Onofrio A., Gargiulo F., Silvestri F. (2024). *Inter-disciplinary and multi-level study of seismic liquefaction susceptibility in the coastal area of Casamicciola Terme (Ischia Island, Italy)*. Proc. of the VIII International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Osaka

d'Onofrio A., Ceres R., Gargiulo F. (2024). *A multi-hazard perspective in the analysis of earthquake-induced landslides: the case of Ischia Island*. Rivista Italiana di Geotecnica 3:14-37, [doi.org/10.19199/2024.3.0557-1405.014](https://doi.org/10.19199/2024.3.0557-1405.014)

Coppola L., De Falco M., Forte G., Pagano L., Di Martire D., Calcaterra D., De Vita P., Tufano R., Guerriero L., Silvestri F. (2024). *Field monitoring of volcanic soil covers addressed to non-structural mitigation strategies: some observations on Celario slope at Casamicciola (Ischia)*. Workshop RETURN - Bologna, 27-28-29 November 2024