

## **CARATTERIZZAZIONE PRELIMINARE DEGLI EFFETTI INDOTTI DAL FUOCO SU TERRENI DI COPERTURA PIROCLASTICI**

Iervolino L.<sup>(a)</sup>, Peduto D.<sup>(a)</sup>, Foresta V.<sup>(a)</sup>

*(a) Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Salerno, Via Giovanni Paolo II, 132 -  
84084 Fisciano*

*liervolino@unisa.it, dpeduto@unisa.it, vforesta@unisa.it*

### **Sommario**

La nota presenta i risultati preliminari di uno studio volto all'analisi delle variazioni delle proprietà fisico-idromeccaniche di depositi piroclastici superficiali, indotte sia da condizioni di incendio naturale che da trattamenti termici in laboratorio. I campioni di terreno sono stati prelevati su un versante del Monte "Le Porche" nel comune di Siano (Salerno), interessato da un incendio il 20 settembre 2019 e ricompreso nell'area colpita dalle disastrose frane veloci di tipo flusso del 5-6 maggio 1998. La sperimentazione di laboratorio su campioni non bruciati / bruciati / trattati in forno a muffola ha evidenziato: i) variazioni granulometriche, dovute alla disgregazione di ghiaie e sabbie pomicee; ii) variazioni cromatiche dal nero al rossastro; iii) variazioni della gravità specifica in funzione della particolare condizione di bruciatura (naturale o di laboratorio); iv) riduzione della resistenza al taglio, ascrivibile ad una diminuzione del contributo coesivo offerto dagli apparati radicali e, per condizioni di bruciatura più severe, anche dell'angolo di resistenza al taglio; (v) variazioni della capacità di ritenzione idrica. Sebbene preliminare, lo studio mira a fornire le conoscenze di base per la valutazione della suscettibilità alla erosione e/o a frane veloci superficiali pluvio-indotte di versanti attraversati dal fuoco.

### **1. Introduzione**

Gli incendi boschivi lasciano una traccia evidente sul territorio attraverso la combustione della vegetazione, la deposizione di materiale residuo, nonché la modifica fisica e chimica dei suoli, compresa la creazione o rimozione dei livelli idrofobici. Gli incendi possono influire sulla risposta idrologica di bacini montani o collinari a causa delle modifiche ai tassi di infiltrazione e all'erosività dei suoli (Rengers et al., 2020). In particolare, gli incendi possono ridurre l'infiltrazione dell'acqua piovana nelle coltri superficiali con il conseguente aumento del deflusso superficiale e dei processi erosivi associati rispetto alle aree non bruciate. La mobilitazione di sedimenti e l'incorporazione di materiale aggiuntivo nei flussi verso valle può portare a colate detritiche (Esposito et al., 2017). Questi fenomeni possono verificarsi entro pochi anni dall'incendio e più volte nello stesso bacino bruciato, in occasione di eventi di pioggia significativi. In generale, le variazioni delle proprietà dei terreni superficiali indotte dagli incendi sono sito-specifiche e, a tal riguardo, le informazioni disponibili in letteratura sono spesso discordanti. Ad esempio, alcuni studi hanno dimostrato che la distribuzione granulometrica può subire variazioni differenti a seconda della tipologia di terreno (Ulery e Graham, 1993). Con riferimento agli effetti degli incendi sul contenuto di sostanza organica del terreno (González-Pérez et al., 2004) alcuni autori hanno dimostrato la riduzione del contenuto di sostanza organica nello strato superficiale di suolo, come risultato della combustione generata dal fuoco; altri hanno evidenziato aumenti, dovuti principalmente alla deposizione di materiale residuo dell'incendio (i.e., parzialmente o totalmente combusto e con contenuto variabile di sostanza organica). Con riferimento alle possibili variazioni della conducibilità idraulica del terreno (Stoof et al. 2010), gli studi disponibili in letteratura riportano i) diminuzioni post-incendio, come risultato dell'intasamento

dei pori del terreno determinato dalla deposizione di cenere e dall'idrofobicità indotta dalle temperature raggiunte durante tali eventi; ii) nessuna variazione significativa indotta dal fuoco; o iii) aumenti, in caso di incendi molto severi che possono distruggere lo strato idrofobico e formare percorsi preferenziali per il flusso idrico in risposta alla combustione e all'indebolimento degli apparati radicali presenti.

In un contesto ampio e complesso come questo appare evidente la necessità di concentrarsi sulla definizione di un chiaro quadro scientifico, che sia di supporto alle analisi di suscettibilità da erosione e/o frane post-incendio.

La presente nota si propone di fornire un contributo preliminare allo studio delle variazioni delle proprietà fisiche e idro-meccaniche dei terreni di copertura piroclastica derivanti dall'attività esplosiva del complesso vulcanico Somma-Vesuvio in Campania. Tali terreni sono altamente suscettibili a frane veloci superficiali e sono frequentemente interessati da incendi, soprattutto alla fine della stagione estiva (fine settembre-inizio ottobre). In questo periodo dell'anno, precipitazioni intense possono innescare processi erosivi e/o frane superficiali sui versanti incendiati (Esposito et al., 2017). Tuttavia, mancano studi che facciano diretto riferimento agli effetti indotti dagli incendi sulle proprietà fisiche e idro-meccaniche di terreni piroclastici che siano di supporto alla modellazione dei processi erosivi e di instabilità post-incendio.

## 2. Area di studio, attività di sito e prove di laboratorio

In passato, i versanti del comune di Siano sono stati interessati sia da incendi che da frane veloci tipo-flusso (Fig. 1a).

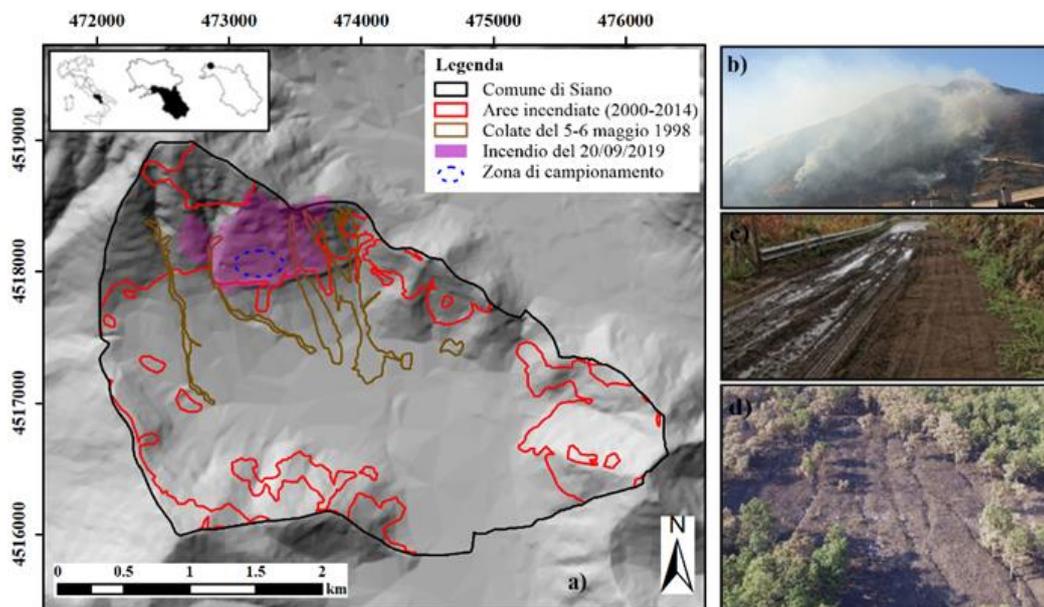


Fig 1. Inquadramento dell'area di studio con indicate: (i) la localizzazione dell'area di studio (da sinistra a destra: Italia, regione Campania, comune di Siano); (ii) le aree incendiate in passato (elaborate a partire dai dati del Corpo Forestale dello Stato, 2000-2020); (iii) le aree in frana (IFFI, Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia, ISPRA, 2014); (iv) l'area dell'incendio di Siano del 20/09/2019; (v) la zona di campionamento. (b) Foto del Monte "Le Porche" scattata durante l'incendio. (c,d) Fenomeni di erosione avvenuti nell'area incendiata in occasione dell'evento di pioggia del 20/11/2019 (modificato da Peduto et al., 2022).

L'area di studio fa parte del versante meridionale di un massiccio carbonatico di rocce calcaree e dolomitiche mesozoiche. Quest'ultimo raggiunge una quota massima di 1133 m s.l.m. e la sua morfologia è caratterizzata da versanti ripidi con una pendenza media di circa 35°. Il massiccio è ricoperto da depositi piroclastici derivati da diverse eruzioni del vicino complesso vulcanico del Somma-Vesuvio. Questi depositi sono costituiti da strati alternati di cenere, pomice e orizzonti di

terreno sepolto classificati come *andosuoli*, caratterizzati da una coesione non significativa. Di conseguenza, la resistenza al taglio della copertura vulcanica è controllata principalmente dalla suzione di matrice e dal contributo coesivo fornito dagli apparati radicali della vegetazione, ove presente. Il caso di studio del presente lavoro è rappresentato dall'incendio verificatosi su un versante del Monte "Le Porche" nel comune di Siano il 20 settembre 2019 (Fig. 1a,b). Con l'ausilio di un drone è stato possibile individuare e monitorare le zone del pendio bruciato interessate da processi erosivi, innescati da una precipitazione di breve durata ed elevata intensità, occorsa in data 20 novembre 2019, dimostrando che parte dei sedimenti si è mobilitata a causa del ruscellamento superficiale concentrato durante tale evento di pioggia prima di essere depositata lungo la strada sottostante (Fig. 1c,d). L'attività di prelievo in sito dei campioni indisturbati ha interessato i primi 5 cm dell'orizzonte superficiale, al fine di limitare le analisi alla porzione di suolo maggiormente esposta all'incendio. Le diverse classi di campioni sono distinte in UB-j e Bi-j, in cui UB e B stanno rispettivamente per campioni non bruciati e bruciati dall'incendio; con "i" si fa riferimento alla data di campionamento mentre con "j" si indica il numero progressivo di campioni prelevati in ogni i-esima data. In particolare, l'attività di campionamento si è concentrata su campioni bruciati (B1-j) prelevati il 30 settembre 2019 in un'area di 3 ettari colpita dall'incendio del 20 settembre 2019 e su campioni non bruciati (UB-j) prelevati in un'area ubicata nelle immediate vicinanze di quella incendiata. Ulteriori campioni sono stati prelevati nell'area incendiata il 18 ottobre 2019 (B2-j) e il 16 febbraio 2020 (B3-j) al fine di valutare l'evoluzione nel tempo delle proprietà fisiche e idro-meccaniche del terreno in studio.

Le proprietà dei campioni di terreno in esame sono state investigate con prove di laboratorio. In particolare, oltre ai campioni indisturbati (UB-j, B1-j, B2-j, B3-j), la campagna sperimentale si è concentrata anche su campioni di terreno ricostituiti a partire da materiale trattato in forno a muffola a 300 °C per 60 minuti e a 600 °C per 60 minuti (MFT300-j e MFT600-j, rispettivamente, in cui j identifica il numero progressivo di campioni testati). Il programma sperimentale ha previsto: (i) analisi granulometriche per setacciatura (ASTM D422-63) (n. 27); (ii) prove per la valutazione della gravità specifica ( $G_s$ ) (ASTM D854-14) (n. 31); (iii) prove di taglio diretto in condizioni sature (ASTM D3080) (n. 35); (iv) prove per la determinazione della curva di ritenzione idrica in edometro a suzione controllata (n. 4).

### **3. Risultati**

Con riferimento alle proprietà fisiche, riguardo alla distribuzione granulometrica, i risultati mostrano un aumento del contenuto di limo e una contestuale diminuzione del contenuto di ghiaia e sabbia, a seguito dei trattamenti termici in forno a muffola (Fig. 2a,b). Questa variazione di granulometria si può legare ad una maggiore propensione alla disgregazione, in assenza di tensioni applicate, delle particelle di natura pomicea, delle dimensioni di sabbia e ghiaia, indotta dall'esposizione a temperature elevate.

In aggiunta, i risultati hanno mostrato che, rispetto ai campioni prelevati nel sito di controllo non bruciato (UB-j),  $G_s$  dei campioni B1-j risulta mediamente inferiore, mentre i campioni raccolti a diverse date dopo l'incendio (B2-j e B3-j) tendono ad un progressivo ripristino del valore di controllo. Al contrario, i campioni trattati termicamente in laboratorio (MFT300-j, MFT600-j) sono caratterizzati da un andamento crescente di  $G_s$  all'aumentare della severità del trattamento termico in forno a muffola (Fig. 2c). La diminuzione di  $G_s$  nei campioni B1-j si può mettere in relazione con la combustione parziale della sostanza organica contenuta nei campioni di terreno, per effetto delle temperature raggiunte durante l'incendio, nonché con la presenza della sostanza organica derivante dalla parte di lettiera/sottobosco, caratterizzata da un certo grado di combustione e depositatasi sotto forma di carbone e/o cenere nel profilo di terreno prelevato. Questa parte di materiale residuo dell'incendio è in genere caratterizzata da un peso inferiore, a parità di volume, rispetto alle particelle di terreno, il che spiegherebbe i valori più bassi di  $G_s$  per questa classe di campioni. In aggiunta, i

campioni prelevati dall'area incendiata circa un mese (B2-j) e cinque mesi (B3-j) dopo l'evento sono caratterizzati da valori di  $G_s$  non significativamente diversi da quelli dei campioni di controllo non bruciati (UB-j), tendendo ad un progressivo ripristino nel tempo del valore di controllo. Tale ripristino potrebbe essere dovuto in parte al ruscellamento e ai processi erosivi post-incendio (Fig. 1d) innescati principalmente da precipitazioni intense, che hanno portato alla parziale rimozione dei residui dell'incendio dall'orizzonte superficiale.

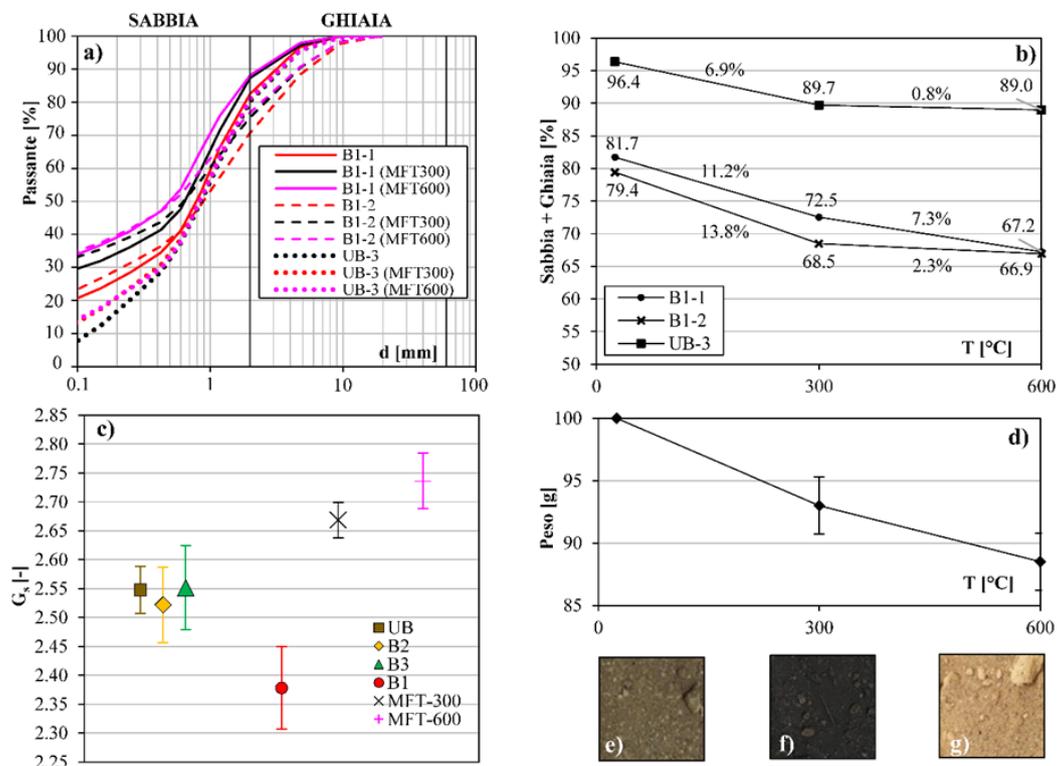


Fig 2. (a) Effetto dei trattamenti termici in forno a muffola (MFT) sulla distribuzione granulometrica dei campioni B1-1, B1-2 e UB-3. (b) Percentuali di sabbia e ghiaia e (c)  $G_s$  delle classi di campioni analizzati. (d) Andamento del peso con la temperatura di esposizione. Colore tipico dei campioni: (e) UB; (f) MFT300; (g) MFT600 (modificato da Peduto et al., 2022).

D'altra parte, l'aumento di  $G_s$  con la temperatura per i campioni trattati termicamente in laboratorio è dovuto principalmente al diverso grado di combustione/volatilizzazione della sostanza organica presente, caratterizzata dall'essere più leggera e ingombrante delle particelle di terreno. A conferma di ciò, la Figura 2d indica che parte della sostanza organica presente viene volatilizzata alla fine del primo step ( $T_0$ -300), mentre la parte restante necessita di temperature più elevate (o di una durata maggiore a fissata temperatura) per volatilizzare. Inoltre, i trattamenti termici di laboratorio hanno consentito di apprezzare le variazioni cromatiche esibite dalle particelle di terreno. In particolare, i campioni di terreno MFT300-j hanno mostrato un colore molto più scuro (Fig. 2f) rispetto a quelli non bruciati (Fig. 2e), tendente al nero. I campioni MFT600-j hanno subito un'ulteriore variazione di tonalità, passando dal nero a colori tra il giallo e il rosso (Fig. 2g).

Per quanto riguarda i cambiamenti nelle proprietà meccaniche dei campioni di suolo testati, sono emerse riduzioni dei contributi coesivi dei campioni bruciati (B1-j), rivegetati (B3-j) e trattati termicamente in laboratorio (MFT300-j, MFT600-j) rispetto ai campioni di controllo non bruciati (UB-j). In aggiunta, i campioni MFT600-j hanno esibito una diminuzione dell'angolo di resistenza al taglio rispetto alle altre classi di campioni investigate. La diminuzione del contributo coesivo dei campioni colpiti dal fuoco, sia in condizioni naturali che di laboratorio, si può legare alla combustione degli apparati radicali presenti. Ciò è confermato da diversi studi di letteratura (e.g., Lei et al., 2022) che riportano come le radici possano perdere parte della loro resistenza dopo un incendio,

principalmente attraverso una riduzione del contributo coesivo, il che si riflette su una maggiore suscettibilità dei pendii all'erosione e/o a frane superficiali. Inoltre, non è stato apprezzato un recupero del valore di coesione dei campioni rivegetati B3-j, rispetto al valore di controllo dei campioni UB-j, suggerendo che il ripristino della resistenza al taglio è una funzione del tempo, ma anche di altri parametri, tra cui la geomorfologia del sito, la tipologia di incendio, di suolo e di vegetazione.

Dai risultati dei campioni trattati termicamente in laboratorio è emerso che la coesione e l'angolo di resistenza al taglio assumono valori differenti in funzione della temperatura di esposizione. In dettaglio, dal confronto tra i parametri di resistenza dei terreni non trattati termicamente (UB-j, B1-j, B3-j) e quelli trattati in forno a muffola (MFT300-j, MFT600-j), si evince che i campioni MFT300-j non sono caratterizzati da variazioni significative dell'angolo di resistenza al taglio, mentre si osserva una diminuzione della coesione. Al contrario, i campioni MFT600-j, confrontati con i campioni MFT300-j, mostrano una variazione significativa dell'angolo di resistenza al taglio ma non del valore di coesione. Si rileva, quindi, che la maggior parte delle radici che conferiscono al terreno la necessaria tenuta strutturale al distacco potrebbero già risultare combuste dopo il trattamento MFT300, mentre sono necessarie temperature più elevate per apprezzare anche variazioni dell'angolo di resistenza al taglio. La diminuzione dell'angolo di resistenza al taglio per i campioni MFT600-j potrebbe essere dovuta a variazioni della distribuzione granulometrica, della forma e rugosità dei grani, nonché del loro grado di interconnessione.

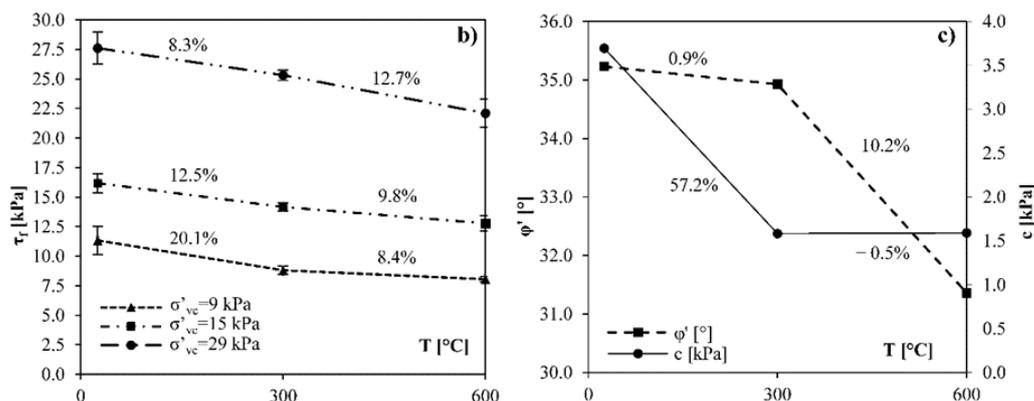


Fig 3. (a) Andamento dello sforzo di taglio a diverse temperature di esposizione, con indicazione delle variazioni percentuali relative dopo MFT300 e MFT600. (b) Andamenti dell'angolo di resistenza al taglio ( $\phi'$ ) e della coesione totale (c) con la temperatura di esposizione (modificato da Peduto et al., 2022).

Riguardo alle proprietà idrauliche dei campioni testati, con riferimento alla curva di ritenzione del campione UB-6, i risultati delle prove in edometro a suzione controllata hanno rivelato per bassi livelli di suzione di matrice (Fig. 4): (i) una diminuzione della capacità di ritenzione idrica per il campione MFT600-11; (ii) nessuna variazione significativa per il campione B1-5; (iii) un aumento della capacità di ritenzione idrica per il campione B3-6. Le principali differenze tra la curva del campione MFT600-11 e quelle dei campioni di terreno non trattati termicamente sono state riscontrate a livelli di suzione bassi (0÷7 kPa). Questo risultato è in linea con quanto trovato da Stoof (2010), che individua gli effetti più significativi della combustione/riscaldamento a bassi livelli di suzione tra 0 e 10 kPa. In particolare, il campione MFT600-11 ha esibito, a seguito del relativo trattamento termico, una perdita di peso dovuta principalmente alla combustione di sostanza organica, con conseguente aumento della compattazione del suolo. Da letteratura (e.g., Stoof, 2010) è noto che all'aumentare del contenuto di sostanza organica aumenta la capacità del suolo di trattenere l'acqua. Di contro, la compattazione aumenta la densità apparente e riduce il volume totale dei pori del terreno, riducendo la capacità di trattenere l'acqua da parte del suolo. Comportamenti diversi sono stati trovati per i campioni di terreno non trattati termicamente, caratterizzati da valori di  $G_s$  più bassi, da maggiori porosità, da un maggiore contenuto di sostanza organica e, di conseguenza, da una maggiore capacità di ritenere acqua ai diversi livelli di suzioni investigate rispetto al campione MFT600-11. Pertanto, l'andamento delle curve di

ritenzione dei campioni B1-5 e B3-6 è condizionato dalla presenza di residui dell'incendio nei campioni, prodotti e poi depositatisi nel profilo superficiale del suolo a seguito di eventi meteorici intensi. Il campione B3-6 è caratterizzato da una maggiore capacità di ritenzione idrica rispetto al campione B1-5; ciò è probabilmente determinato in parte dalla deposizione di residui dell'incendio e in parte dal parziale ripristino dell'apparato radicale, il cui contributo coesivo non è tuttavia ripristinato.

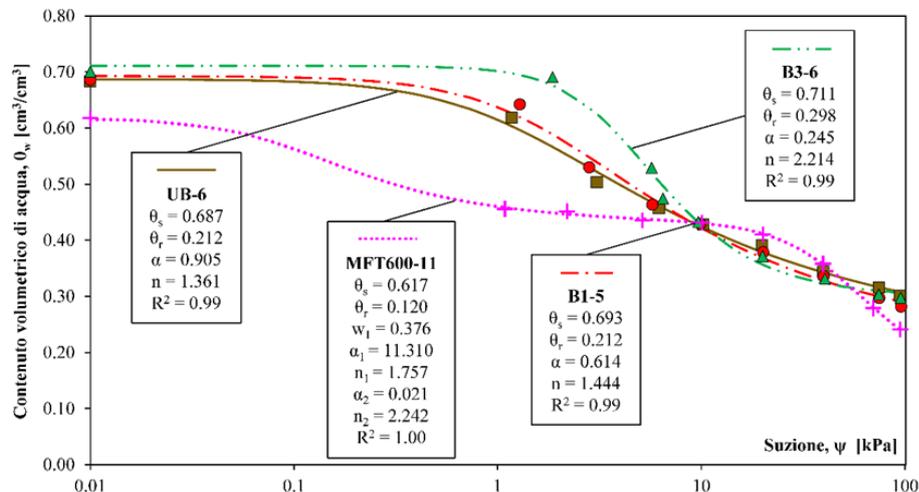


Fig. 4. Curve di ritenzione idrica dei campioni di terreno analizzati. Modelli di van Genuchten e Durner per i campioni UB-6, B1-5, B3-6 e MFT600-11, rispettivamente (modificato da Peduto et al., 2022).

#### 4. Conclusioni

Lo studio dell'evoluzione delle proprietà del suolo colpito dal fuoco assume un ruolo centrale per la comprensione del meccanismo di innesco di colate detritiche e di frane superficiali in aree incendiate, nonché per la modellazione della relativa pericolosità, in considerazione della scarsità di dati reperibili in letteratura sull'argomento. Inoltre, per terreni di origine piroclastica, in condizioni sature, venendo a mancare il contributo coesivo esercitato dalla suzione di matrice, risulta spesso decisivo il contributo di coesione aggiuntiva fornito dagli apparati radicali presenti, al fine di prevenire il distacco e la mobilitazione di massa. L'azione di combustione delle radici esercitata dal fuoco, sia nella condizione incendio naturale che di laboratorio, causa una riduzione di tale contributo, incrementando la possibilità di distacco superficiale di massa in occasione di eventi di pioggia particolarmente intensi.

#### Bibliografia

- Esposito, G.; Matano, F.; Molisso, F.; Ruoppolo, G.; Di Benedetto, A.; Sacchi, M. Post-fire erosion response in a watershed mantled by volcaniclastic deposits, Sarno Mountains, Southern Italy. *Catena* **2017**, *152*, 227–241
- González-Pérez, J.A.; González-Vila, F.J.; Almendros, G.; Knicker, H. The effect of fire on soil organic matter – a review. *Environment International* **2004**, *30*, 855-870. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.003>
- Lei, M.; Cui, Y.; Ni, J.; Zhang, G.; Li, Y.; Wang, H.; Liu, D.; Yi, S.; Jin, W.; Zhou, L. Temporal evolution of the hydromechanical properties of soil-root systems in a forest fire in China. *Sci. Total Environ.* **2021**, *809*, 151165. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151165>.
- Peduto, D.; Iervolino, L.; Foresta, V. Experimental Analysis of the Fire-Induced Effects on the Physical, Mechanical, and Hydraulic Properties of Sloping Pyroclastic Soils. *Geosciences* **2022**, *12*, 198. <https://doi.org/10.3390/geosciences12050198>
- Rengers, F.K.; McGuire, L.A.; Oakley, N.S.; Kean, J.W.; Staley, D.M.; Tang, H. Landslides after wildfire: Initiation, magnitude, and mobility. *Landslides* **2020**, *17*, 2631–2641. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01506-3>.
- Stoof, C. Fire Effects on Soil and Hydrology. Ph.D. Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, **2015**.
- Ulery, A.L.; Graham, R.C. Forest Fire Effects on Soil Color and Texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **1993**, *57*, 135.