



*Mitigazione dei rischi naturali per la sicurezza e la mobilità
nelle aree montane del Mezzogiorno*

Politecnico di Bari

ANALISI E CARATTERIZZAZIONE DEL MECCANISMO DI FRANA PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO

Federica Cotecchia

Vito Tagarelli, Marianna Stragapede

22-23 Giugno 2023



UNIONE EUROPEA
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Estratto da: Secondo convegno annuale del progetto MITIGO - 22-23 Giugno 2023 - Sommari degli interventi e presentazioni

© 2023 Università degli Studi della Basilicata

Editrice Universosud – Potenza

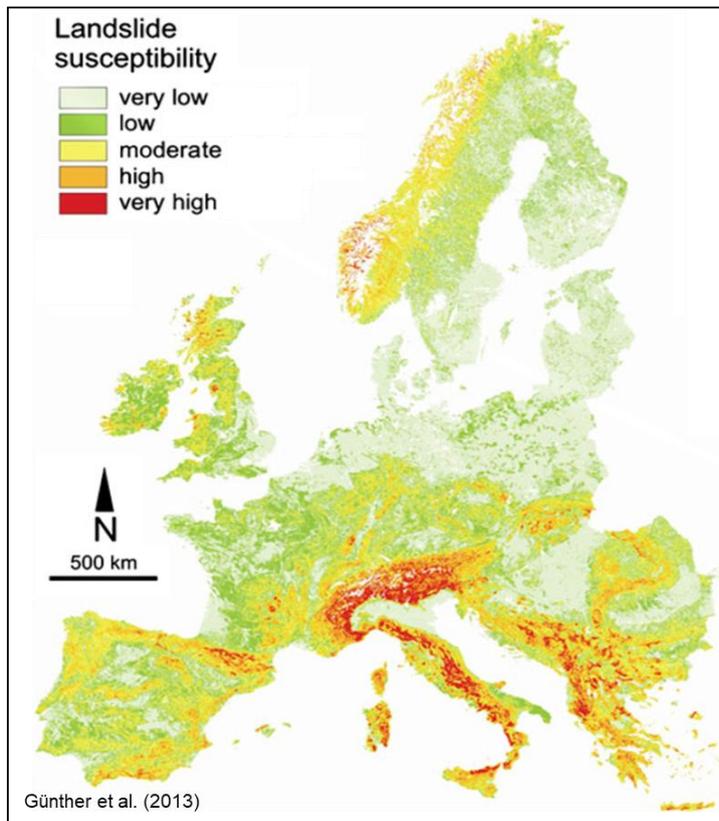
ISBN 9791281551008



Pubblicazione realizzata con il cofinanziamento dell'Unione Europea – FESR, PON Ricerca e Innovazione 2014-2020.

www.ponricerca.gov.it

L'Italia è uno dei paesi avanzati con la più alta suscettibilità da frana



Linee Guida AGI-ISPRA

PROGETTAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO DA FRANA

Capitolo 4

**ANALISI E CARATTERIZZAZIONE
IN FASE DI PROGETTO**



*Mitigazione dei rischi naturali per la sicurezza e la mobilità
nelle aree montane del Mezzogiorno*

Politecnico di Bari

ANALISI E CARATTERIZZAZIONE DEL MECCANISMO DI FRANA PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO

Federica Cotecchia

Vito Tagarelli, Marianna Stragapede

22-23 Giugno 2023

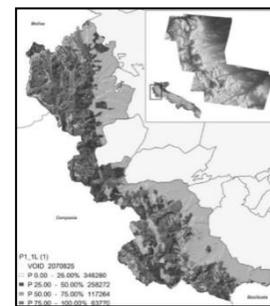
**INDAGINI
E
ANALISI**
Cap. 4 LG AGI-ISPRA

DIAGNOSI

PRIORITÀ
DI INTERVENTO → PROGRAMMAZION
E

AREA VASTA
SCALA MEDIA O REGIONALE

PENDIO
SCALA DI SITO



Ceppi et al., 2013

**FATTORE
SICUREZZA, F**
CAMPO DI
SPOSTAMENTI

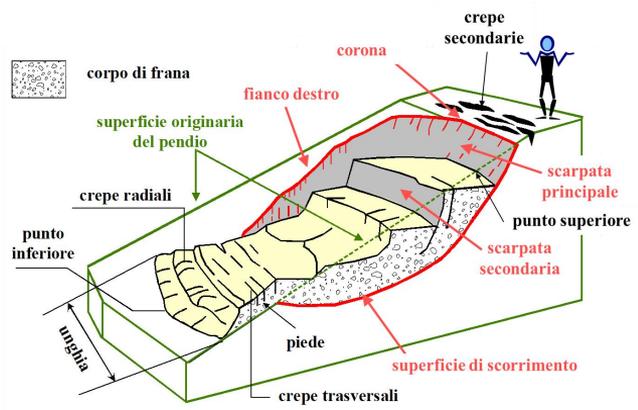
**STRATEGIA DI
MITIGAZIONE
(SE F=1)**

**SUSCETTIBILITÀ DA
FRANA**

Probabilità d'occorrenza spaziale di un evento franoso, dato un insieme di condizioni territoriali e ambientali

**PERICOLOSITÀ DA
FRANA (H)**

Probabilità di accadimento in un determinato lasso di tempo, ed in un determinato luogo di un evento franoso di una determinata intensità



Material	ROCK	DEBRIS	EARTH
FALLS	Rock fall	Debris fall Scree Debris cone	Earth fall Colluvium Debris cone
TOPPLES	Rock topple	Debris topple Debris cone	Earth topple Debris cone
SLIDES	Rotational Single rotational slide (slump) Failure surface	Rotational Crown Scarp, Head Scarp, Multiple rotational slide Minor Scarp	Rotational Successive rotational slides
	Translational (Planar) Rock slide	Translational (Planar) Debris slide	Translational (Planar) Earth slide
SPREADS	Normal sub-horizontal structure, Cap rock, Gully, Camber slope, Dip and fault structure, Valley bulge structure (formed off by erosion), Thinning of beds, Plane of décollement, Competent substratum		Earth spread
FLOWS	Solifluction flows (Periglacial debris flows)	Debris flow	Earth flow (mud flow)
COMPLEX	e.g. Slump-earthflow with rockfall debris		e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe

Cruden & Varnes, 1996

- Quale è/ potrà essere il **cinematismo di frana**?
- Quali sono **le cause**?
- Quale è **l'evoluzione nel tempo**?

Quale è il **MECCANISMO DI FRANA**?

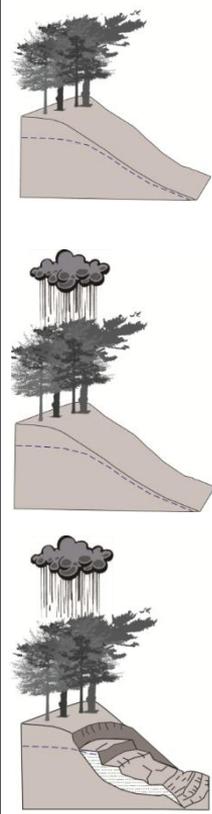
SUSCETTIBILITÀ DA FRANA

Probabilità d'occorrenza spaziale di un evento franoso, dato un insieme di condizioni territoriali e ambientali

PERICOLOSITÀ DA FRANA (H)

Probabilità di accadimento in un determinato lasso di tempo, ed in un determinato luogo di un evento franoso di una determinata intensità

- 1) IL MECCANISMO DI FRANA; EQUAZIONI CHE GOVERNANO IL CAMPO DEGLI SPOSTAMENTI DI UN PENDIO
- 2) DIAGNOSI A SCALA DI SITO: DALLA MODELLAZIONE CONCETTUALE ALLA MODELLAZIONE NUMERICA
- 3) ATTIVITÀ CLIMA-INDOTTA DI FRANE LENTE E STRATEGIE DI MITIGAZIONE



Condizione di stabilità



Meccanismo di frana



FATTORI INTERNI

- Assetto geologico: *litostratigrafia, morfologia, strutture tettoniche*
- Comportamento meccanico:
 - *Proprietà dei terreni*
 - *legge costitutiva, parametri*

Elasto-plasticità

$$\sigma'_{ij} \leftrightarrow \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p$$



- Comportamento idraulico:
 - *funzione di conducibilità idraulica*
 - *curva di ritenzione*

FATTORI ESTERNI

- Agenti climatici: *pioggia, temperature, radiazioni, umidità relativa, nuvolosità, vento*
- Agenti antropici: *carico, scarico, variazioni delle condizioni idrauliche al contorno*
- Azioni sismiche: *cicli di carico/scarico ad alte frequenze*
- Naturale evoluzione geomorfologica: *carico, scarico, weathering*



(Terzaghi, 1950; *Tabella 4.1, Linee guida AGI-ISPRA*)

Totalmente saturo

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - u_w \delta_{ij}$$



Parzialmente saturo

$$\sigma'_{ij} = (\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij}) + \chi(u_a - u_w) \delta_{ij}$$



EQUILIBRIO e CONGRUENZA

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \gamma \delta_{ij} = 0 \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_h \partial x_k} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{hk}}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial^2 \varepsilon_{ih}}{\partial x_k \partial x_j} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{kj}}{\partial x_i \partial x_h}$$

FILTRAZIONE TRANSITORIA - BILANCIO DI MASSA LIQUIDA

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho_w k_i \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_w \frac{e S_r}{1 + e} \right)$$



FATTORI INTERNI

- Assetto geologico:
litostratigrafia, morfologia, strutture tettoniche

- Comportamento meccanico:
- *Proprietà dei terreni*
- *legge costitutiva, parametri*

$$\sigma'_{ij} \leftrightarrow \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p$$

- Proprietà idrauliche:
funzione di conducibilità idraulica
- *curva di ritenzione*



FATTORI ESTERNI

- Agenti climatici:
pioggia, temperature, radiazioni, umidità relativa, nuvolosità, vento



- Agenti antropici:
carico, scarico variazioni delle condizioni idrauliche al contorno

- Azioni sismiche:
cicli di carico/scarico ad alte frequenze

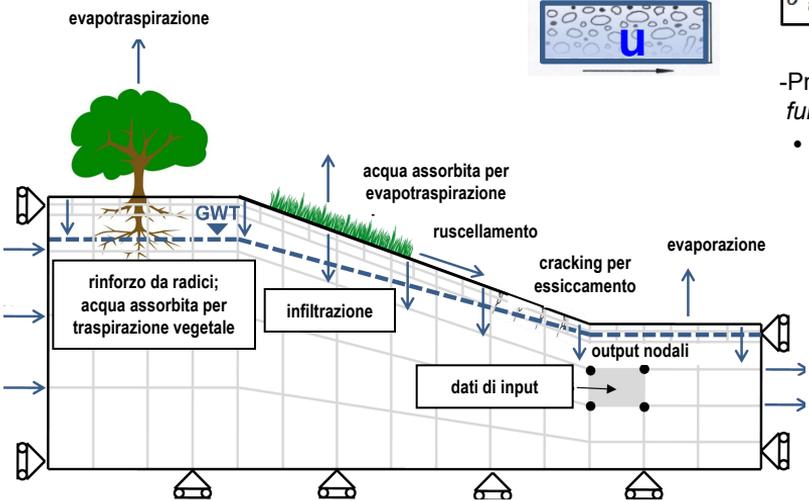


- Naturale evoluzione geomorfologica:
carico, scarico, weathering

(Terzaghi, 1950; *Tabella 4.1, Linee guida AGI-ISPRA*)

Condizioni al contorno (laterale) idrauliche e meccaniche

Condizioni al contorno (laterale) idrauliche e meccaniche

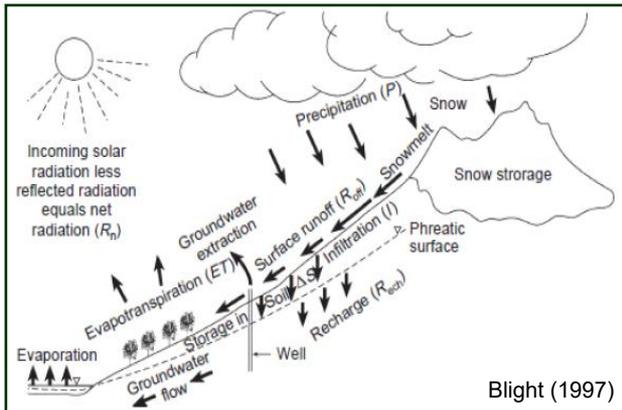


EQUILIBRIO e CONGRUENZA

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \gamma \delta_{jz} = 0 \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_h \partial x_k} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{hk}}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial^2 \varepsilon_{ih}}{\partial x_k \partial x_j} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{kj}}{\partial x_i \partial x_h}$$

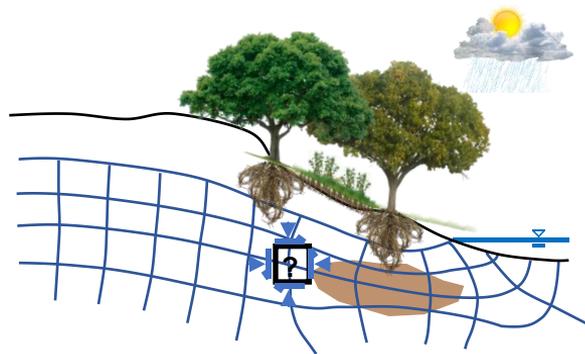
FILTRAZIONE TRANSITORIA - BILANCIO DI MASSA LIQUIDA

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho_w k_i \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_w \frac{e S_r}{1 + e} \right)$$



Gli effetti dell'interazione suolo-vegetazione-atmosfera: INTERAZIONE PENDIO-VEGETAZIONE-ATMOSFERA

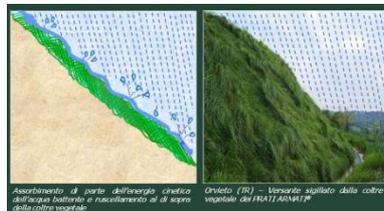
INFILTRAZIONE =
Pioggia –
(Intercettazione fogliare +
Evapotraspirazione + Ruscellamento)



Tagarelli & Cotecchia (2022) - RIG



Rinforzo dovuto all'apparato radicale



Assorbimento di parte dell'energia cinetica dell'acqua battente e ruscellamento al di sopra della coltre vegetale.

Impatto del ruscellamento



Intercettazione fogliare



Attenuazione delle crepe da essiccamento

**MODELLO
CONCETTUALE**

**MODELLO
QUANTITATIVO**

A) Interpretazione fenomenologica

(Terzaghi, 1950)

FATTORI INTERNI

- Assetto geologico: *litologia, morfologia, strutture tettoniche, condizioni al contorno*
- Comportamento meccanico: *composizione, parametri di resistenza, legge costitutiva*
- Proprietà idrauliche: *permeabilità, curva di ritenzione*

FATTORI ESTERNI

- Clima: *pioggia, temperatura, irraggiamento, umidità relativa, vento*
- Attività antropiche: *carichi, scarichi, cambiamenti delle condizioni idrauliche al contorno*
- Sisma: *carichi e scarichi ciclici ad alta frequenza*
- Evoluzioni morfologiche: *carichi, scarichi, weathering*



B) Analisi col metodo dell'equilibrio limite

$$\text{Fattore di Stabilità} = \int_S \tau_f ds / \int_S \tau_m ds$$



C) Modellazione numerica

Equilibrio e Congruenza

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \gamma \delta_{jz} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{hk}}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial^2 \varepsilon_{ih}}{\partial x_k \partial x_j} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{kj}}{\partial x_i \partial x_h}$$

Filtrazione transitoria

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho_w k_i \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_w \frac{e S_r}{1 + e} \right)$$

1

Parziale saturazione



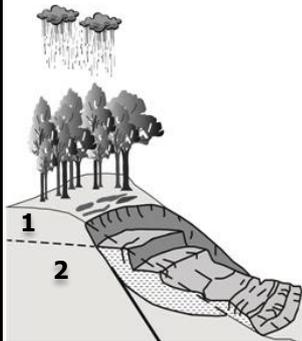
2

Totale saturazione



$$\sigma'_{ij} = (\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij}) + \chi(u_a - u_w) \delta_{ij}$$

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - u_w \delta_{ij}$$

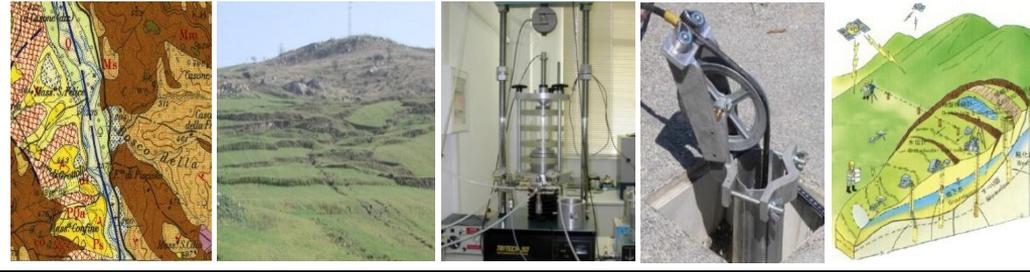


(Cotecchia et al. 2016)

A)

Fenomenologico

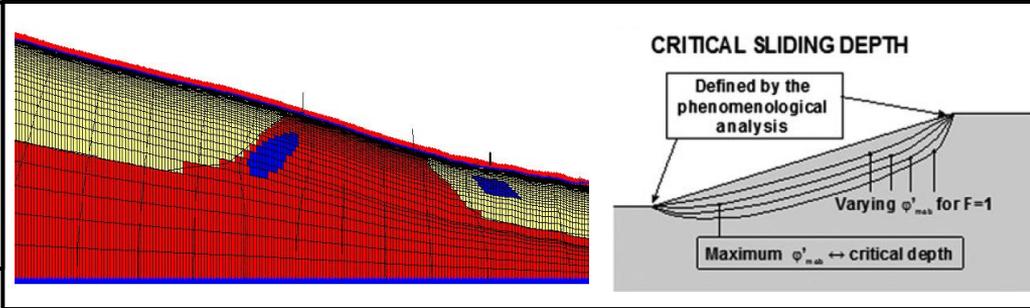
Analisi fenomenologica dello stato del pendio, livello di stabilità, pericolosità da frana



B)

Analitico semplificato

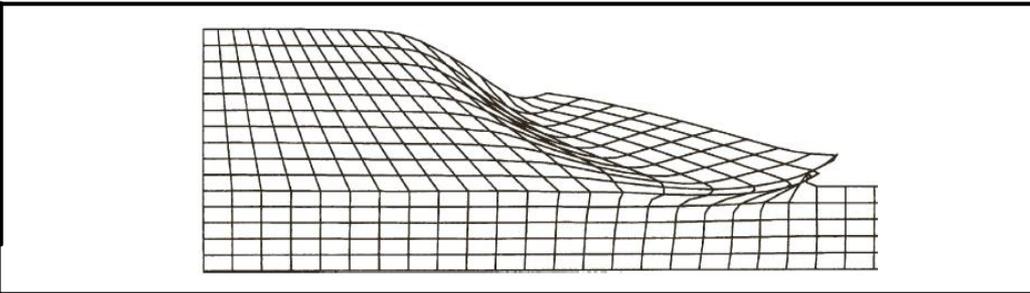
Analisi quantitative che considerano le sole condizioni di equilibrio del pendio (Equilibrio Limite)



C)

Modellazione numerica avanzata

Analisi quantitative per la modellazione dello stato tenso-deformativo del pendio



Avanzamento scientifico nelle indagini e nelle elaborazioni dati

Sistema di monitoraggio da remoto

satellite

drone

Stazione totale robotizzata

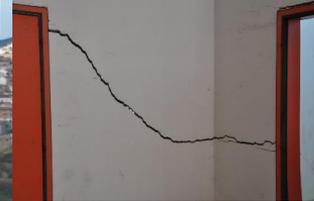
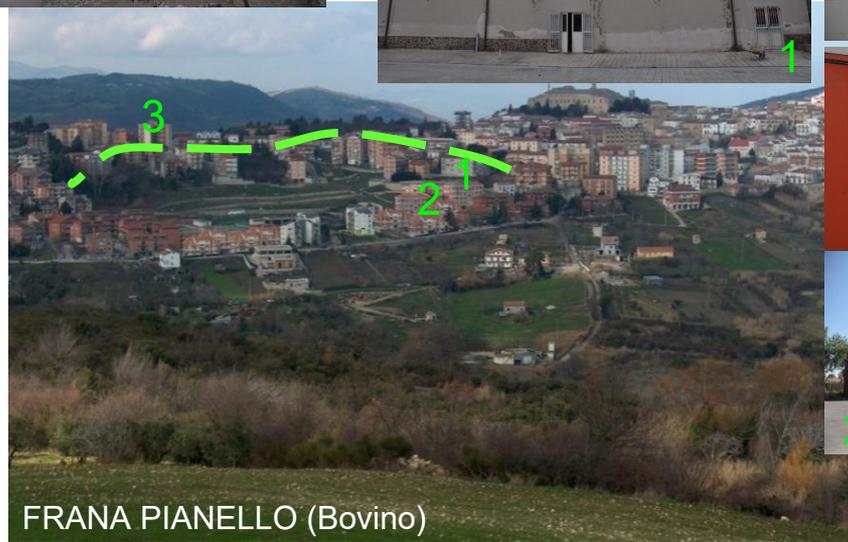
Laser

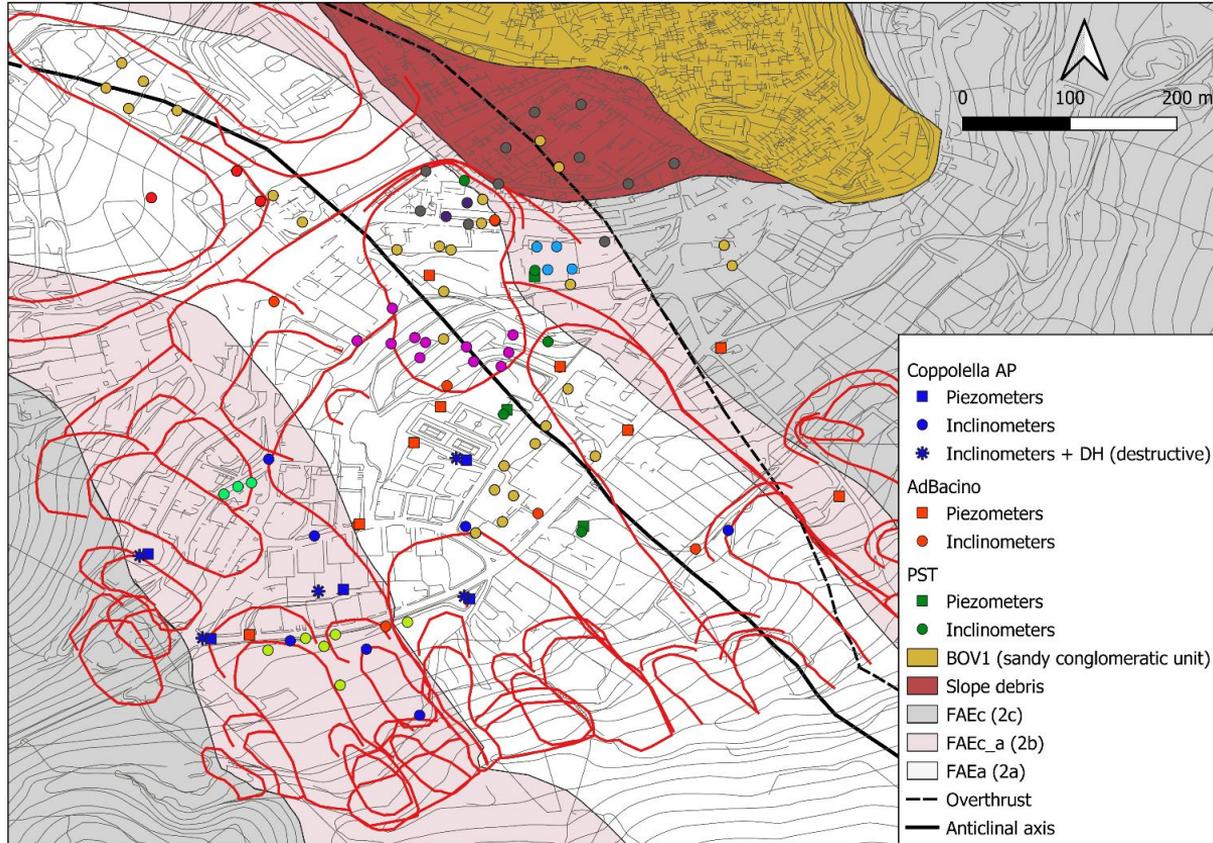
Inclinometro automatizzato

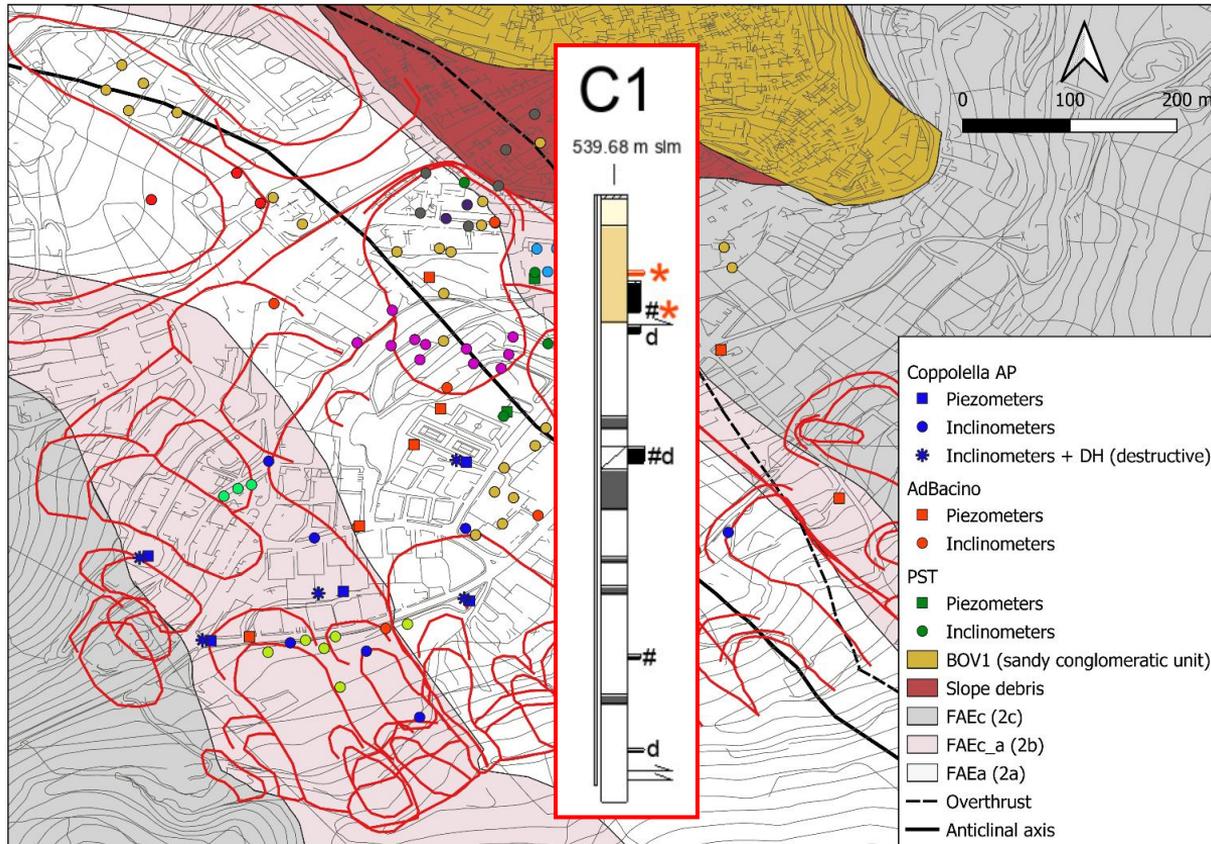
Inclinometri fissi

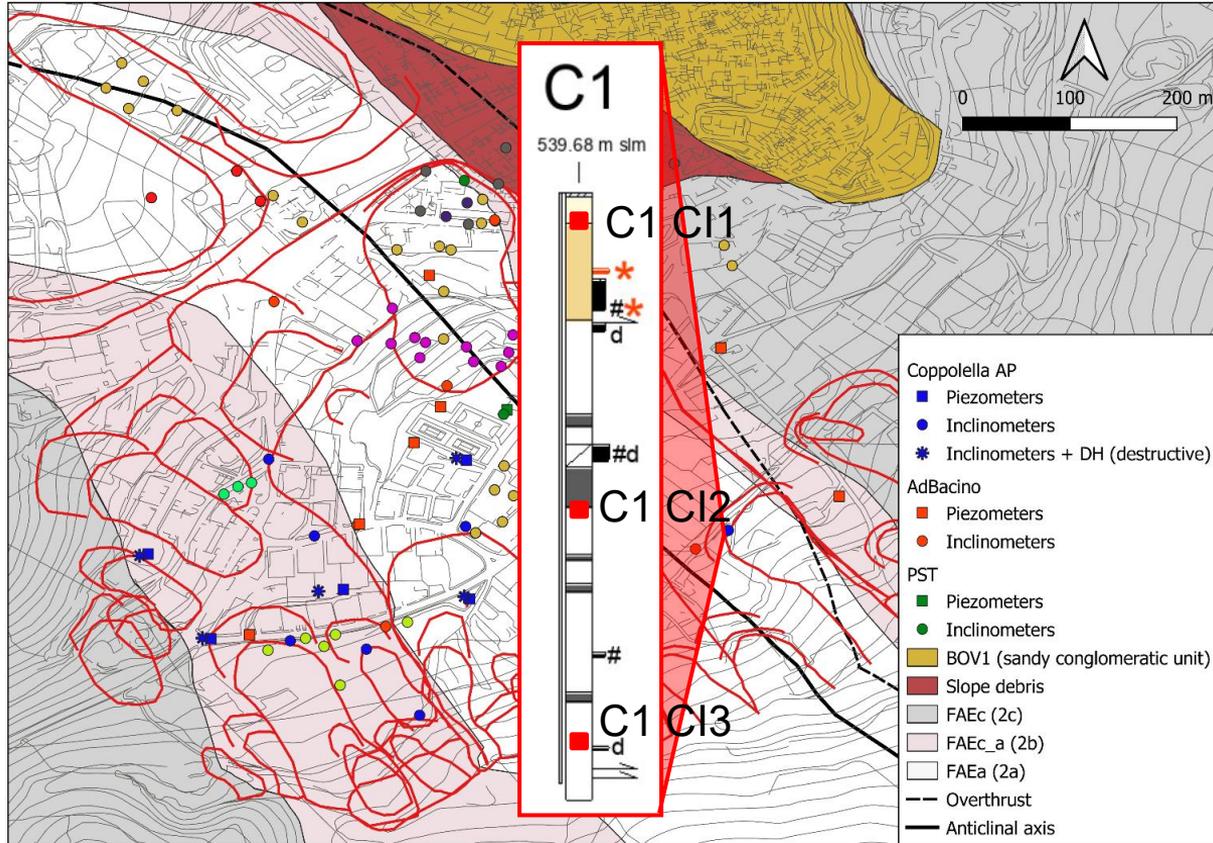
Sonda inclinometrica removibile

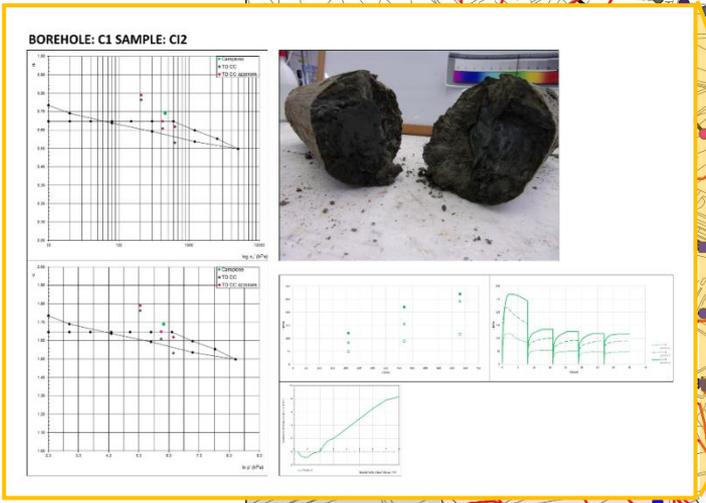
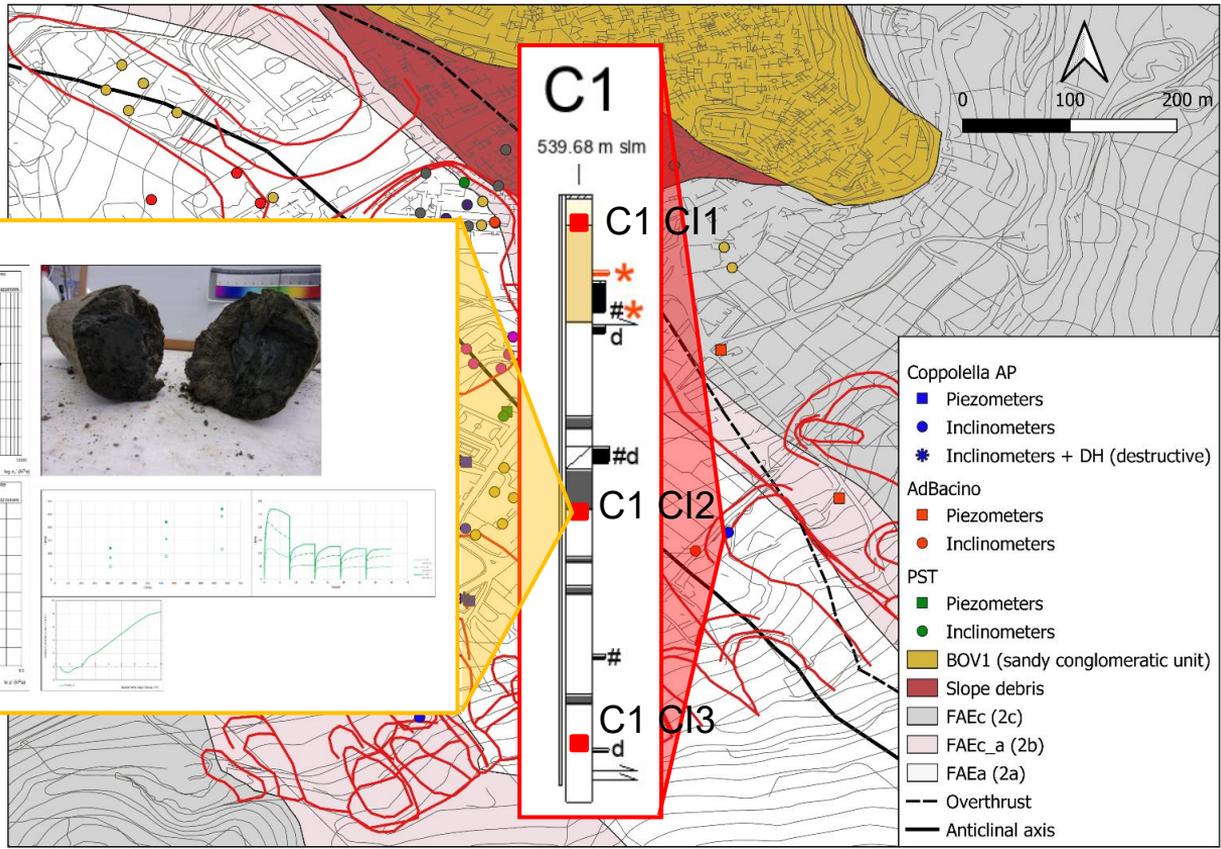
ERT 2012 GEOPLANTS - ARRAY DIPOLO- DIPOLO (0-60m)

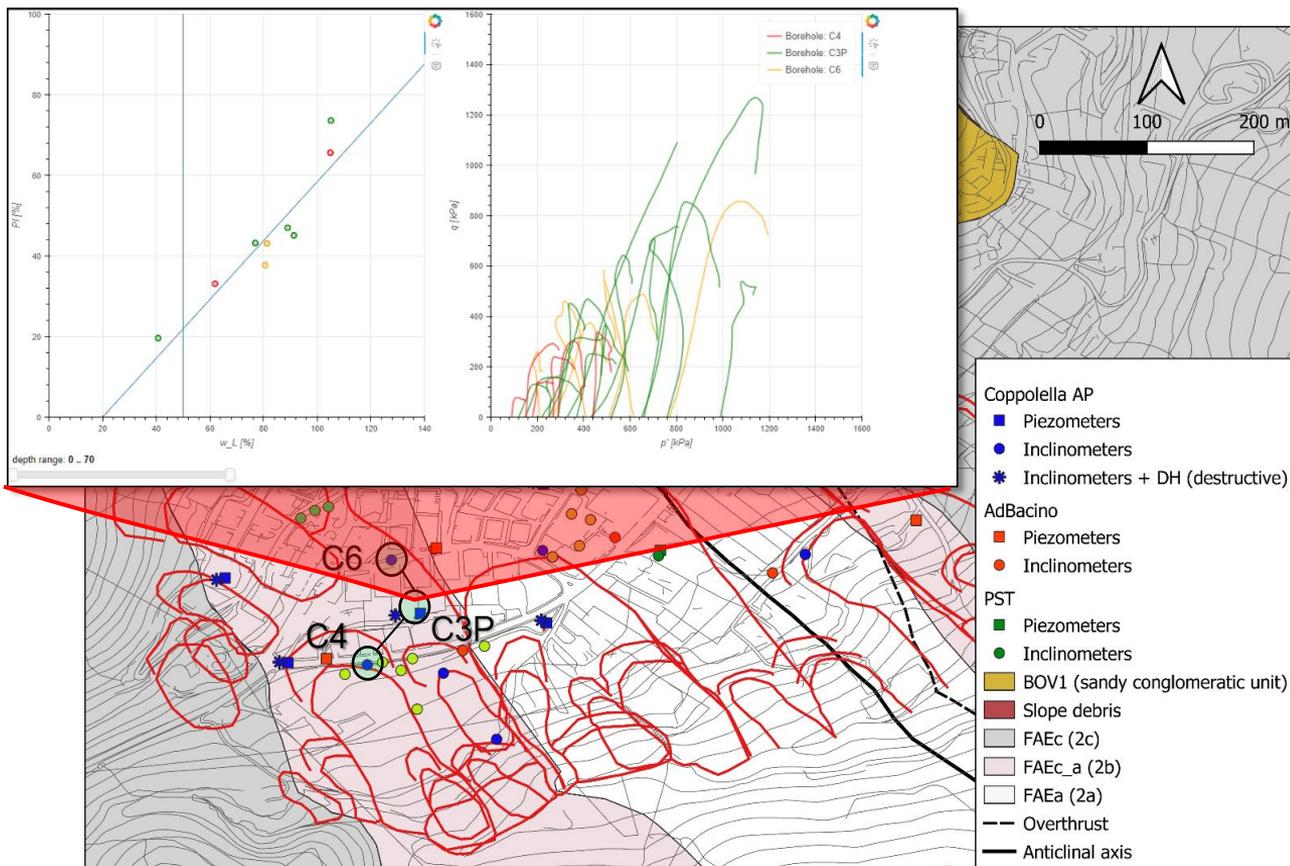


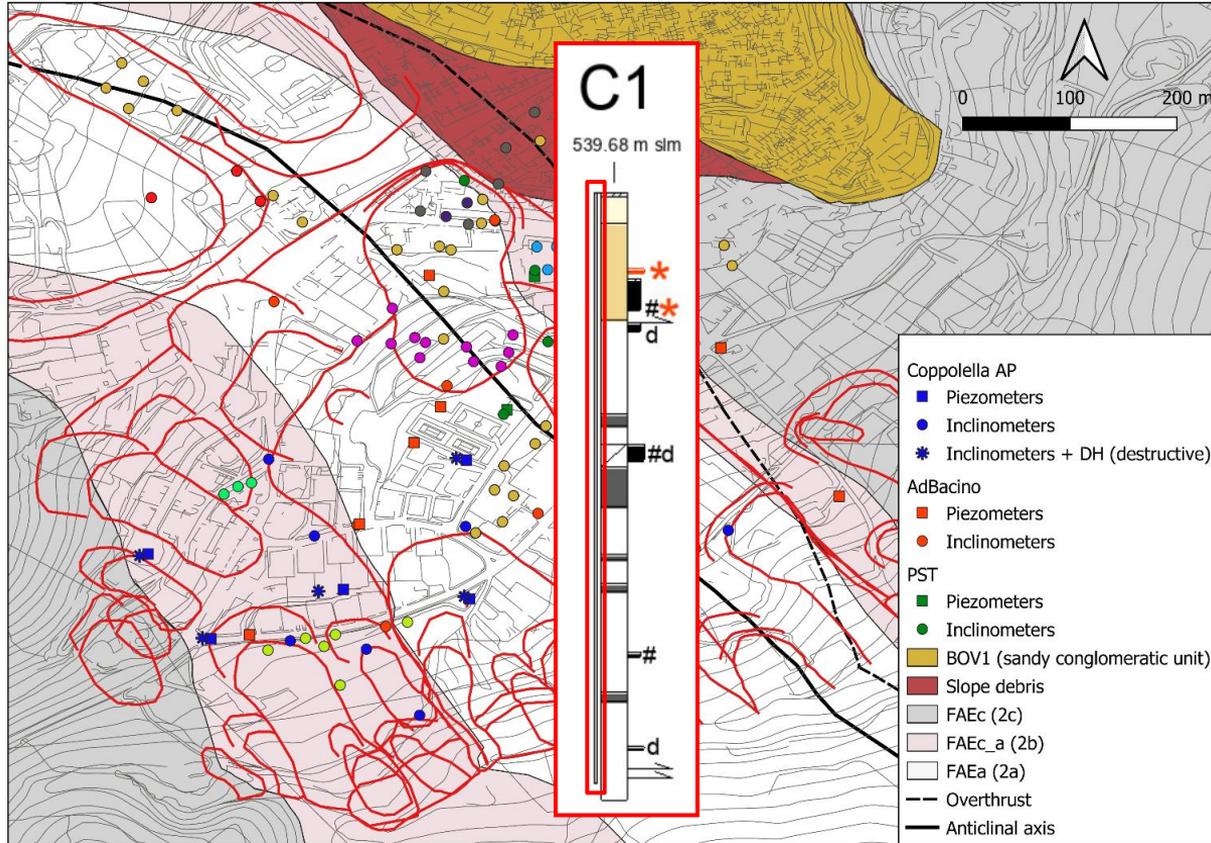


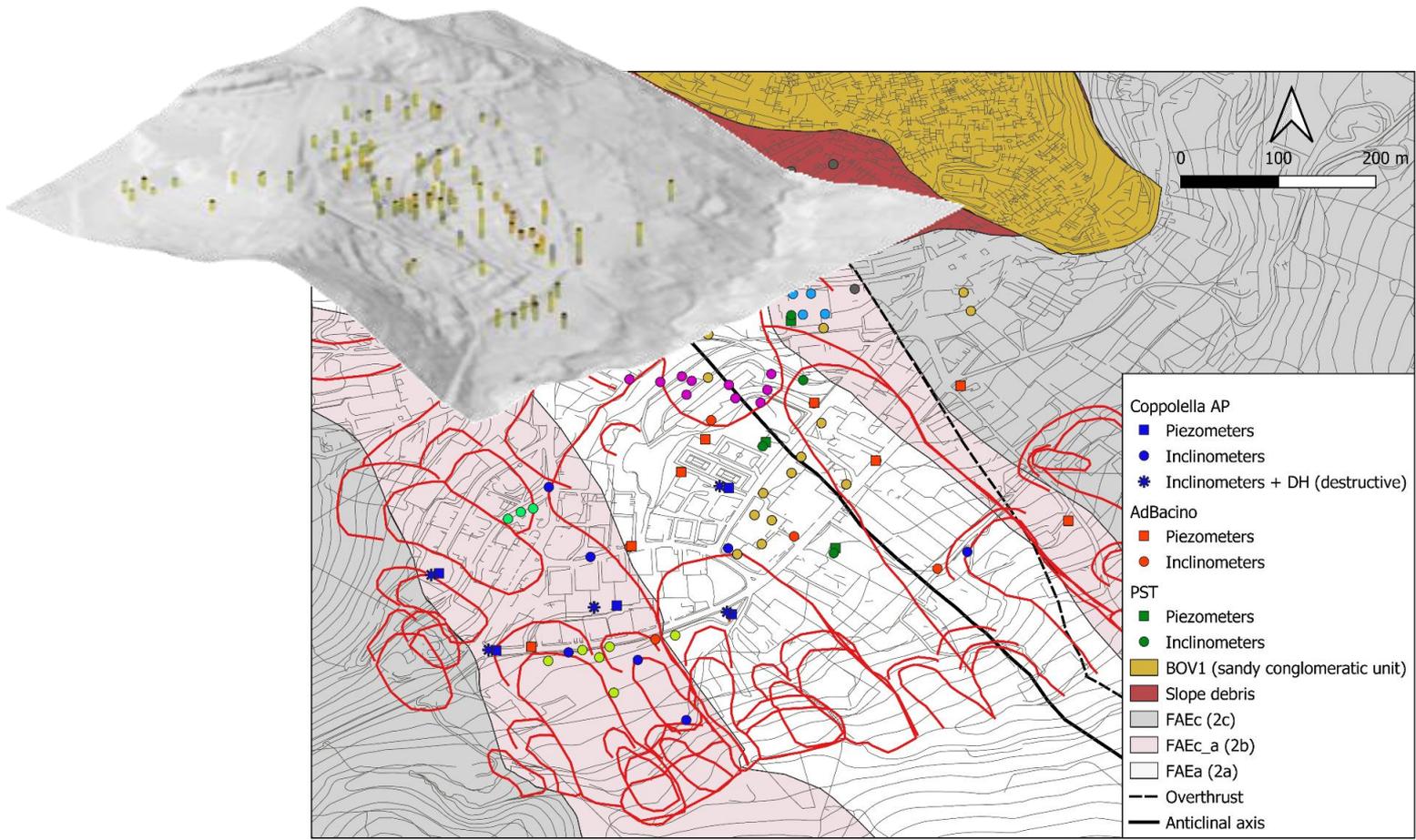




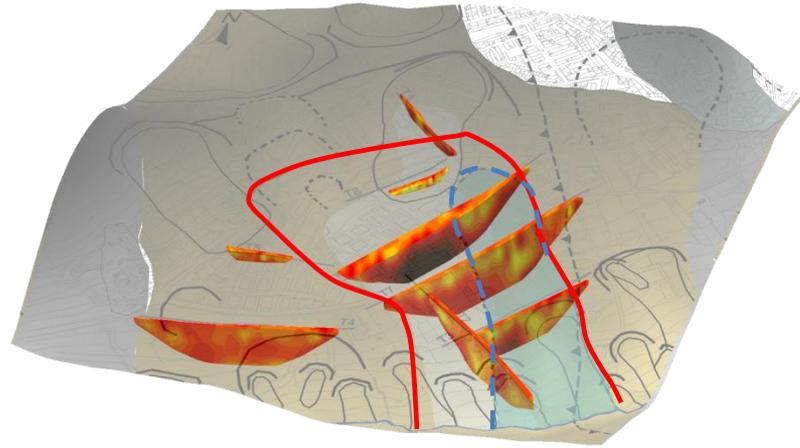
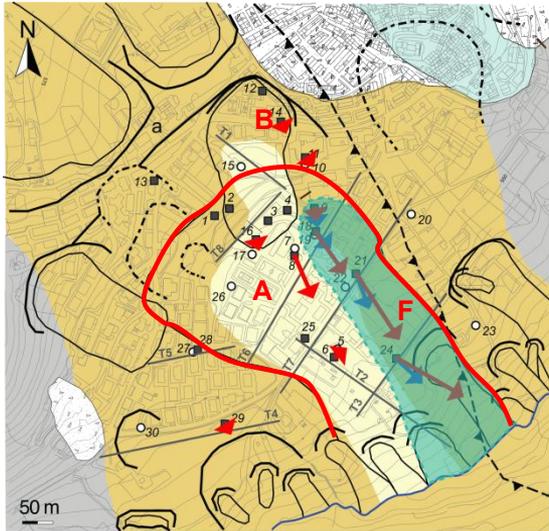


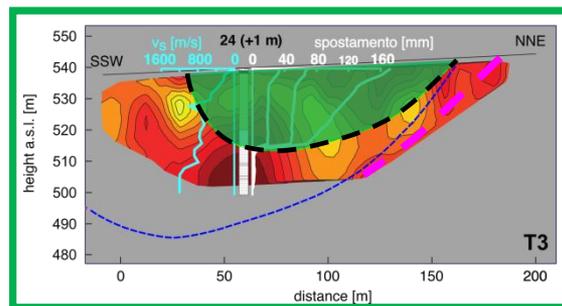
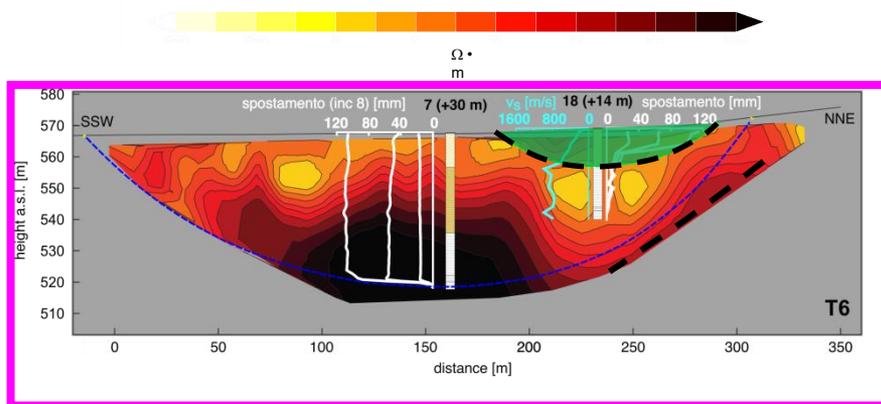
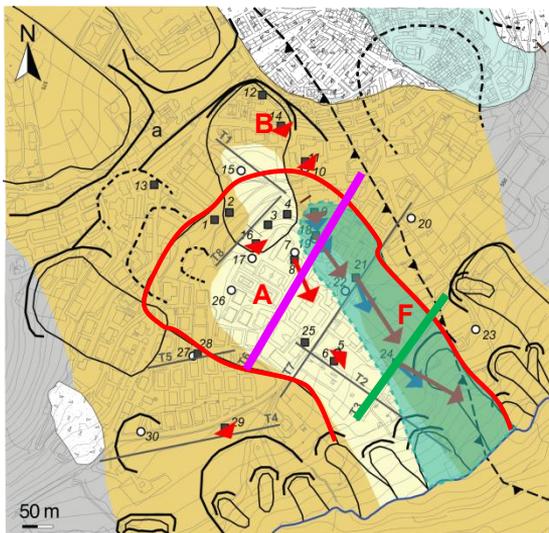


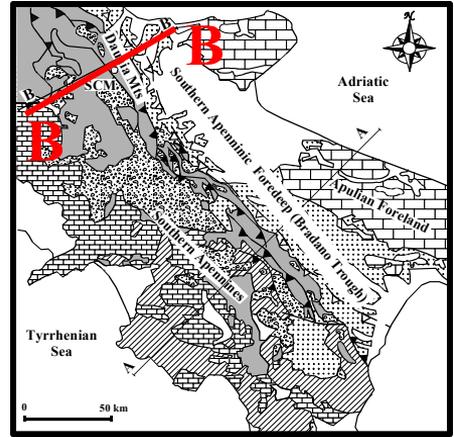




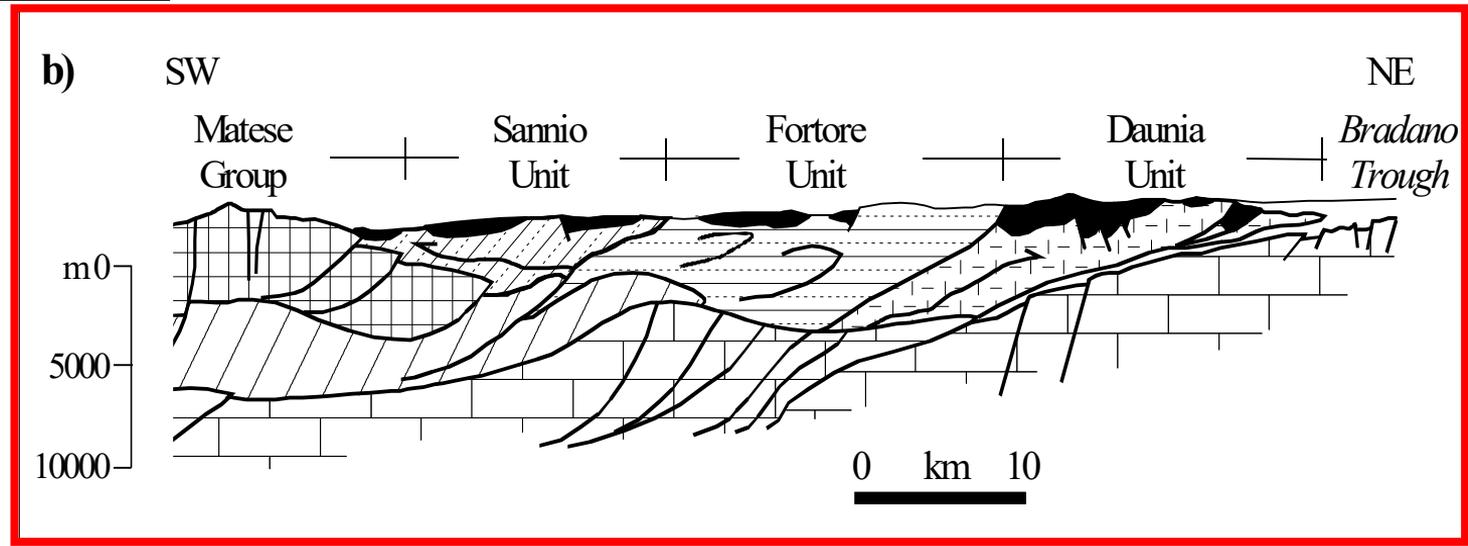
- Coppolella AP**
- Piezometers
 - Inclinometers
 - * Inclinometers + DH (destructive)
- AdBacino**
- Piezometers
 - Inclinometers
- PST**
- Piezometers
 - Inclinometers
- BOV1 (sandy conglomeratic unit)
- Slope debris
- FAEc (2c)
- FAEc_a (2b)
- FAEa (2a)
- Overthrust
- Anticlinal axis





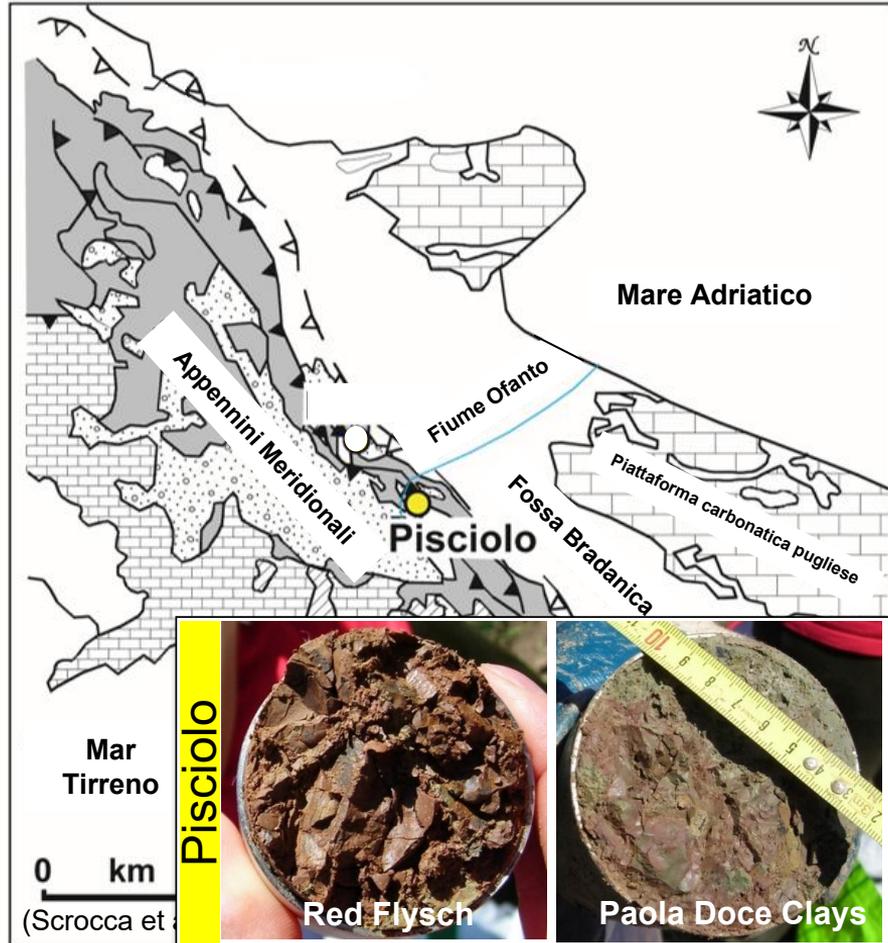


Sezione B

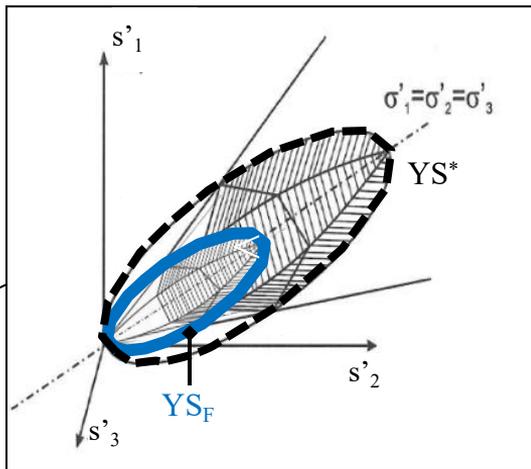
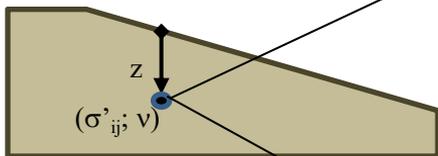


il principale **fattore di pendio predisponente** il processo di frana è la **debolezza della matrice argillosa dei flysch**

-  Depositi marini, vulcanici e continentali (Pliocene Medio-Olocene)
-  Depositi marini (Tardo Tortoniano-Tardo Pliocene)
-  Sedimenti terrigeni dell'Appennino Interno (Liguridi and Sicilide Units)
-  Piattaforma carbonatica appenninica
-  Sedimenti terrigeni dell'Appennino Esterno (Unità Lagonegresi-Molisane)
-  Piattaforma carbonatica pugliese



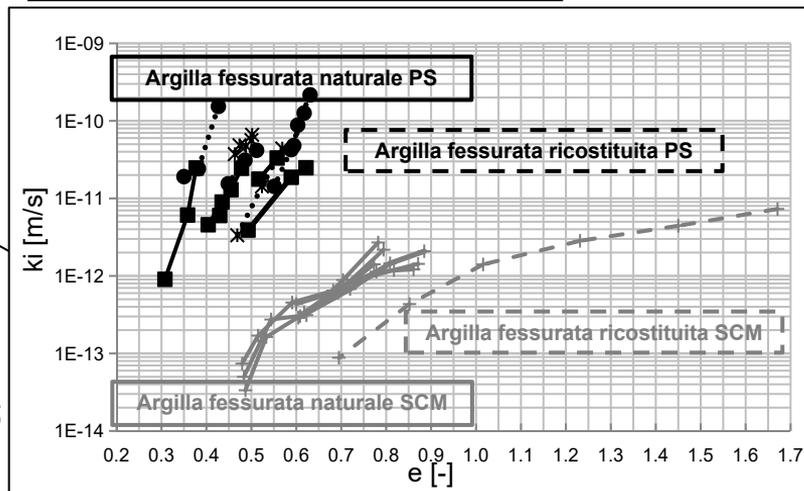
Comportamento Idro-Meccanico di Argille Fessurate

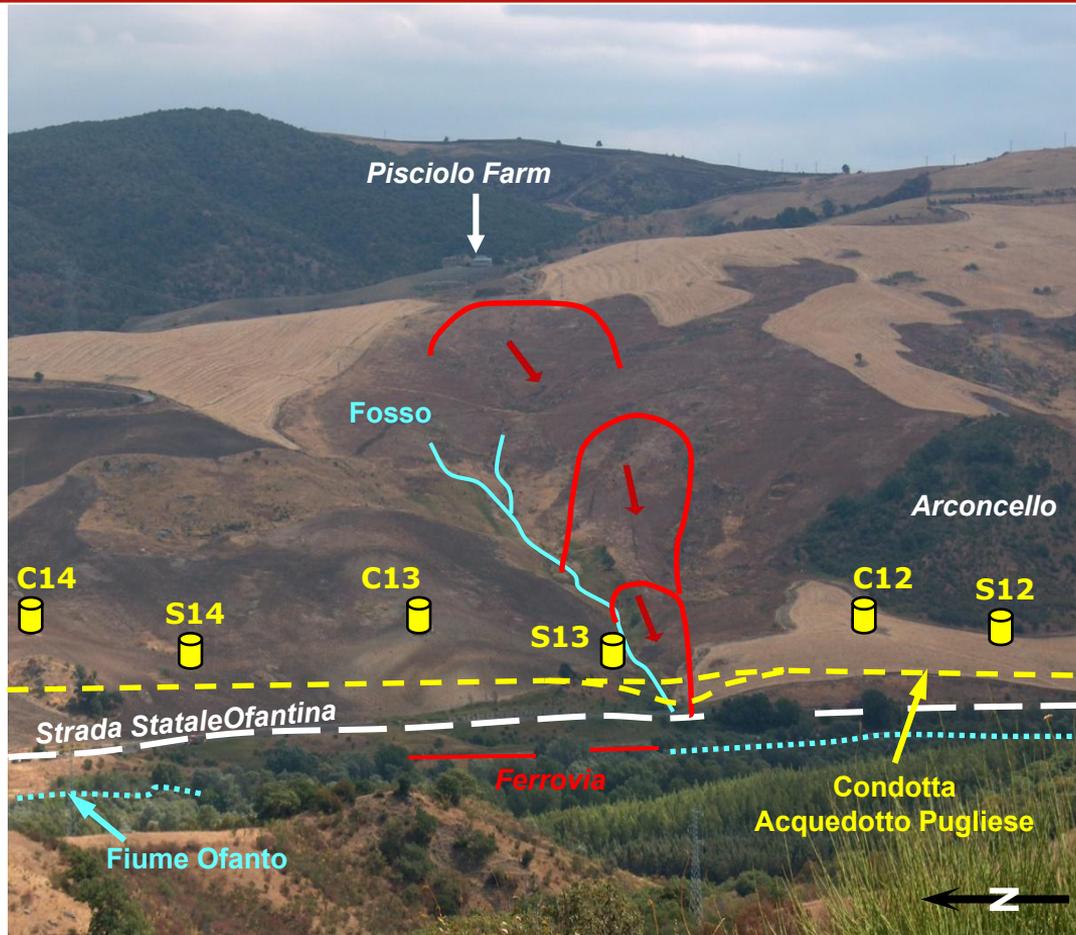


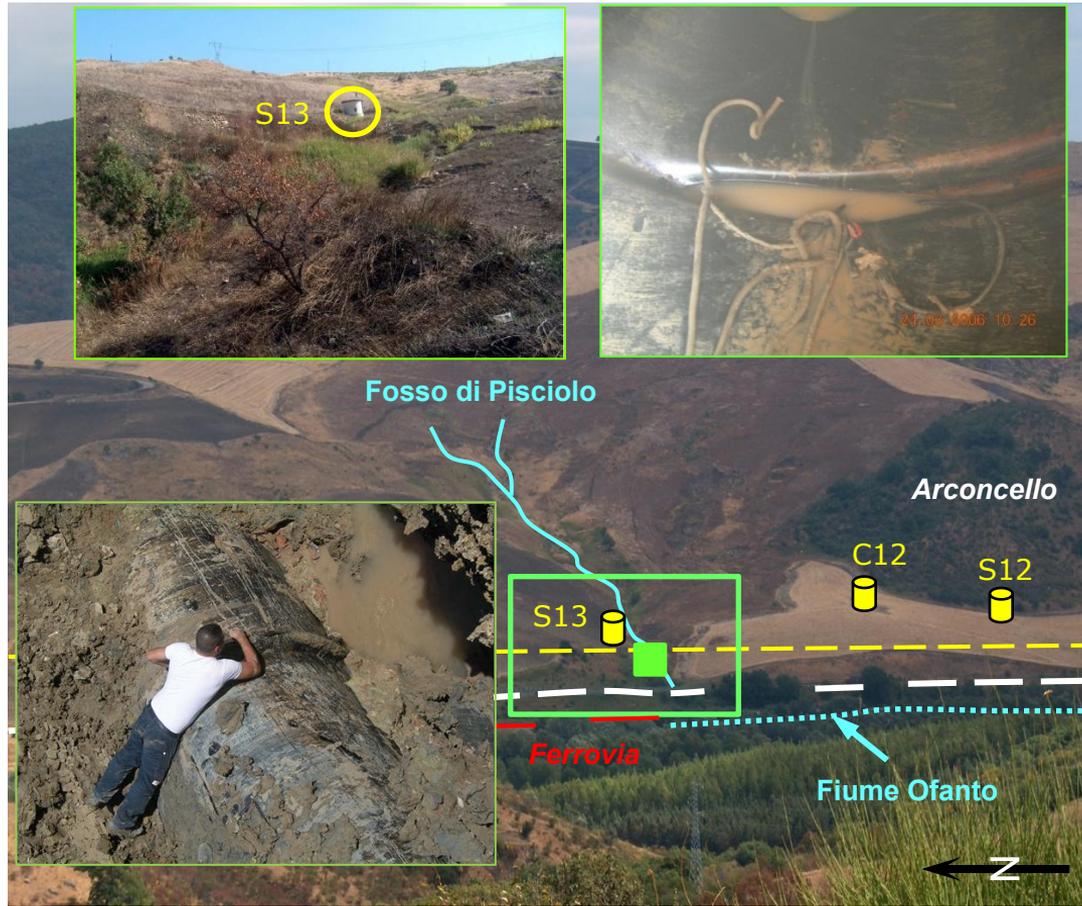
Vitone & Cotecchia,
Geotechnique, 2011

Cotecchia, Pedone, Bottiglieri,
Santaloia, Vitone, *Italian
Geotechnical Journal*, 2014

(Vitone, Guglielmi, Pedone, Cotecchia;
Geotechnique Letters, 2019)

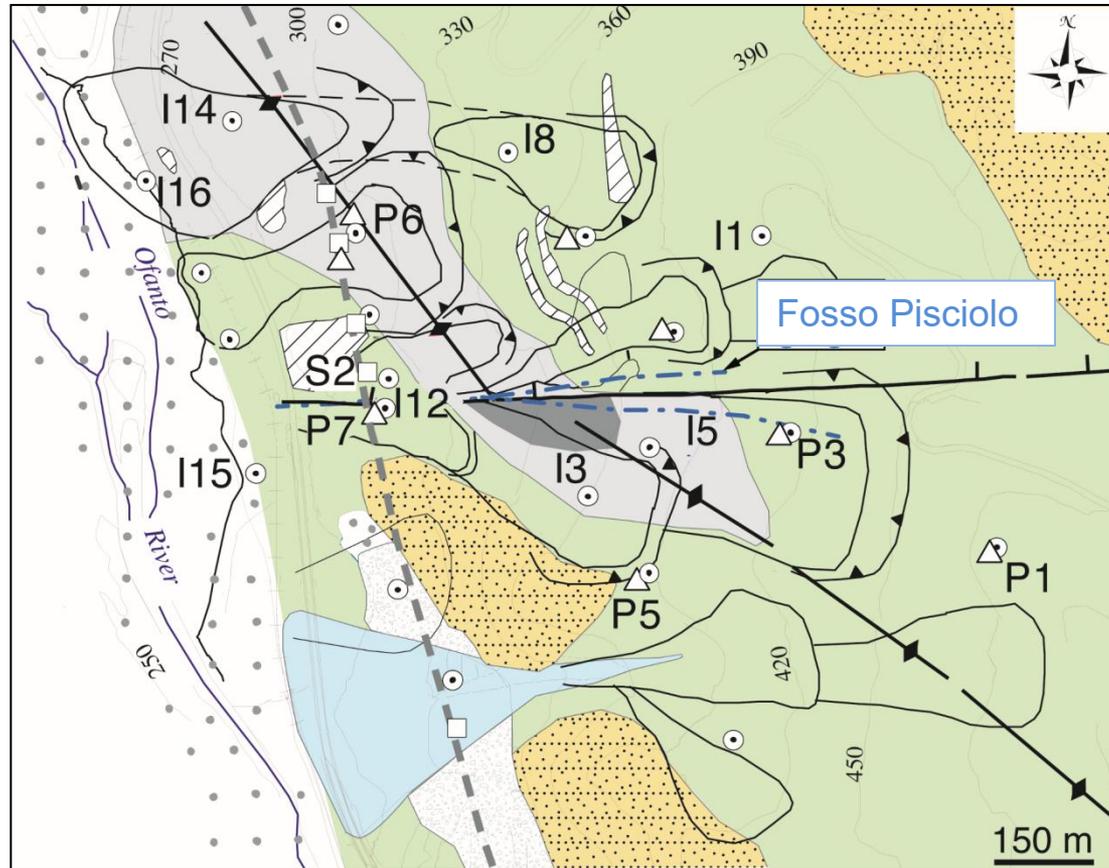


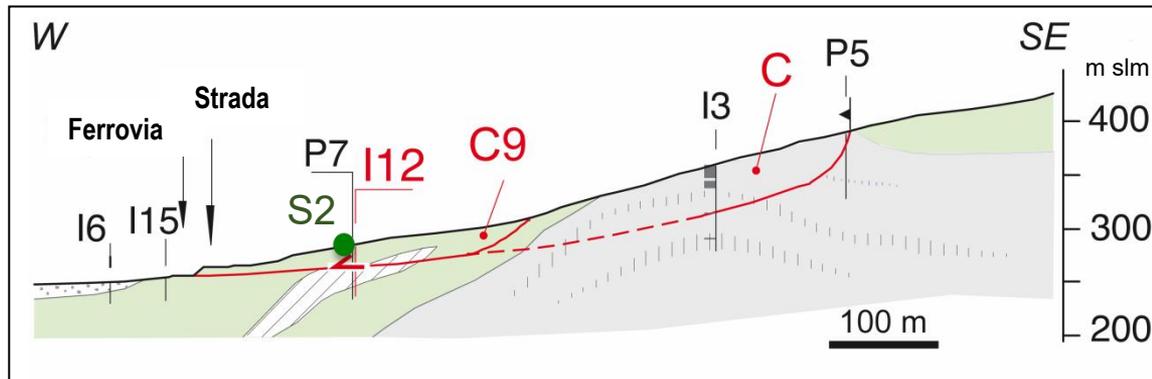
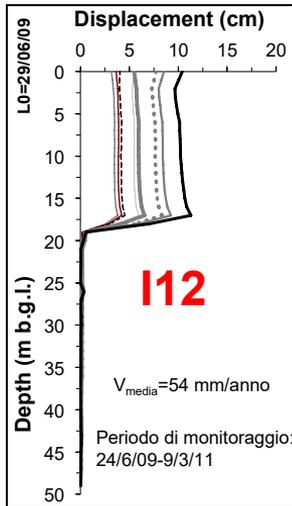
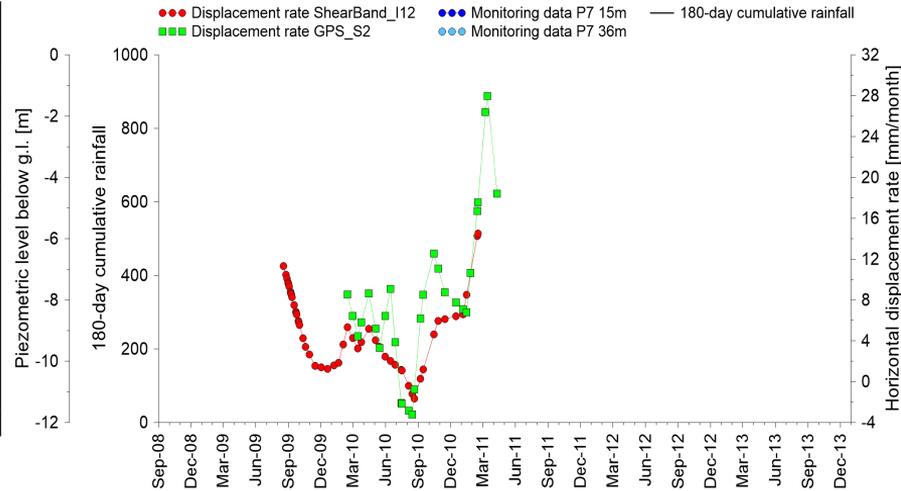
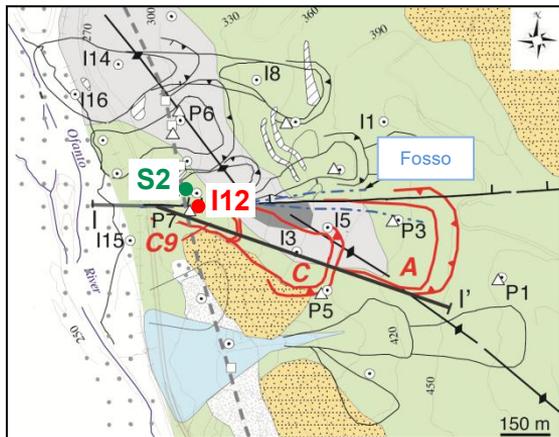


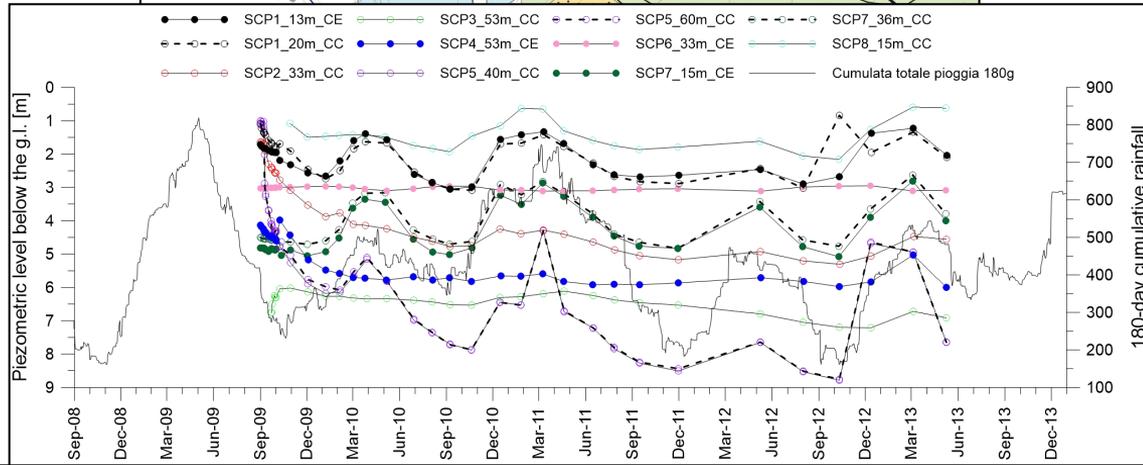
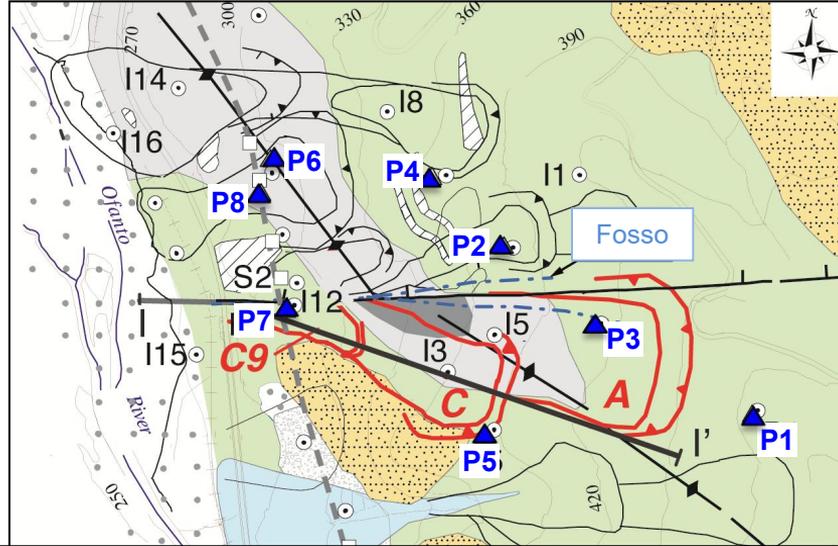


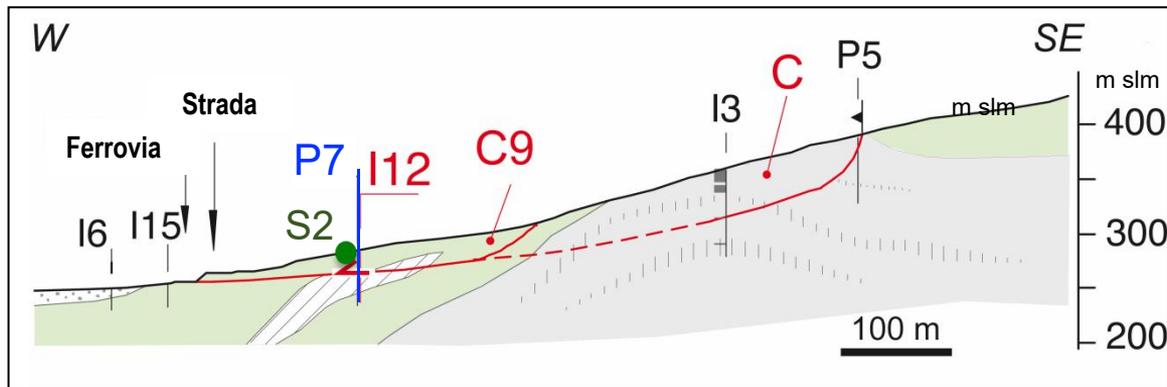
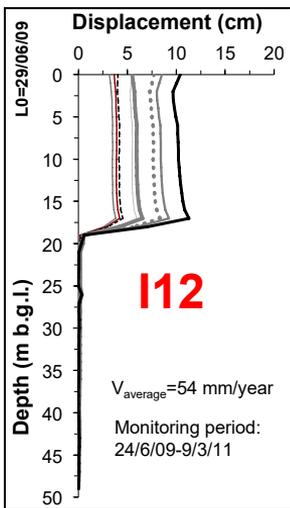
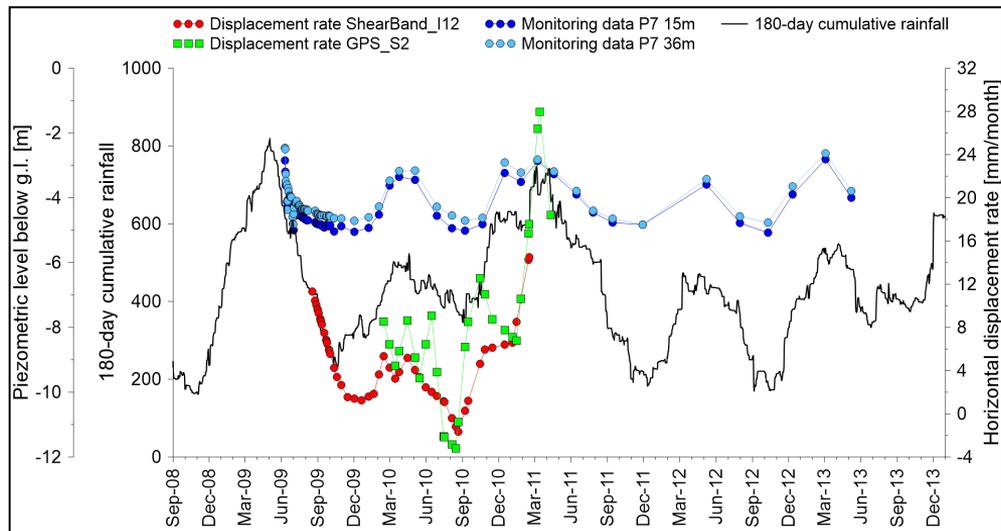
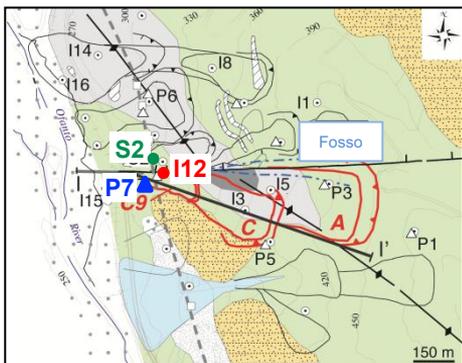
Danni alle infrastrutture











Analisi dell'equilibrio del pendio

Equazione di Richard's (1931)

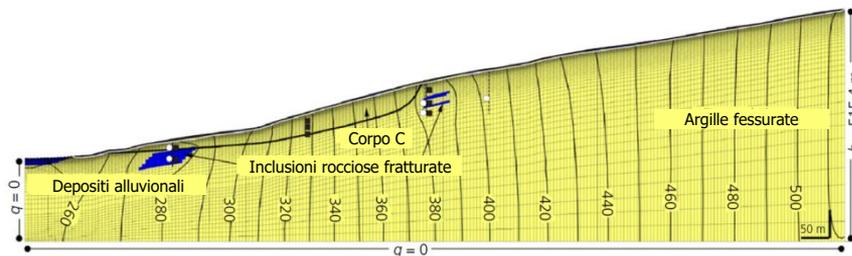
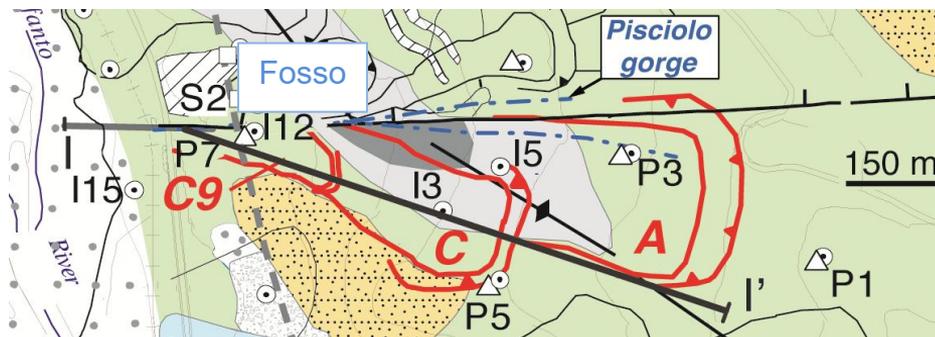
$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k(u_w) \frac{\partial u_w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(u_w) \frac{\partial u_w}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(u_w) \left(\frac{\partial u_w}{\partial z} + 1 \right) \right] = \frac{\partial \vartheta_w(u_w)}{\partial t}$$

$$\vartheta_w(u_w) = nS_r$$

Curva di ritenzione

$$k(u_w)$$

Funzione di
conducibilità idraulica



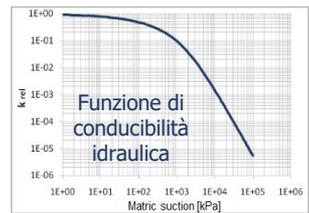
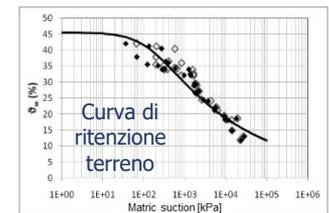
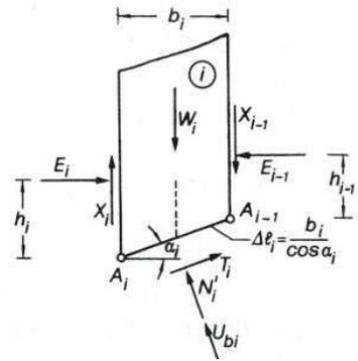
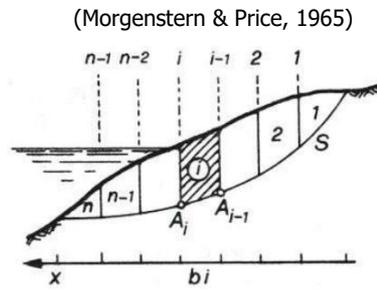
Analisi dell'equilibrio del pendio

Equazione di Richard's (1931)

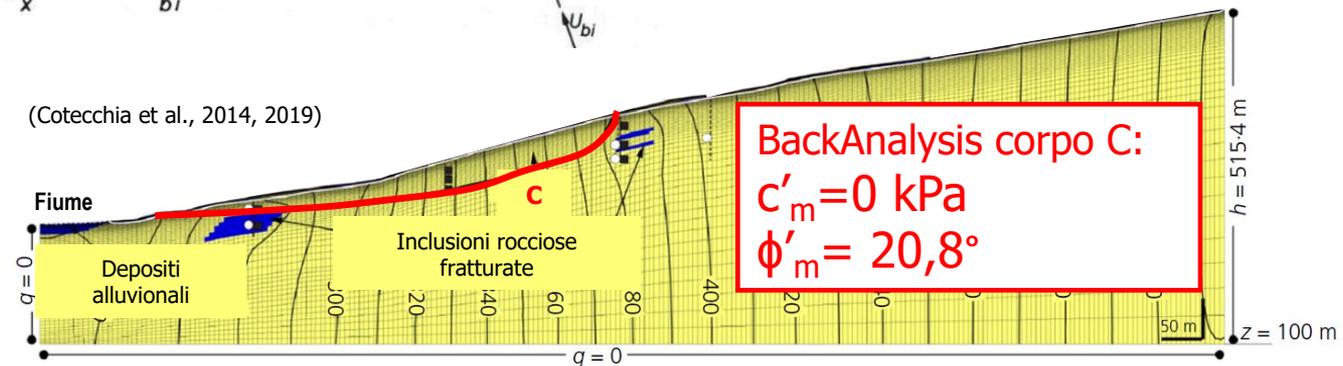
$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k(u_w) \frac{\partial u_w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(u_w) \frac{\partial u_w}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(u_w) \left(\frac{\partial u_w}{\partial z} + 1 \right) \right] = \frac{\partial \vartheta_w(u_w)}{\partial t}$$

$\vartheta_w(u_w) = nS_r$
 Curva di ritenzione

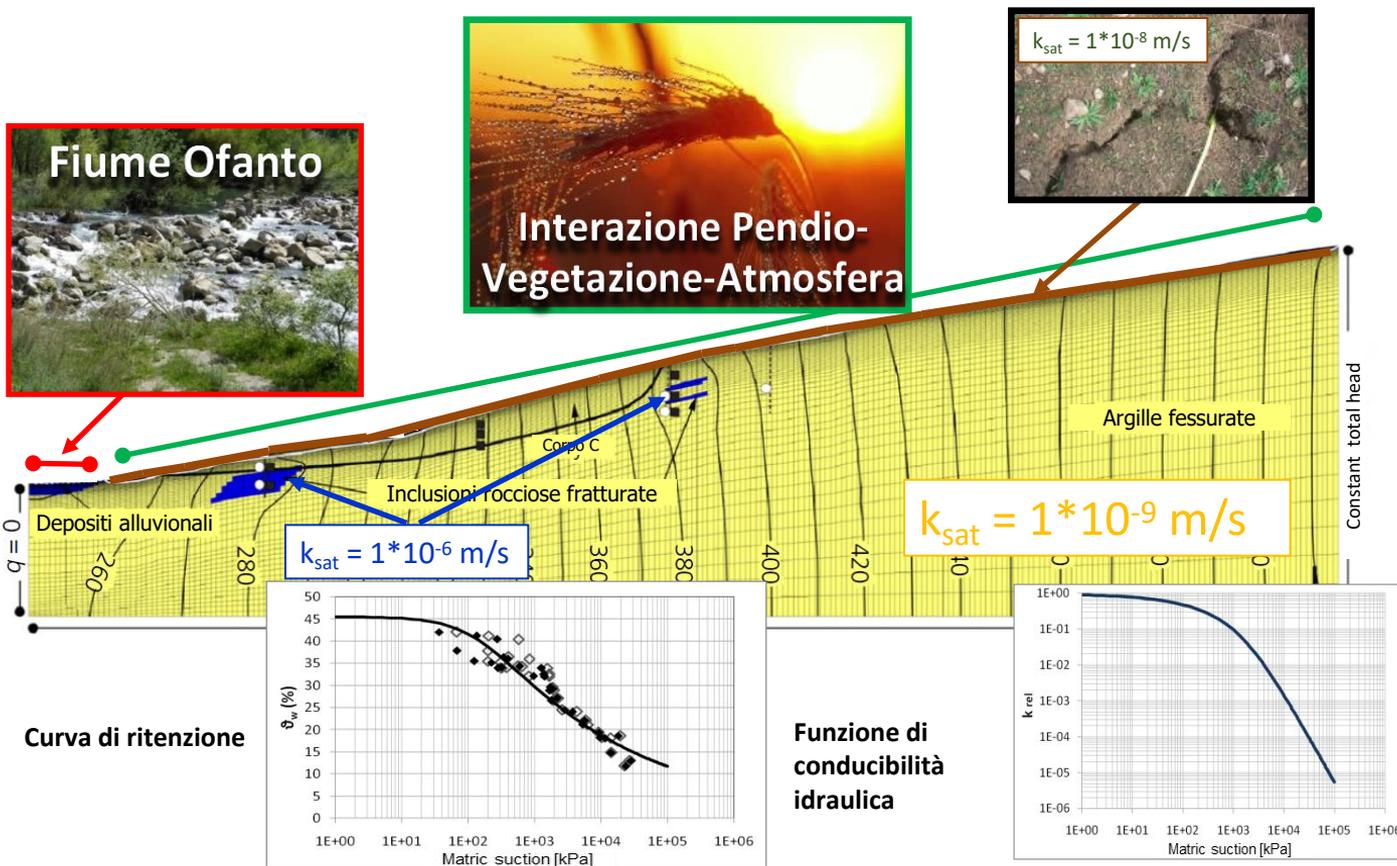
$k(u_w)$
 Funzione di conducibilità idraulica



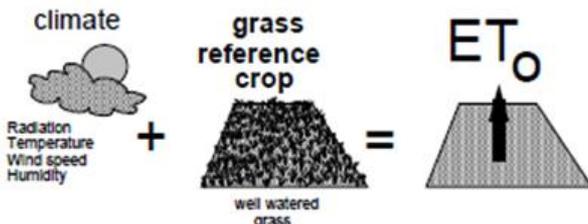
(Cotecchia et al., 2014, 2019)



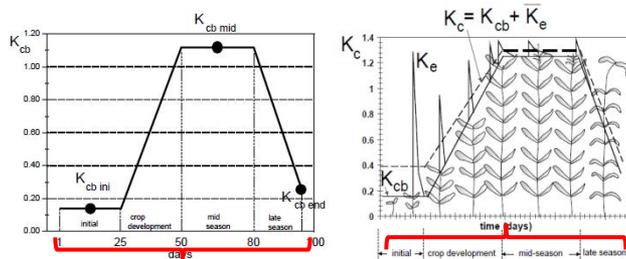
BackAnalysis corpo C:
 $c'_m = 0 \text{ kPa}$
 $\phi'_m = 20,8^\circ$



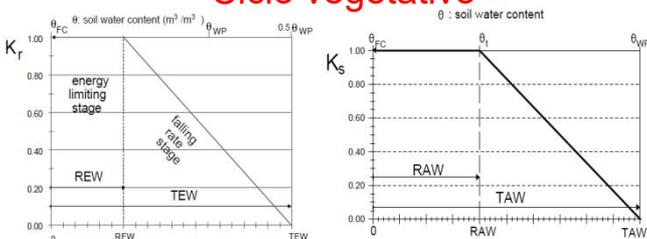
Calcolo dell'evapotraspirazione ET: FAO PENMAN-MONTEITH (approccio a doppio coefficiente colturale)



"A hypothetical reference crop with an assumed crop height of 0.12 m, a fixed surface resistance of 70 s m⁻¹ and an albedo of 0.23."



Ciclo vegetativo



ET₀
(ET di riferimento)



In condizioni standard
(potenziale)

$$E_P = K_E \times ET_0$$

$$T_P = K_{CB} \times ET_0$$



In condizioni non standard
(reale)

$$E_R = K_R \times E_P$$

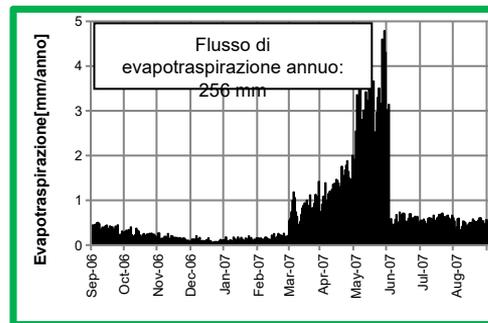
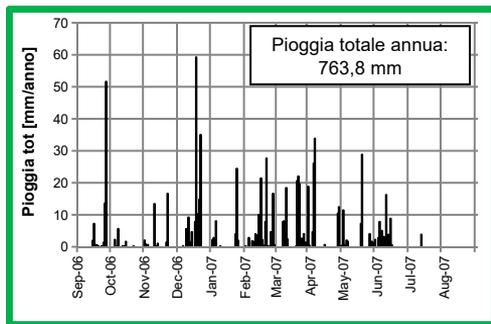
$$T_R = K_S \times T_P$$

Allen et al., (1998)

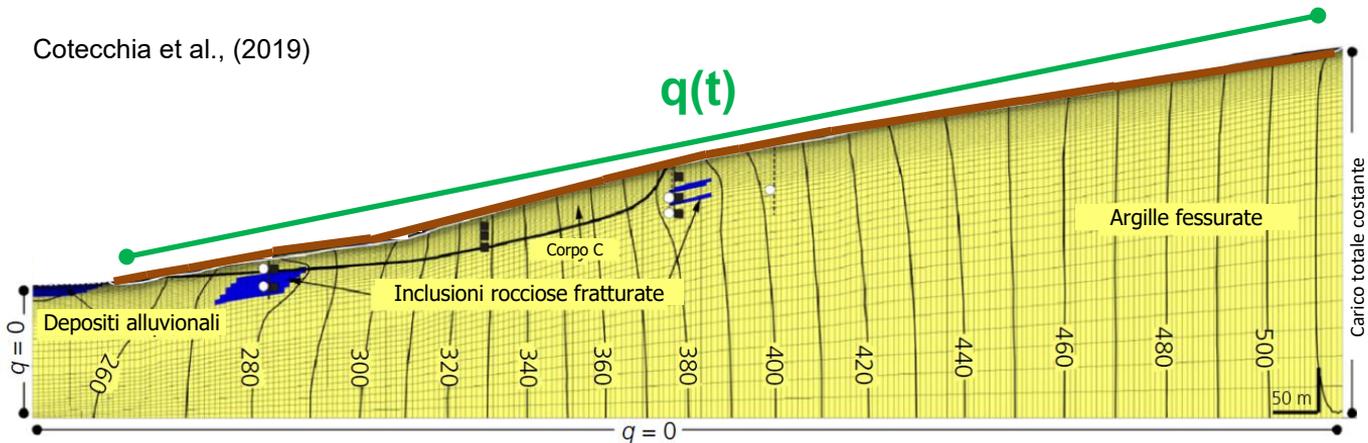


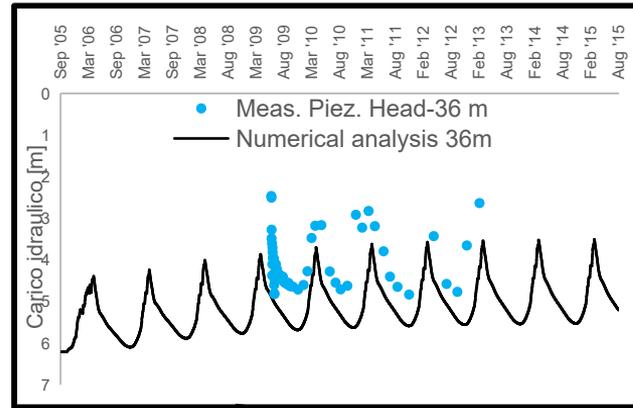
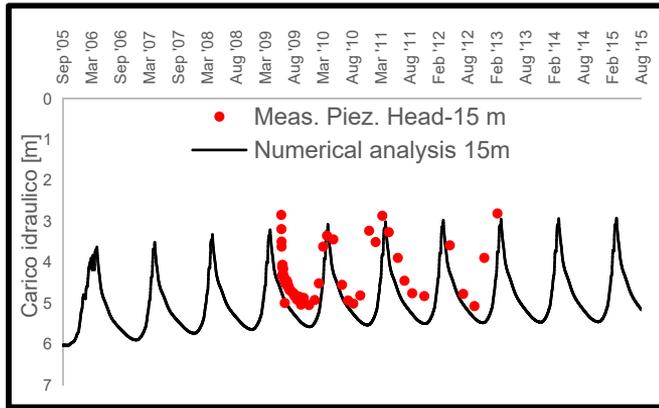
Simulazione dell'interazione pendio-vegetazione-atmosfera con condizioni al contorno transitorie

$q(t)$
 Pioggia netta+ Runoff =

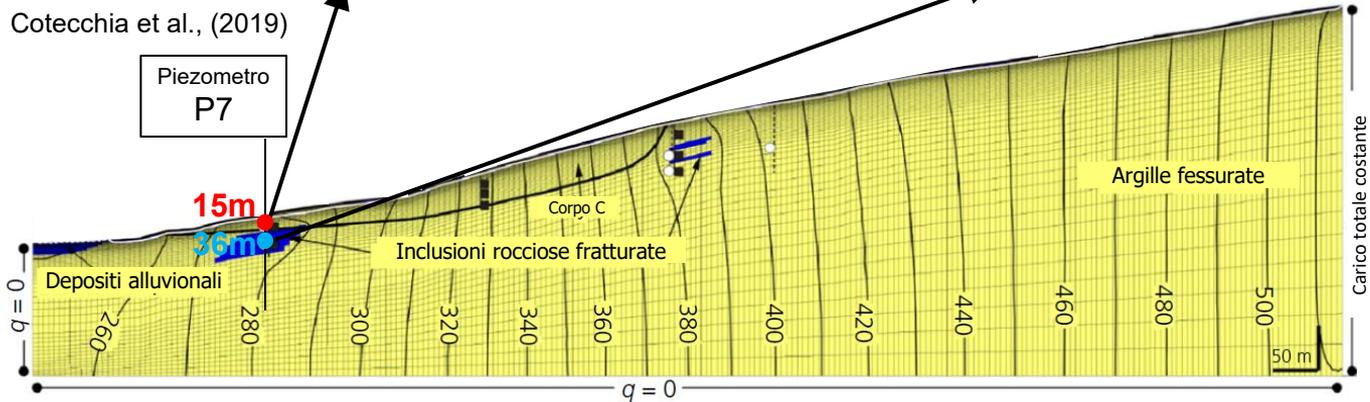


Cotecchia et al., (2019)

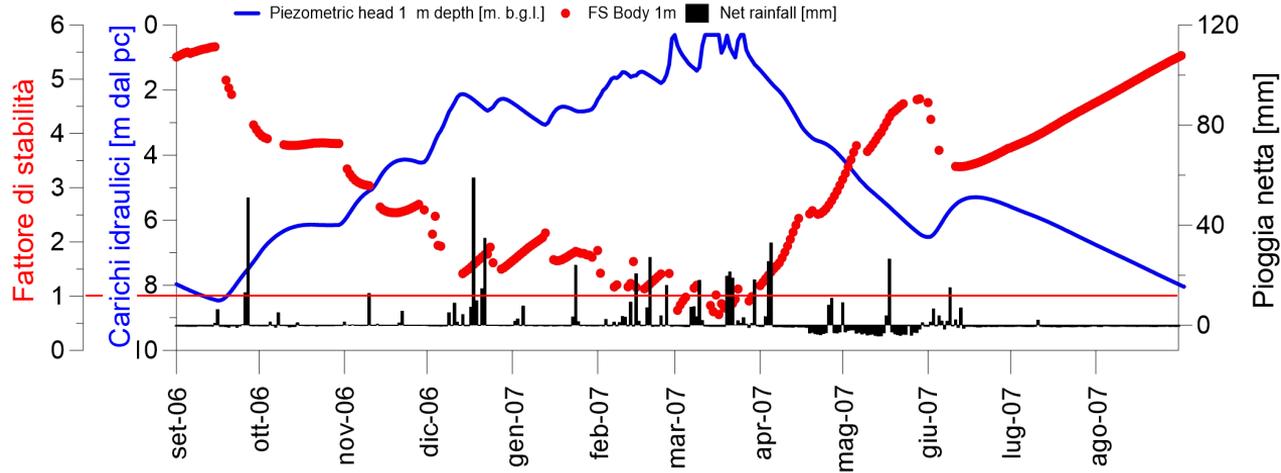




Cotecchia et al., (2019)

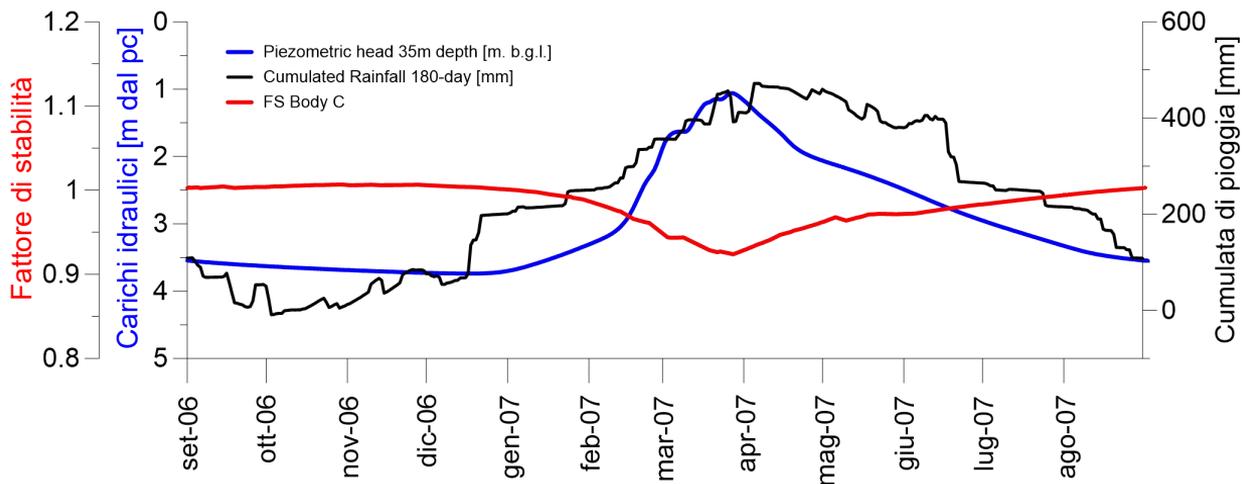


Corpo di frana 1m



Cotecchia et al., (2019)
 Tagarelli & Cotecchia, (2019)

Corpo di frana C

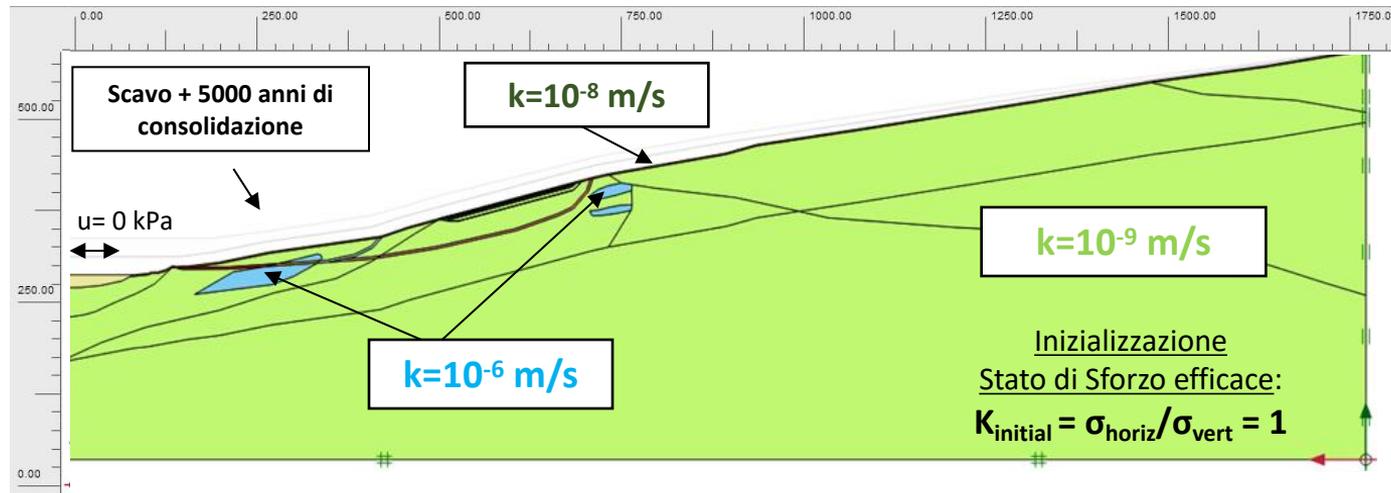


Cotecchia et al., (2019)

Tagarelli & Cotecchia, (2019)

Modello Idro-Meccanico Accoppiato Analisi dell'interazione pendio-vegetazione-atmosfera

Modello geotecnico e inizializzazione dello stato di sforzo efficace

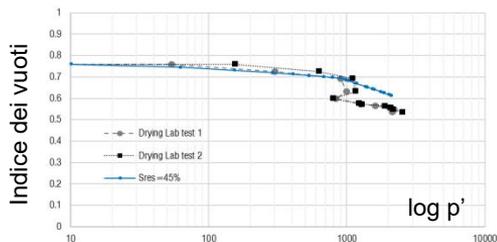
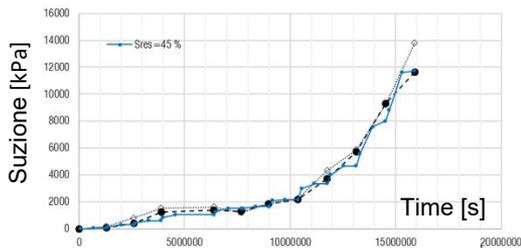


Tagarelli, (2019)

Analisi dell'interazione pendio-vegetazione-atmosfera

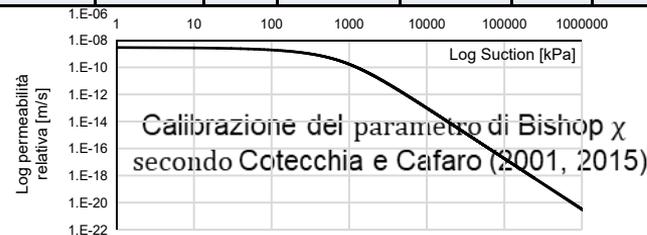
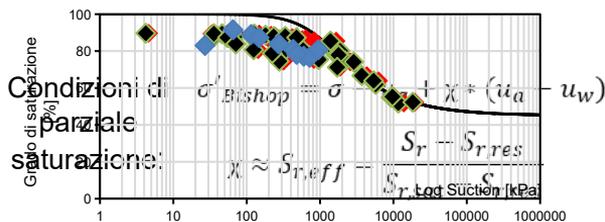
Implementazione delle proprietà idro-meccaniche del materiale di pendio

Pedone, (2014)
Tagarelli & Cotecchia, (2020)



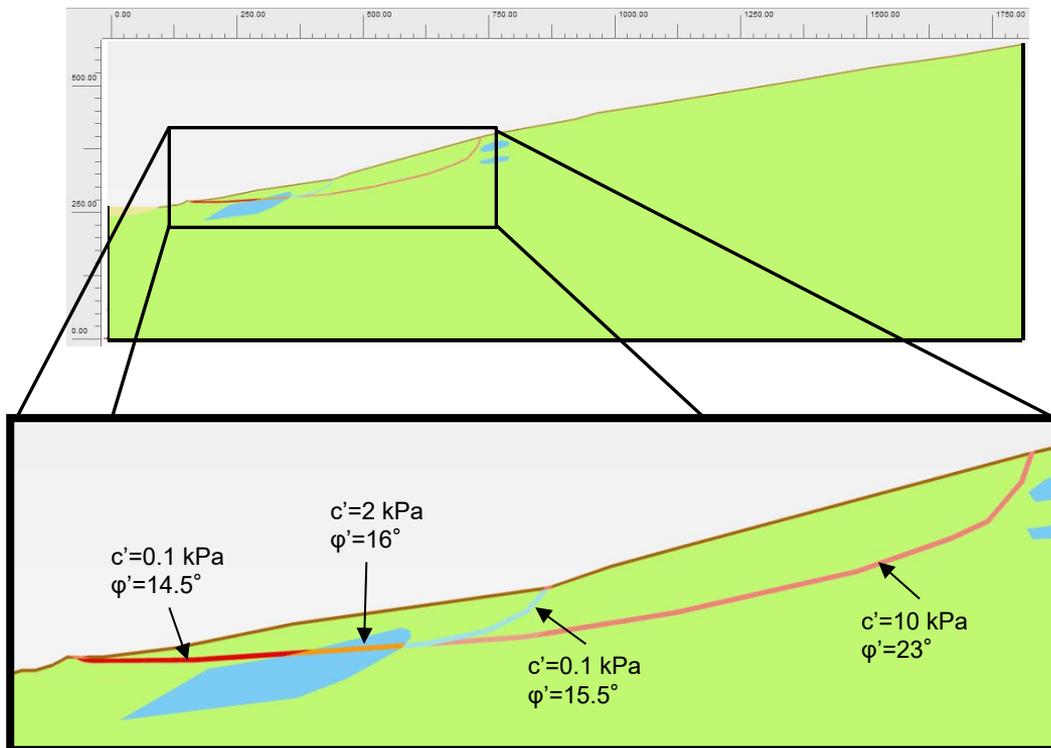
Cotecchia et al., (2014, 2019)

Peso dell'unità di volume terreno		Parametri meccanici (Mohr-Coulomb)					Proprietà idrauliche
γ_{sat} [kN/m ³]	γ_{unsat} [kN/m ³]	ν'	E' [kPa]	c' [kPa]	ϕ' [°]	ψ [°]	k_{sat} [m/s]
21	19	0,3	15000	15	23	0	3*10⁻⁹



Analisi dell'interazione pendio-vegetazione-atmosfera

Implementazione di bande di taglio pregresse



Proprietà
meccaniche della
preesistente
banda di taglio

Modellazione per l'analisi dell'interazione pendio-vegetazione-atmosfera

Condizioni al contorno transitorie

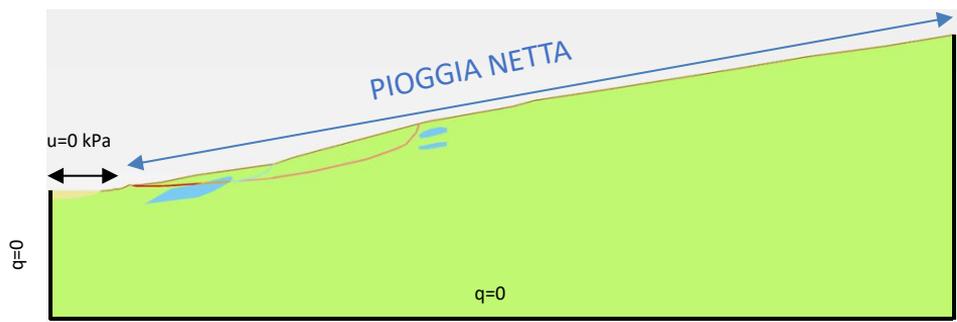
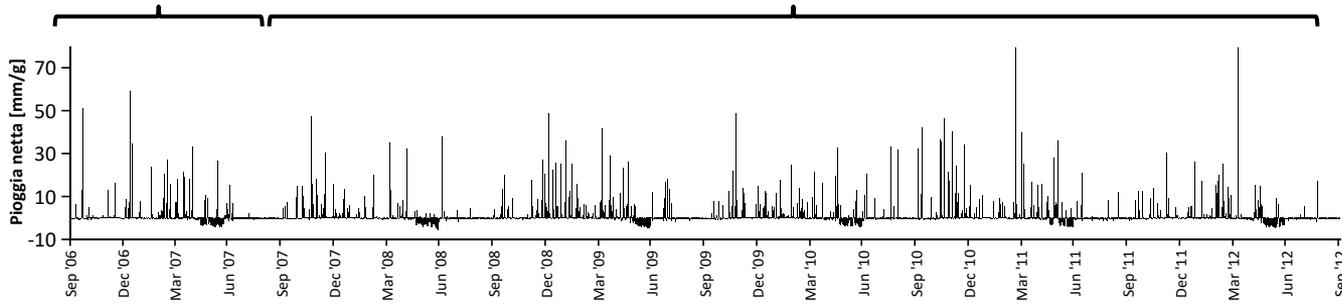
$$\text{PIGGIA NETTA} = \text{PIOGGIA TOTALE} - \text{EVAPOTRASPIRACIONE}$$

Dati rilevati in stazione pluviometrica

Metodo FAO Penman-Monteith

10 anni di PIOGGIA NETTA 2006-2007

PIOGGIA NETTA 2007-2012

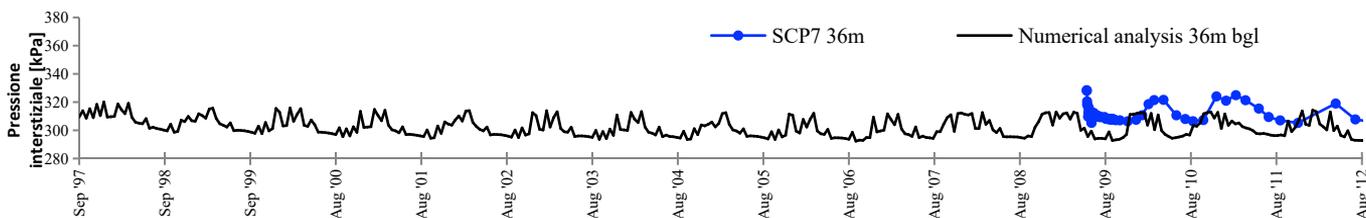
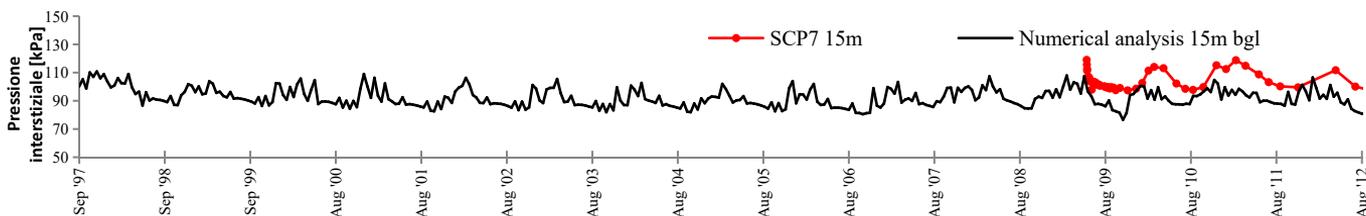
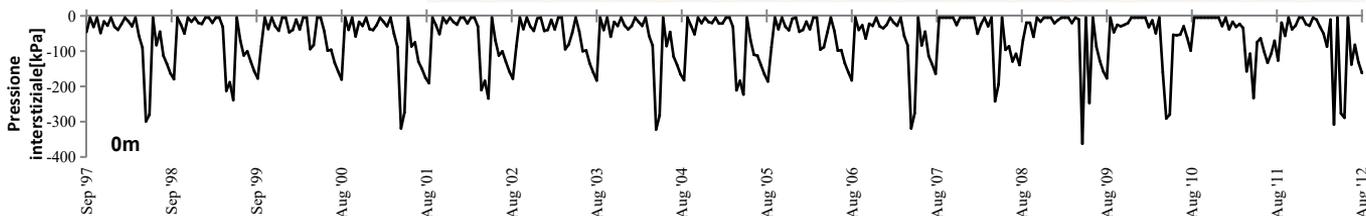
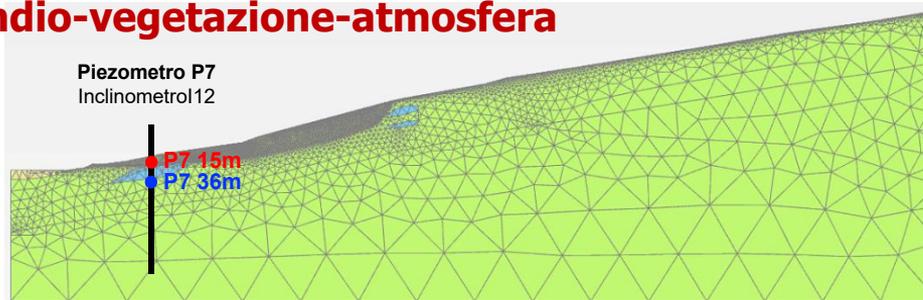


Tagarelli, (2019)

Analisi dell'interazione pendio-vegetazione-atmosfera

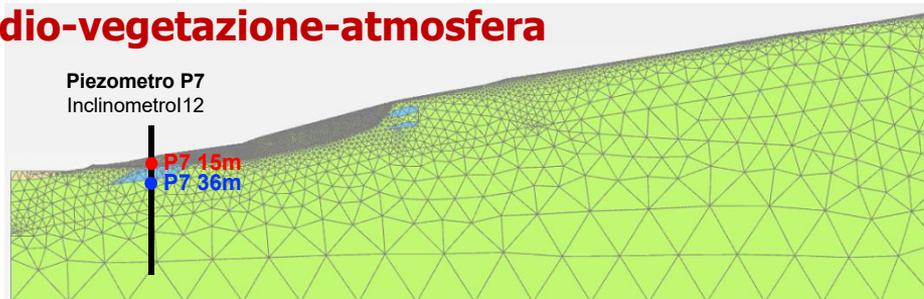
Modello Idro-Meccanico:
pressioni interstiziali

Tagarelli, (2019)

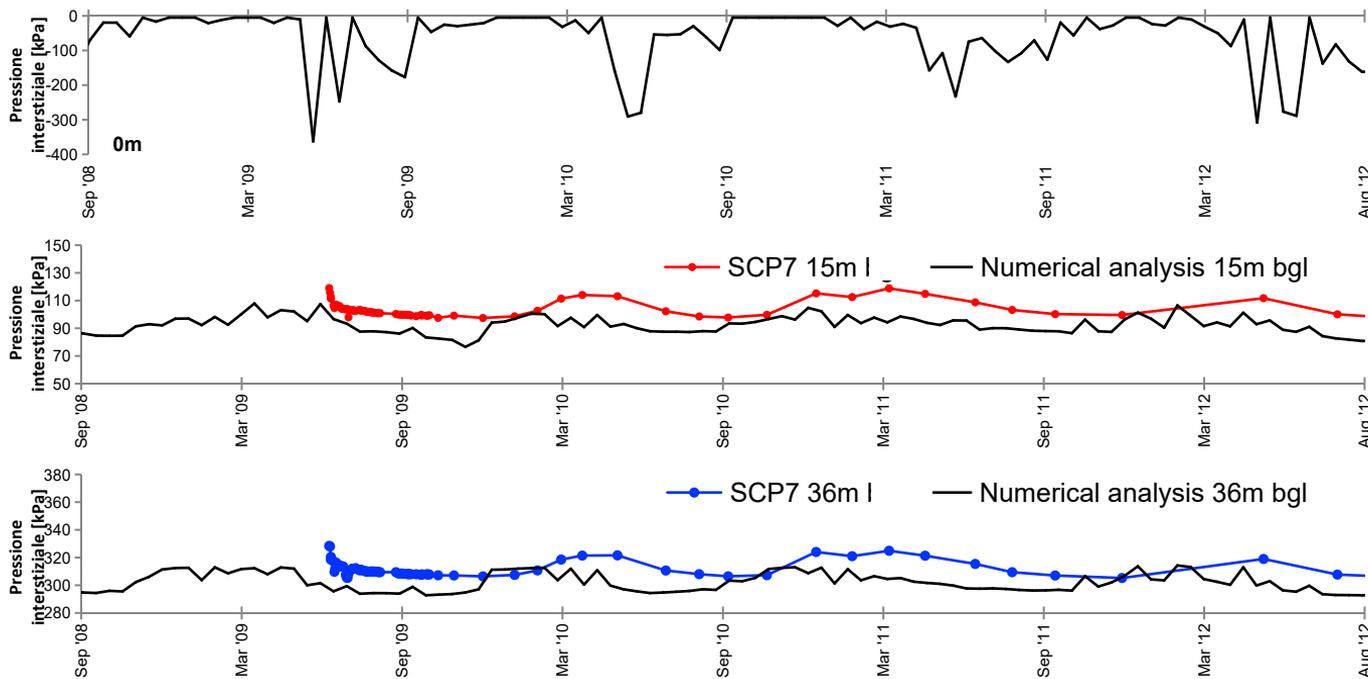


Analisi dell'interazione pendio-vegetazione-atmosfera

Modello Idro-Meccanico:
pressioni interstiziali

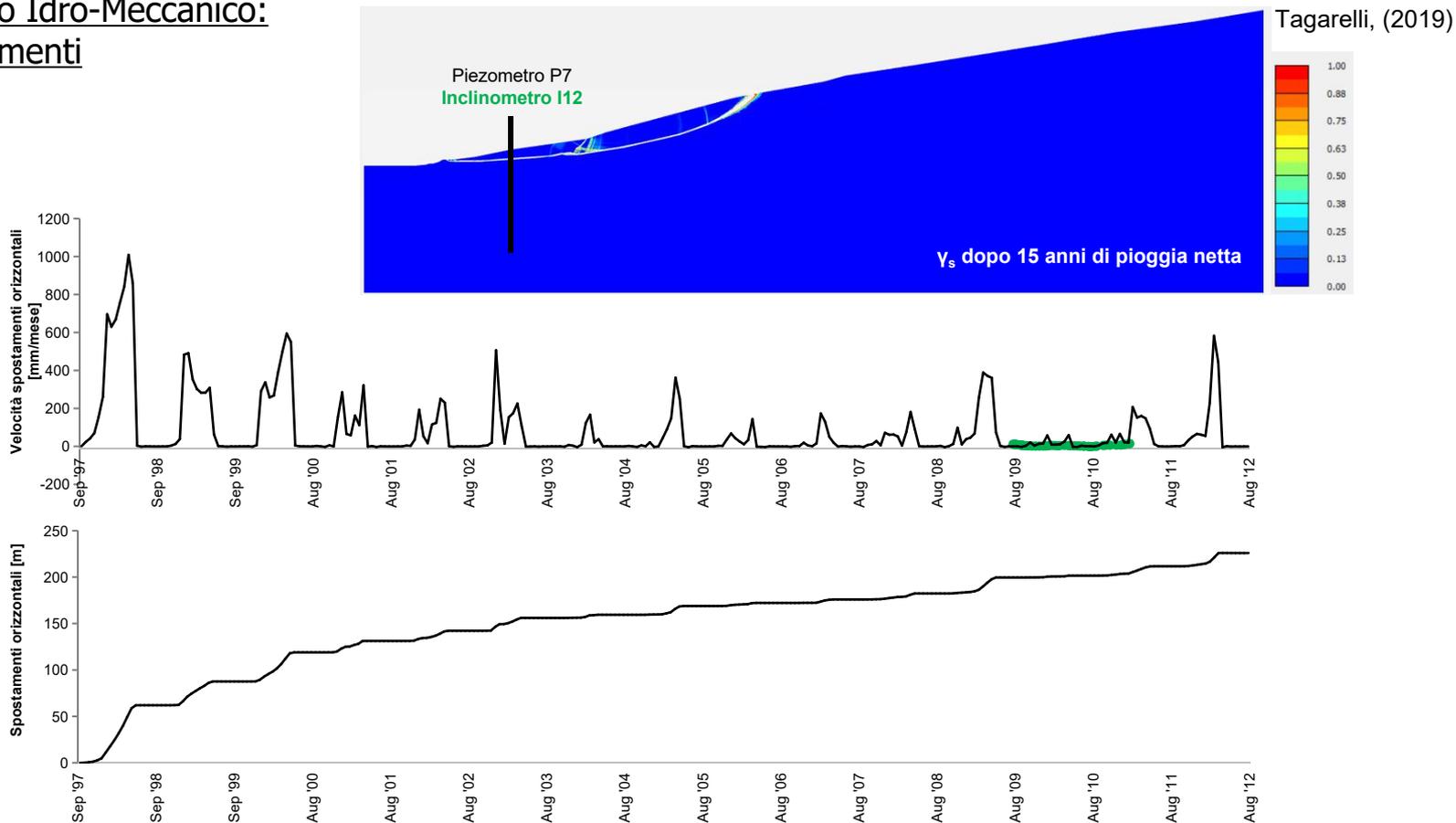


Tagarelli, (2019)



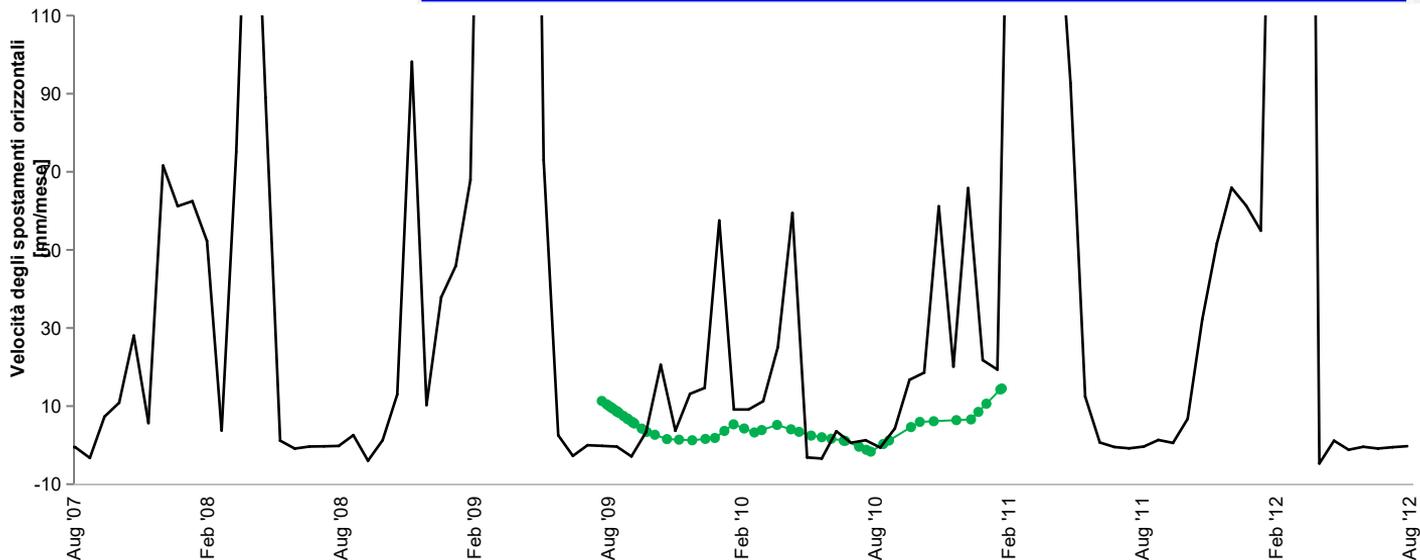
Analisi dell'interazione pendio-vegetazione-atmosfera

Modello Idro-Meccanico:
spostamenti

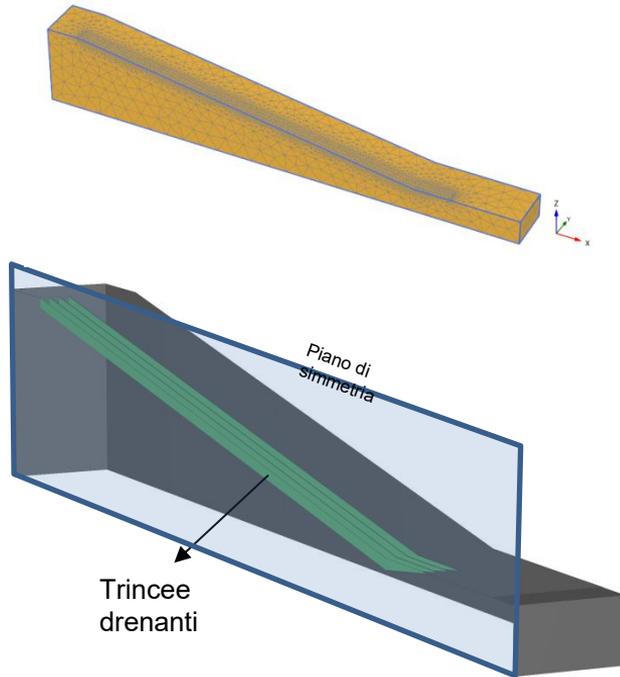


Analisi dell'interazione pendio-vegetazione-atmosfera

Modello Idro-Meccanico:
spostamenti

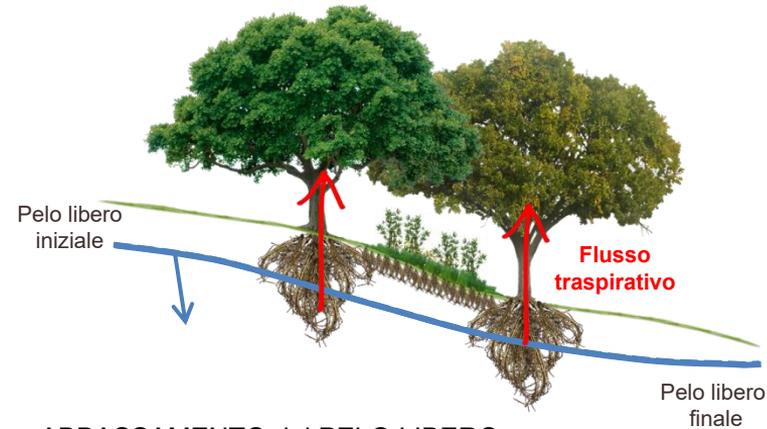


TRINCEE DRENANTI PROFONDE

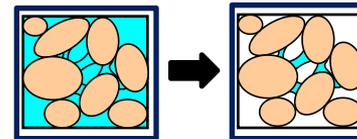


MODELLAZIONE 3D AVANZATA
DELL'INTERAZIONE
PENDIO-VEGETAZIONE-ATMOSFERA
CON L'AZIONE DI UN SISTEMA DI TRINCEE
DRENANTI PROFONDE

USO DI VEGETAZIONE SELEZIONATA



ABBASSAMENTO del PELO LIBERO



$$u_{\text{iniziale}} > 0$$

$$u_{\text{finale}} \leq u_{\text{iniziale}}$$

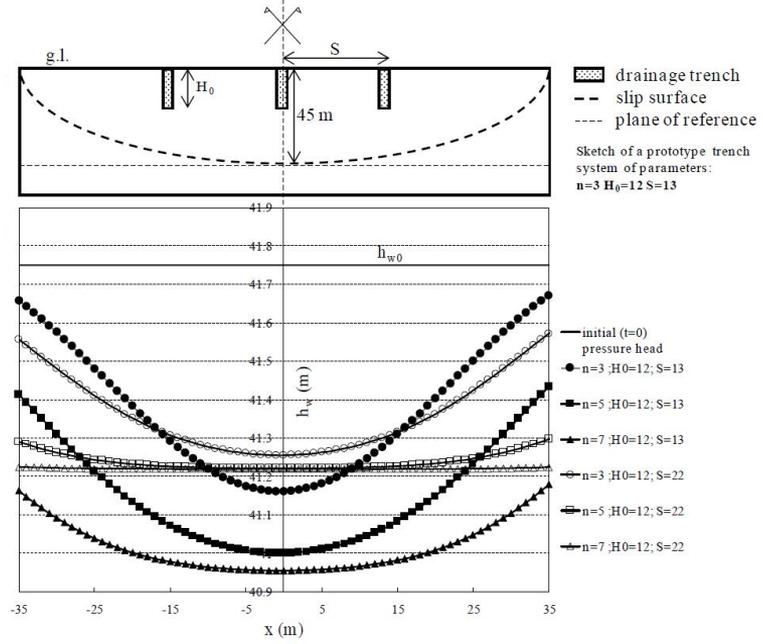
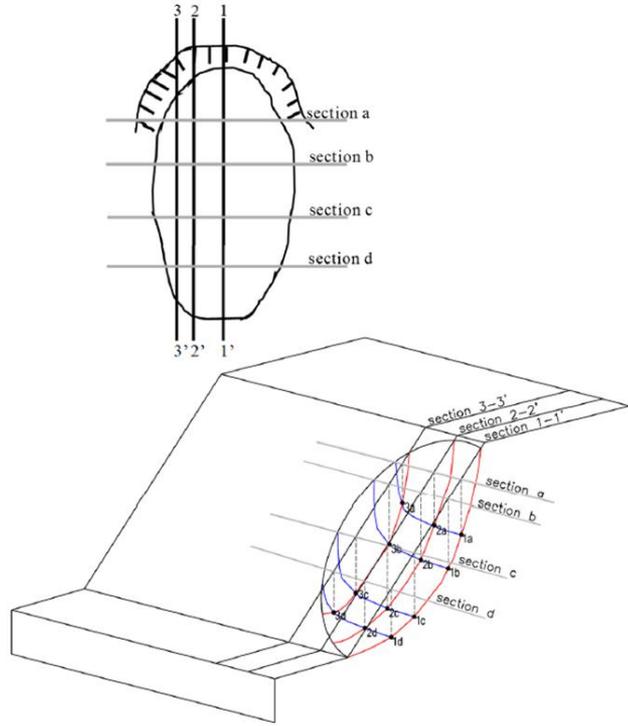
$$u_{\text{finale}} \leq 0 \quad (Sr \leq 100\%)$$

Criterio di rottura:
Mohr-Coulomb-Terzaghi

$$\tau_f = c' + (\sigma - u)tg\phi'$$

INCREMENTO DELLA
RESISTENZA AL TAGLIO
DEL SISTEMA
TERRENO-RADICE

Modellazione numerica 2D di trincee drenanti



Cotecchia et al., (2016)
Tagarelli & Cotecchia (2022)

Crop-Test in situ sul versante di Pisciole



All'interno dell'area vegetata

- Temperatura terreno: 1 e 2,5m
- Suzione: 1 and 2,5m
- Contenuto d'acqua: 0-1,6m
- Pressione interstiziale: 7m

All'esterno dell'area vegetata

- Temperatura terreno: 1 and 2,5m
- Suzione: 1 and 2,5m
- Contenuto d'acqua: 0-1,6m
- Pressione interstiziale: 7m

Tagarelli & Cotecchia, (2022)