

## ***INFLUENZA DELLE CONDIZIONI METEOROLOGICHE SUL REGIME IDRICO DI UN PENDIO DI TERRENI PARZIALMENTE SATURI***

M. Pirone, M. V. Nicotera, R. Papa, G. Urciuoli

*Dipartimento di Ingegneria Idraulica Geotecnica ed Ambientale, Università degli Studi di  
Napoli Federico II*

[mariana.pirone@unina.it](mailto:mariana.pirone@unina.it); [nicotera@unina.it](mailto:nicotera@unina.it); [rafpapa@unina.it](mailto:rafpapa@unina.it); [gianurci@unina.it](mailto:gianurci@unina.it).

### **Sommario**

I meccanismi di innesco delle colate di fango in terreni parzialmente saturi sono fenomeni di estrema complessità, in quanto le masse di terreno coinvolte sono soggette a condizioni idrauliche al contorno variabili nello spazio, in ragione delle condizioni morfologiche e stratigrafiche locali, e nel tempo, in funzione delle condizioni climatiche. A quest'ultimo tema è dedicata la presente nota, in cui l'influenza delle condizioni meteorologiche sul regime idrico di un pendio di terreni parzialmente saturi è analizzata sulla base dei risultati del monitoraggio condotto nel campo sperimentale di Monteforte Irpino (AV), già documentato in letteratura (Evangelista et al., 2008; Papa et al., 2009; Pirone et al., 2010). Dall'analisi delle serie temporali delle misure in sito è stato possibile identificare l'influenza delle condizioni meteorologiche sul regime idrico del pendio, individuando l'andamento stagionale delle grandezze idrauliche nel sottosuolo e l'influenza che su di esse hanno i singoli eventi di pioggia. L'elaborazione dei dati ha permesso di calcolare i flussi e il bilancio d'acqua nel sottosuolo.

### **Introduzione**

Le coperture piroclastiche presenti sui rilievi carbonatici della Campania sono spesso interessate da fenomeni di instabilità di tipo scorrimento-colata di fango che coinvolgono la parte più superficiale dei depositi formati dai prodotti dell'attività eruttiva dei distretti vulcanici dei Campi Flegrei e del Somma Vesuvio. Le condizioni di stabilità di queste coltri sono sostanzialmente dipendenti dalle condizioni atmosferiche: in particolare dall'intensità e dalla distribuzione temporale delle piogge e dalla conseguente infiltrazione di acqua piovana. Pertanto, ai fini della comprensione del meccanismo di innesco, è essenziale la quantificazione degli effetti delle precipitazioni. In questo contesto è in corso, da più di quattro anni, il monitoraggio del sito sperimentale di Monteforte Irpino (AV). Nel seguito sono illustrati i principali risultati del monitoraggio ed è analizzata l'influenza delle condizioni meteorologiche sul regime idrico nel sottosuolo. Inoltre è descritta la procedura con cui le numerose misure disponibili sono state impiegate nel bilancio idrico del campo sperimentale.

### **Il campo sperimentale di Monteforte Irpino (AV)**

Il campo sperimentale è ubicato sul versante occidentale del rilievo calcareo di Monte Faggeto, ad una distanza di circa 40 km in direzione nord-ovest dall'edificio vulcanico del Somma - Vesuvio. Una descrizione dettagliata sia degli aspetti stratigrafici - morfologici sia della strumentazione installata è riportata in: Papa, 2007, Evangelista et al., 2008, Pirone, 2009. Il profilo stratigrafico semplificato del sito e gli strumenti installati lungo la verticale sono riportati in figura 1. Il sistema di monitoraggio è stato progettato e realizzato per misurare la suzione ed il contenuto d'acqua nella coltre piroclastica, nonché i dati climatici

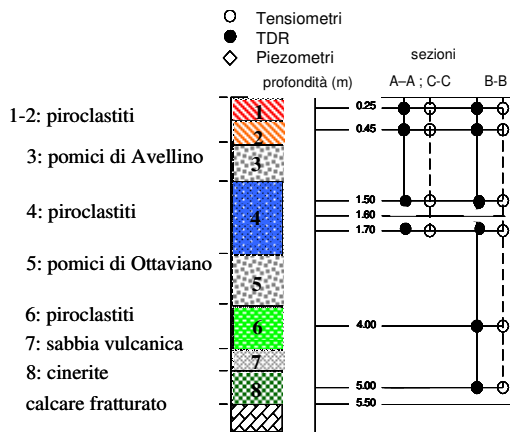


Figura 1. Profilo stratigrafico medio e strumentazione installata

del sito (altezze di pioggia, umidità relativa e temperatura dell'aria, velocità e direzione del vento, radiazione netta). La presenza di due strati pomicei (3 e 5) ha suggerito di suddividere la coltre in tre porzioni da essi delimitate: superficiale (1 e 2), intermedia (4) e profonda (6, 7 e 8) (fig. 1).

**Risultati del monitoraggio**

In figura 2a sono riportate le altezze di pioggia registrate dalla stazione di Monteforte Irpino a partire dal mese di aprile 2008 e quelle registrate dalla stazione installata in sito a partire dal mese di giugno 2009. Le piogge registrate dalle due stazioni sono confrontabili, tuttavia qualche evento autunnale registrato dalla stazione di Monteforte risulta maggiore del 10-15%. Le piogge più intense si verificano nel mese di ottobre, raggiungendo talvolta un'intensità superiore ad 80 mm/giorno. Dall'osservazione delle misure si evince che la stagione umida si protrae dal mese di ottobre fino al mese di maggio, con piogge meno intense, ma più frequenti e di maggiore durata nei mesi di gennaio e febbraio. Nelle figure 2b e 2c sono riportati i valori di suzione e di contenuto d'acqua calcolati come media delle misure raccolte in ciascuno strato lungo la sezione longitudinale centrale del campo. Le due grandezze presentano un chiaro andamento stagionale alle diverse profondità investigate; i singoli eventi piovosi talvolta perturbano l'andamento ciclico stagionale soltanto nei terreni superficiali, con variazioni di suzione e di contenuto d'acqua notevolmente meno significative di quelle stagionali. L'andamento alla scala annuale è ciclico in tutti i terreni, ma l'ampiezza delle oscillazioni decresce con la profondità ed è sfasata. In funzione dei fattori climatici possono essere individuati tre periodi: 1) *umido*, da gennaio ad aprile-maggio: la suzione e il contenuto d'acqua a tutte le profondità si mantengono pressoché costanti; 2) *secco*, da giugno a settembre: la suzione aumenta e il contenuto d'acqua decresce, fino al raggiungimento dei valori rispettivamente massimo e minimo; 3) *di transizione*, da ottobre a dicembre: la suzione dal valore massimo decresce e il contenuto d'acqua dal valore minimo cresce fino a quando, entrambi, non si attestano ai valori costanti caratteristici del periodo umido. I valori minimi e massimi annuali di suzione e di contenuto d'acqua in ciascun terreno sono riportati in tabella 1. I valori massimi di suzione registrati nei terreni superficiali nei mesi di luglio e agosto superano i 70 kPa ma in questo caso le misure non sono affidabili a causa della desaturazione degli strumenti. In figura 2d è riportato il grado di saturazione calcolato in tutti i terreni a partire dalle misure del contenuto d'acqua e della porosità media determinata in laboratorio (Papa, 2007). L'andamento è ovviamente simile a quello del contenuto d'acqua. In particolare nei terreni superficiali il grado di saturazione oscilla dal 20%

Tabella 1. Valori massimi e minimi annuali di suzione e contenuto d'acqua

		suzione min. (kPa)	cont.d'acqua max	giorno di misura	suzione max. (kPa)	cont.d'acqua min.	giorno di misura
1	2008	-	-	-	69	0.15	18-ago
	2009	2.88	0.33	5-gen	70	0.17	30-lug
	2010	3	0.38	7-feb	52	0.17	04-set
2	2008	-	-	-	60	0.18	18-ago
	2009	4.57	0.4	5-gen	-	0.23	30-lug
	2010	3.5	0.41	7-feb	50	0.23	04-set
4	2008	-	-	-	34.5	0.35	23-nov
	2009	4.5	0.48	29-gen	36	0.34	24-ott
	2010	5	0.5	27-feb	26	0.38	13-ott
6	2008	-	-	-	21.5	0.46	03-dic
	2009	4.55	0.56	29-gen	19	0.49	27-nov
	2010	5	0.55	27-feb	14	0.49	06-nov
8	2008	-	-	-	16.5	0.26	03-dic
	2009	2	0.33	29-gen	12.38	0.30	27-nov
	2010	2.76	0.31	27-feb	10.31	0.28	06-nov

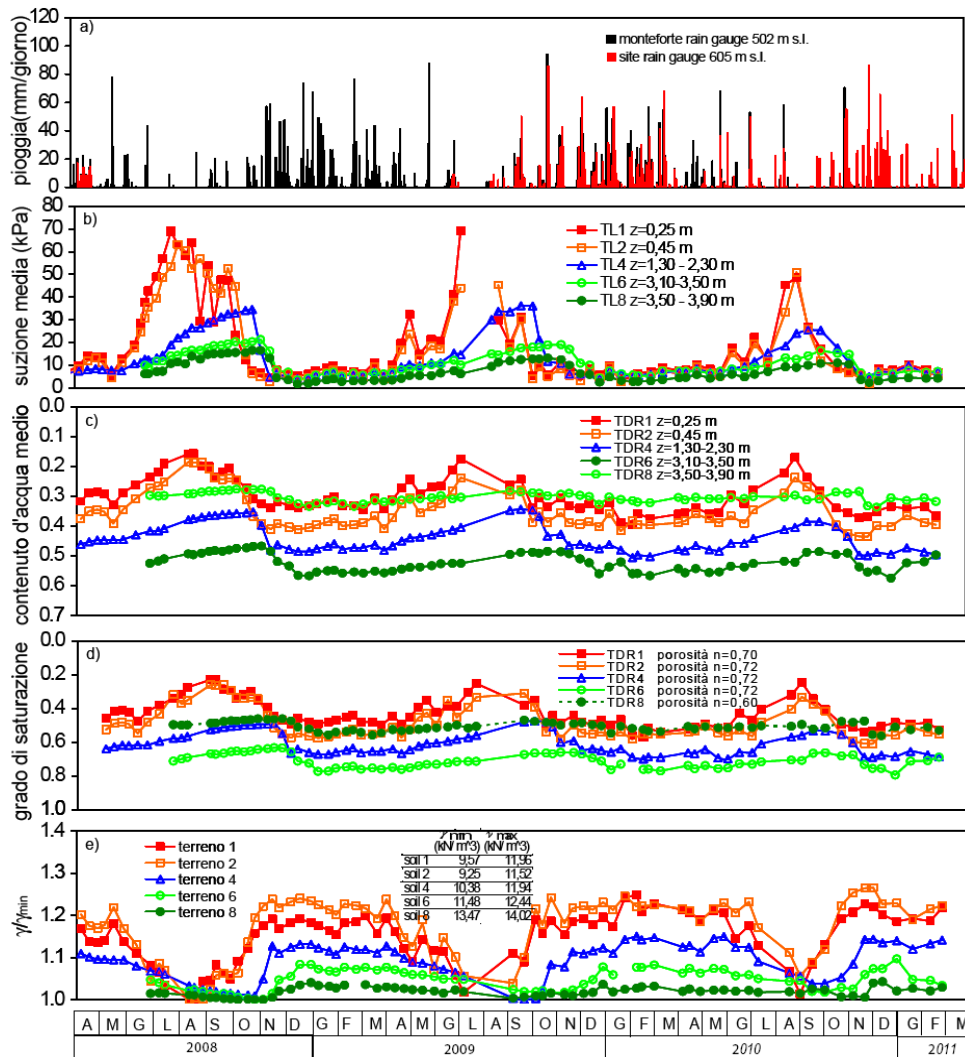


Figura 2. Risultati del monitoraggio: a) piogge registrate dalla stazione di Monteforte Irpino e da quella in sito; b) suzione, c) contenuto d'acqua, d) grado di saturazione, e) rapporto tra  $\gamma/\gamma_{min}$  mediati in ciascuno strato lungo la sezione centrale del campo prove

al 60%; nel terreno 4 dal 50% al 70%; nel terreno 6 dal 60 all'80%; nel terreno 8 oscilla intorno al 50%. In figura 2e è riportato il rapporto tra il valore corrente del peso nell'unità di volume del terreno, calcolato in funzione delle misure di contenuto d'acqua, e il valore minimo annuale. Nei periodi umidi  $\gamma$  aumenta (rispetto al valore minimo calcolato in estate) del 20% nei terreni superficiali, del 15% in quelli intermedi, del 5÷10% nei terreni profondi.

### Elaborazione dei dati: analisi del regime idrico nel sottosuolo

#### Direzione ed intensità dei flussi d'acqua nel sottosuolo

Le isopieziche e le direzioni dei flussi d'acqua lungo la sezione centrale del campo sperimentale sono state determinate con una procedura di interpolazione dei carichi idraulici noti in corrispondenza dei punti di misura. In figura 3a sono riportate le direzioni dei vettori di flusso mediate in ciascuno strato. Nei mesi da gennaio ad aprile il flusso è verticale e diretto verso il basso in tutti i terreni, indicando dunque un processo d'infiltrazione pressoché monodimensionale. A partire dalle misure di suzione e contenuto d'acqua lungo la sezione centrale del campo, sono stati calcolati i flussi istantanei e cumulati che attraversano verticalmente i terreni superficiali, intermedi e profondi. I gradienti verticali sono stati

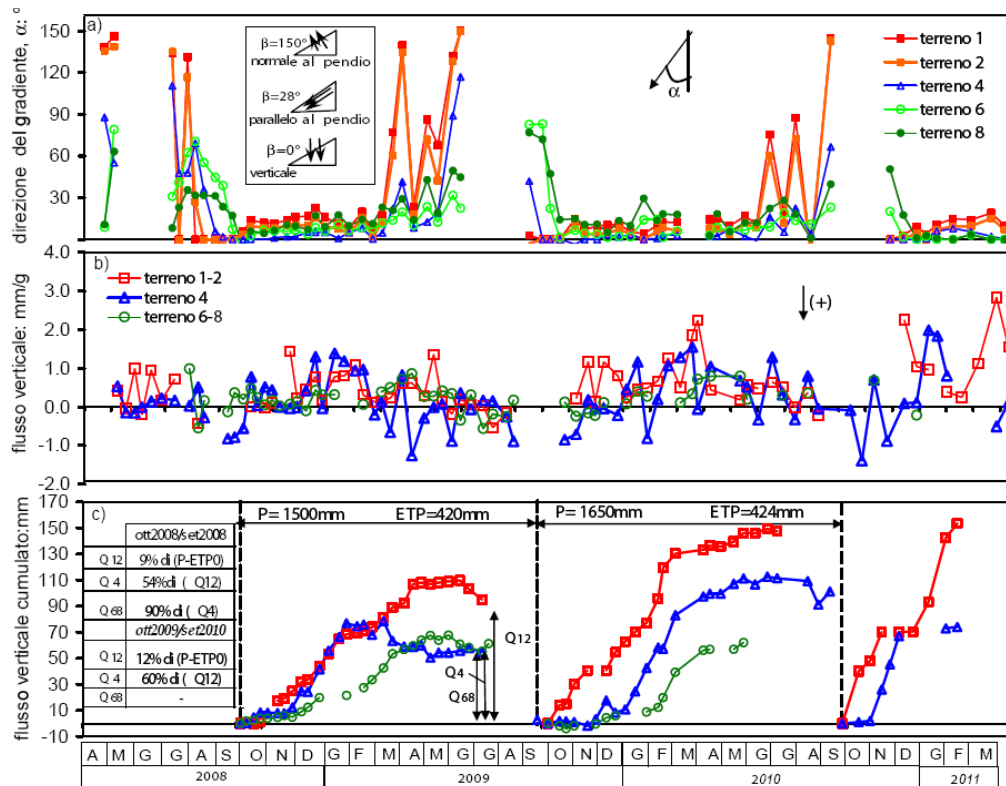


Figura 3. Elaborazione delle misure: a) direzione media del flusso idrico in ogni strato; b) flussi verticali istantanei e c) cumulati da ottobre a luglio mediati lungo la sezione centrale del campo

calcolati a partire dalle suzioni misurate; la permeabilità, assunta omogenea ed isotropa, è stata calcolata utilizzando la relazione non isteretica di Mualem Van - Genuchten in funzione delle misure di contenuto d'acqua eseguite in sito (vedi Pirone et al., 2010). Quindi è stata calcolata la media integrale dei flussi istantanei verticali, mediante la legge di Darcy, lungo la sezione centrale del campo; i valori corrispondenti sono riportati in figura 3b, positivi se diretti verso il basso. I flussi che attraversano i terreni superficiali sono dell'ordine di 1÷2 mm/giorno nella stagione umida e di 0.5÷1 mm/giorno in quella secca, i flussi che attraversano la coltre intermedia sono dell'ordine di 1 mm/giorno sia d'estate sia d'inverno. Il flusso che attraversa verticalmente i terreni profondi è sempre minore di 1 mm/giorno ed è caratterizzato da una componente verticale rivolta sempre verso il basso. In figura 3c sono riportati i flussi cumulati in tutti gli strati su due anni idrologici: da ottobre 2008 a luglio 2009 e da ottobre 2009 a luglio 2010. La quantità di acqua che attraversa verticalmente gli strati superficiali è il 10% della pioggia, al netto dell'evapotraspirazione potenziale calcolata tramite la formula di Penmann - Monteith in funzione della misura delle variabili climatiche. Naturalmente questa percentuale non rappresenta la quantità che s'infiltra, costituita anche dall'incremento di volume d'acqua nei primi 25 cm e dalla parte che questo strato restituisce all'atmosfera attraverso l'evaporazione, ma solo quella che attraversa verticalmente lo strato di terreno al di sotto di 25 cm di profondità. Nella parte che non si infila sono compresi il ruscellamento e la quantità intercettata dalla vegetazione. Solo il 50÷60% dei flussi provenienti dai terreni superficiali attraversa lo strato intermedio; 90% di questa ultima aliquota prosegue verso il basso e viene smaltito dai terreni profondi nei calcari. Tuttavia è necessario sottolineare che, ritenendo le misure non affidabili durante il mese di agosto, i flussi sono stati cumulati fino al mese di luglio. Essi sono calcolati (per interpolazione lineare) tra due misure successive distanti circa 10 giorni, trascurando il possibile effetto di

eventi singolari fra le due misure; questo potrebbe comportare una sottostima dei flussi totali calcolati specialmente nei terreni superficiali in cui i singoli eventi di pioggia possono avere un'influenza non trascurabile.

### *Bilancio d'acqua nel sottosuolo*

Dal confronto tra la variazione del volume d'acqua di porosità,  $\Delta W_i$ , e i flussi verticali totali calcolati in ogni strato,  $Q_i$ , sono possibili alcune considerazioni sul bilancio d'acqua nel sottosuolo. La variazione di volume d'acqua (in una striscia del campo di lunghezza trasversale unitaria) è stata calcolata nelle tre porzioni di coltre integrando due volte le misure di contenuto d'acqua, lungo lo spessore di ciascuno strato e lungo lo sviluppo longitudinale del campo; questo volume è stato poi diviso per la lunghezza della sezione centrale del campo (figure 4a, c, e), esprimendo tali variazioni in colonna di acqua. L'andamento delle quantità così calcolate è ciclico, infatti a scala annuale l'incremento d'acqua nel periodo umido è completamente compensato dal decremento che si verifica nel periodo secco a causa dei fenomeni di evapotraspirazione. Poiché nelle pomici (strati 3 e 5) non sono installate sonde TDR, la variazione di volume d'acqua nello strato 3 è stata assunta pari alla differenza tra le componenti normali al pendio dei flussi totali che attraversano verticalmente i terreni superficiali ed intermedi, analogamente per le pomici dello strato 5 si è operata la differenza dei flussi che attraversano i terreni intermedi e profondi (figure. 4b, d). Nel periodo estivo, quando non sono disponibili i valori dei flussi cumulati, si è ritenuto che le variazioni di volume d'acqua negli strati pomicei fossero tali che nell'intero anno idrologico l'accumulo d'acqua fosse pari a zero, come di fatto si verifica negli altri terreni. Per ottenere i flussi cumulati sull'intero periodo monitorato (figure 4a, c, e) sono state formulate alcune ipotesi sulla direzione e sull'intensità dei flussi nel periodo estivo (si veda tabella 2) quando, cioè, le misure sono assenti o non sono significative. Il volume d'acqua in autunno aumenta in tutti gli strati per l'infiltrazione delle prime piogge, in inverno le variazioni sono modeste e l'acqua che si infila attraversa i vari strati fino a raggiungere i calcari. In tarda primavera ed in estate il volume d'acqua nei terreni 1, 2, 3 e 4 decresce a causa dei fenomeni di evapotraspirazione. Il volume d'acqua nel terreno 5 decresce durante la primavera e si incrementa in egual modo in autunno, restando invariato d'inverno. Nei terreni profondi il volume d'acqua decresce

durante l'estate e si incrementa in egual modo in autunno.

Tab.2. Direzione ed intensità del flusso assunto nel periodo estivo

terreni	Flussi verticali da Agosto a Settembre	
	direzione media	espressione del valore medio
1-2	negativo ( $\uparrow$ )	$\Delta Q_{12} = \Delta W_{12} + \Delta Q_3$
3	negativo ( $\uparrow$ )	$\Delta Q_3 = \Delta W_3 + \Delta Q_4$
4	negativo ( $\uparrow$ )	$\Delta Q_4 = \Delta W_4$
5	positivo ( $\downarrow$ )	$\Delta Q_5 = \Delta W_5$
6-8	positivo ( $\downarrow$ )	$\Delta Q_{68} = \Delta W_{68} + \Delta Q_5$

### **Conclusioni**

Le misure e le considerazioni proposte in questa nota consentono di definire alcuni caratteri tipici del regime idrico nei pendii costituiti da piroclastiti parzialmente sature, riassunti ai punti che seguono.

1) La suzione ed il contenuto di acqua nel sottosuolo hanno un andamento stagionale ciclico, regolato dai fattori atmosferici nel loro complesso. I singoli eventi di pioggia hanno un'influenza modesta, per altro solo nello strato superficiale.

2) La risposta idraulica del sottosuolo dipende essenzialmente dalla distanza del punto esaminato dal piano campagna, ossia dal bordo a cui è applicata la variazione di condizione idraulica al contorno. Le fluttuazioni di suzione e di contenuto d'acqua sono sensibili negli strati superficiali e decisamente minori in profondità. Soprattutto durante la stagione secca si osserva lo sfasamento temporale delle massime suzioni stagionali (e dei minimi contenuti d'acqua) attinte nei vari strati, in funzione della profondità.

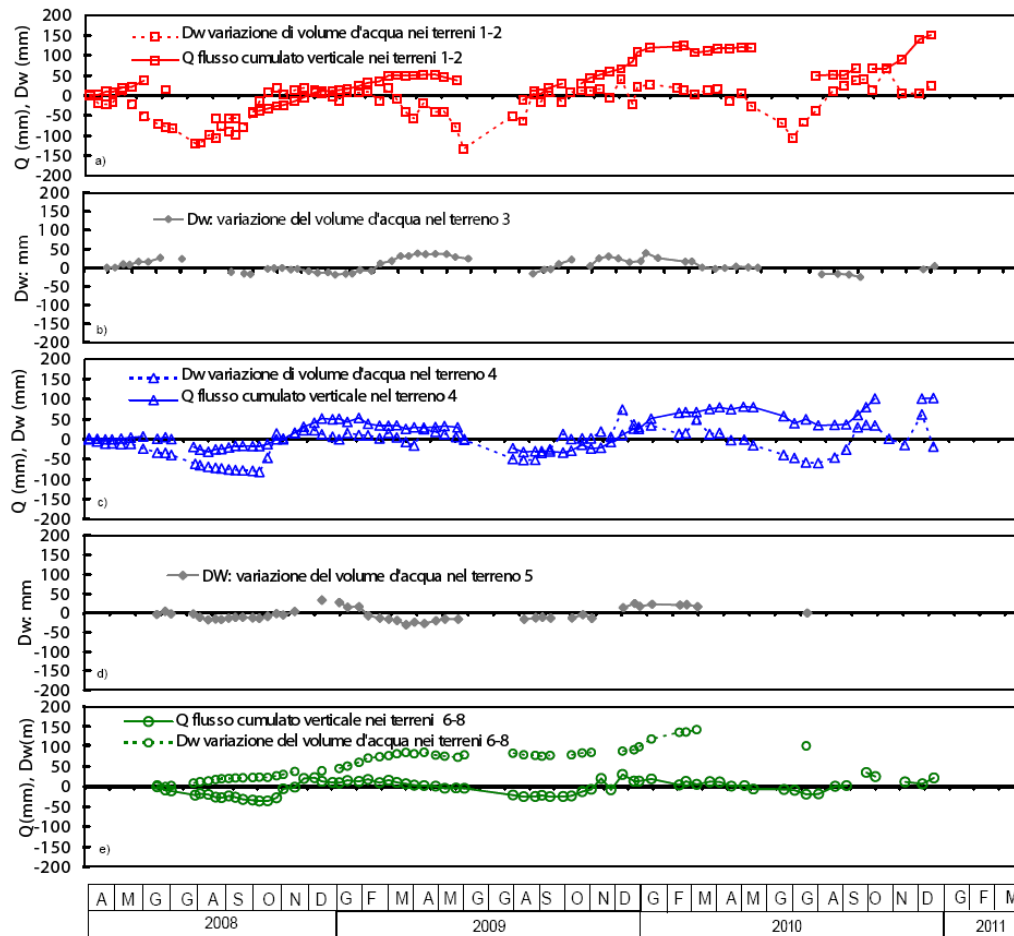


Figura 4. Bilancio d'acqua: a)-c)-e) Flussi cumulati medi lungo la sezione centrale B-B e volumi di acqua accumulati nello strato 1-2, 4, 6-8; b)-d) volumi d'acqua accumulati negli strati pomicei 3 e 5

3) Nel periodo umido il moto d'infiltrazione è pressoché unidimensionale e rivolto verso il basso, gran parte dell'acqua che si infila raggiunge i calcari di base. Sui dieci mesi per i quali le misure di suzione sono certamente affidabili i flussi cumulati entranti che attraversano verticalmente gli strati di terreno sono maggiori di quelli uscenti.

4) La variazione di contenuto d'acqua in tutti gli strati è in equilibrio, nel senso che dopo un anno si ristabiliscono i valori iniziali.

## Bibliografia

- Evangelista, A., Nicotera, M.V., Papa, R. & Urciuoli G. (2008). Field investigation on triggering mechanisms of fast landslides in unsaturated pyroclastic soils. *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering. 1st European Conference on Unsaturated soil*. Durham UK, Taylor & Francis Group plc (UK), pp. 909-915.
- Papa R. (2007). Indagine sperimentale di una copertura piroclastica di un versante della Campania. *Tesi di dottorato*. Università Federico II di Napoli.
- Papa, R., Pirone, M., Nicotera, M.V., Urciuoli, G. (2009). Meccanismo di innesco di colate di fango in piroclastiti parzialmente sature. *Proc. 1st Italian Workshop on Landslides: Rainfall induced landslides* (Picarelli L, Tommasi P, Urciuoli G, Versace P (eds)), vol.2, pp 91-105.
- Pirone, M. (2009). Analysis of slope failure mechanism in unsaturated pyroclastic soils, based on testing site monitoring. *PhD thesis*, Università Federico II di Napoli.
- Pirone, M., Papa, R., & Nicotera, M. V. (2010). Test site experience on mechanisms triggering mudflows in unsaturated pyroclastic soils in southern Italy. *Proc. 5<sup>th</sup> International Conference on Unsaturated Soils – Unsaturated Soils* (eds: Alonso & Gens ), Vol. 2, pp 1273-1278.