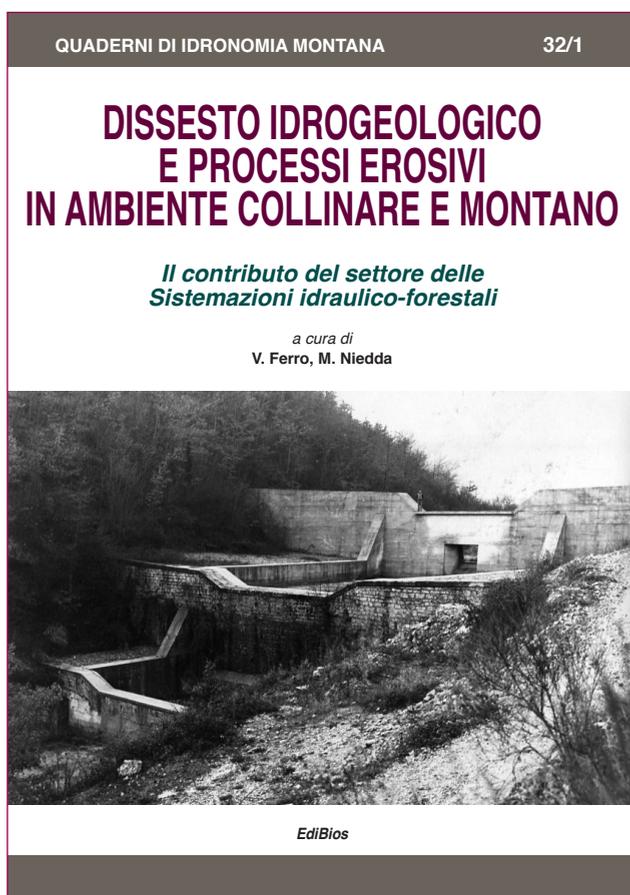


Schema sperimentale per la stima della conducibilità idraulica laterale alla scala di versante

*M. Pirastru, R. Marrosu, M. Niedda, M. Castellini,
F. Giadrossich, V. Bagarello, M. Iovino*

ESTRATTO



ISBN 978-88-97181-35-4

EdiBios

SCHEMA SPERIMENTALE PER LA STIMA DELLA CONDUCIBILITÀ IDRAULICA LATERALE ALLA SCALA DI VERSANTE

Experimental design to measure the lateral saturated hydraulic conductivity at the hillslope-scale

M. Pirastru*, R. Marrosu*, M. Niedda*, M. Castellini*, F. Giadrossich*, V. Bagarello**, M. Iovino**

Sommario

La conducibilità idraulica alla saturazione, K_S , è un parametro fondamentale per la simulazione del flusso idrico nel suolo. La memoria illustra un approccio sperimentale per la stima della K_S laterale alla scala di versante. La metodologia proposta è stata applicata in due aree contigue ricoperte, rispettivamente, da macchia mediterranea e prato. Sono stati registrati i livelli di falda e i deflussi idrici sottosuperficiali, e queste misure sono state usate per il calcolo della K_S del suolo tramite l'equazione di Darcy. Il monitoraggio è stato effettuato durante il periodo piovoso compreso tra gennaio e giugno 2014. In aprile, inoltre, sono state eseguite prove di pioggia artificiale con intensità di 30 e 70 mm h⁻¹. Durante le precipitazioni naturali, il valore massimo di K_S stimato nel prato è stato di 2870 mm h⁻¹, mentre è stato pari a 2400 mm h⁻¹ nel corso delle prove di saturazione artificiale. Il valore massimo di K_S pari 4000 mm h⁻¹ è stato ottenuto, nella macchia, durante le prove di pioggia artificiale. Per contro, valori minori di K_S sono stati ottenuti durante le piogge naturali a causa delle basse portate sottosuperficiali registrate. La metodologia proposta è risultata idonea per la stima di valori della conducibilità idraulica rappresentativi per le aree di interesse. Tali informazioni potranno garantire una maggiore attendibilità della modellizzazione dei processi idrologici a scala di versante e di bacino.

Summary

The soil hydraulic conductivity at the saturation, K_S , is a key factor for the hydrological simulation. In this paper, we present an experimental approach to estimate the lateral K_S at the hillslope-scale. The proposed methodology has been applied in two adjacent areas covered, respectively, by Mediterranean maquis and grass. The groundwater levels and the soil subsurface flow were recorded, and the measures were used for the calculation of K_S by the Darcy's law. The monitoring was carried out both under natural rainfall and during heavy rain artificial tests (30 and 70 mm h⁻¹). In the grassy soil the K_S of the saturated soil was 2870 mm h⁻¹ during the natural rainfall, and 2400 mm h⁻¹ during the artificial saturation. In the maquis soil, the maximum value of K_S in the saturated soil was 4000 mm h⁻¹, which was measured in the

* Dipartimento di Agraria, Università degli Studi di Sassari, viale Italia 39, mpirastru@uniss.it ; rmarrosu@uniss.it ; niedda@uniss.it ; mcastellini@uniss.it

** Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali, Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze, vincenzo.bagarello@unipa.it ; massimo.iovino@unipa.it

artificial rain tests. Lower values of K_S were obtained during the period of natural rainfall because of the low subsurface flow. The used methodology was suitable to calculate representative values of hydraulic conductivity for the areas of interest. The availability of this information will allow improved simulation of the hydrological processes at the hillslope and basin scale.

1. Introduzione

La conducibilità idraulica alla saturazione, K_S , è un parametro fondamentale per la simulazione del flusso idrico nel suolo. Nella letteratura scientifica sono state proposte e confrontate numerose metodologie per la determinazione della K_S dei suoli alla scala puntuale, quali ad esempio le prove a carico costante o variabile in laboratorio, oppure le misure con permeametri in campo. Esse diventano eccessivamente onerose quando, dovendo simulare processi idrologici che riguardano ampie superfici (versanti o bacini), occorre acquisire anche informazioni sulla variabilità spaziale della K_S . Per tale motivo nell'ambito della modellazione idrologica distribuita a scala di bacino, in cui l'unità minima di discretizzazione spaziale è nell'ordine della decina di metri, la K_S è spesso stimata attraverso procedure di calibrazione. Diversi autori (per es. Grayson et al., 1992; Chappell et al., 1998; Blain et al., 1991) hanno sottolineato come i valori calibrati sono spesso più elevati, anche di ordini di grandezza, rispetto a quelli misurati alla scala puntuale. Una motivazione è che le misure puntuali della K_S difficilmente riescono a catturare la complessa eterogeneità dei processi di flusso nel suolo, in particolare di quello che avviene nei macropori, i cui effetti si manifestano compiutamente ad una scala più ampia. Inoltre, numerosi autori (per es. Beven et al., 1995; Sherlok et al., 2000) hanno dimostrato che la sovrastima della K_S ottenuta per calibrazione può essere dovuta alla compensazione di errori commessi nella stima degli altri parametri idrologici del modello, nonché alle semplificazioni concettuali introdotte nel modello stesso. Pertanto, la coincidenza tra la scala di misura della K_S e quella di applicazione del modello idrologico è auspicabile per garantire la rappresentatività della simulazione matematica dei processi idrologici.

L'obiettivo di questa memoria è di illustrare i primi risultati ottenuti da una sperimentazione finalizzata alla stima della K_S laterale di versante il quale, spesso, rappresenta l'unità idrologica minima rappresentata nelle simulazioni idrologiche distribuite (Sherlok et al., 2000). Sono stati registrati i livelli di falda e i deflussi idrici sottosuperficiali del suolo, e le misure sono state usate per il calcolo della K_S tramite l'equazione di Darcy. L'attività sperimentale è stata svolta in un versante con presenza contigua di macchia mediterranea e di un prato. L'indagine comparativa consentirà di osservare le differenze nelle dinamiche idrologiche di versante dovute al diverso uso del suolo, e di stimare valori di K_S rappresentativi per le aree di interesse.

2. Materiali e metodi

2.1 Descrizione del sito sperimentale

Il sito sperimentale è localizzato in un versante del bacino idrografico del

lago di Baratz, nel nord-ovest della Sardegna (Fig. 1). Il clima è di tipo mediterraneo, semi-arido con inverni miti, estati calde ed un forte deficit idrico tra maggio a settembre. La temperatura e l'umidità media annue sono rispettivamente di 15.8 °C e di 78.7%; la precipitazione media annua è di 600 mm, distribuita tra l'autunno e la primavera. Il versante è esposto a nord-est, ha morfologia relativamente planare, ha una pendenza media del 30% ed elevazione media di 57 m s.l.m.. L'area di versante, lunga circa 60 m, è isolata idraulicamente a monte dalla profonda cunetta di una strada, mentre a valle è drenata dall'alveo

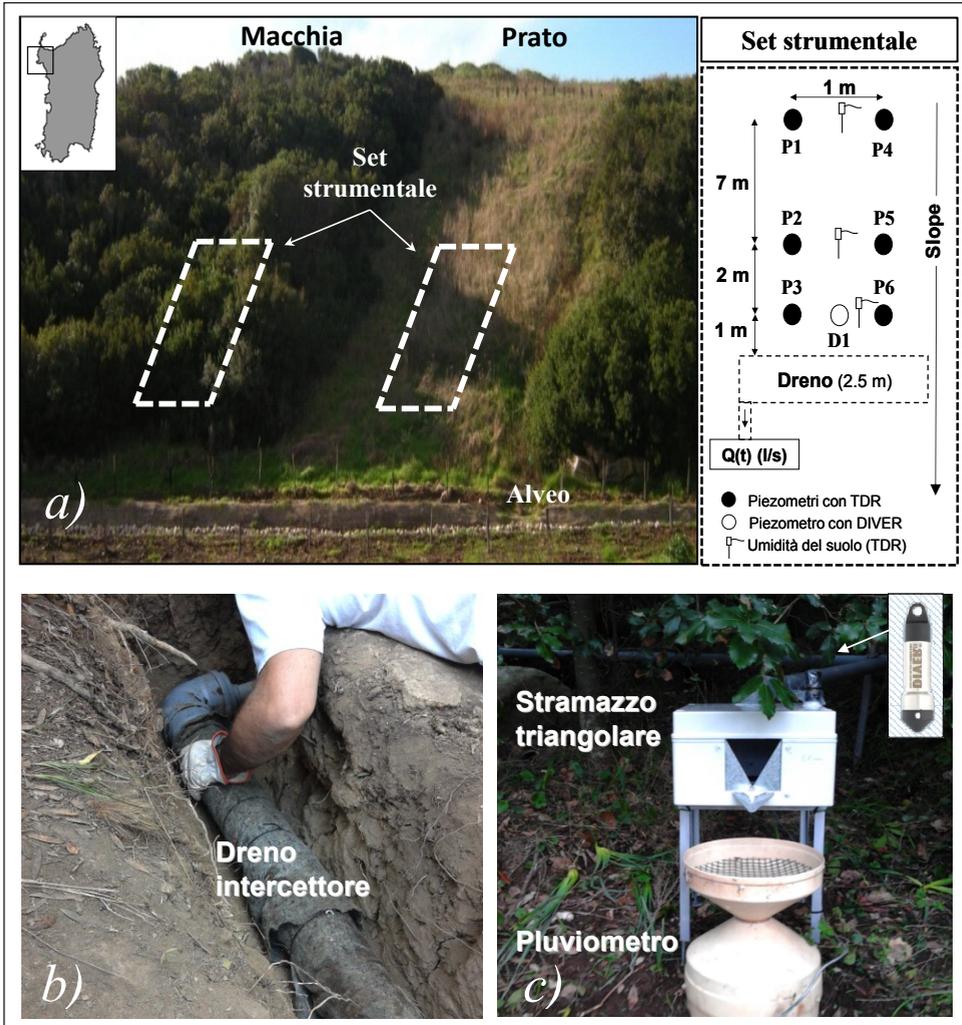


Fig. 1 – a) foto del versante sperimentale con evidenziata in tratteggio la localizzazione degli allestimenti strumentali, replicati nella macchia e nel prato, e schema della disposizione dei piezometri, delle sonde di umidità del suolo e del dreno in ciascun set sperimentale; b) foto della trincea drenante con disposizione del tubo-dreno e c) foto dell'apparato di misura dei deflussi sottosuperficiali

del corso d'acqua principale del bacino. Il suolo ha uno spessore variabile tra i 40 e 50 cm, classificato come franco-sabbioso (USDA). Il substrato pedologico è costituito da arenarie alterate del Permo-Triass poco permeabili. L'area sperimentale è caratterizzata da una copertura a macchia mediterranea, interrotta da una fascia destinata a prato larga 15 m. L'associazione floristica della macchia include le specie proprie di questa tipologia di vegetazione (es. *Myrtus communis* L., *Arbutus unedo* L., *Erica arborea* L., *Phyllirea latifolia* L., *Pistacia lentiscus* L., ecc.) che formano una copertura boschiva densa ed omogenea. L'area inerbita presenta un cotico erboso insediatosi successivamente ad interventi di disboscamento e aratura finalizzati alla creazione di una fascia tagliafuoco. Il contenuto medio in sostanza organica è del 12% sotto la macchia, e del 4.5% nel prato. La densità apparente media del suolo sotto la macchia è di 1260 kg m^{-3} , mentre nel suolo a prato è di 1590 kg m^{-3} . Nella macchia la conducibilità idrica alla saturazione del suolo, misurata con un permeometro ad anello singolo alle profondità di 10 cm e 20 cm, è stata di 1017 mm h^{-1} e 363 mm h^{-1} rispettivamente. Nel prato, alle stesse profondità, la conducibilità idrica alla saturazione è stata di 139 mm h^{-1} e 94 mm h^{-1} (Pirastru et al., 2013).

2.2 Schema di monitoraggio ambientale

Nel gennaio del 2014 sono stati realizzati due gruppi identici di monitoraggio, uno sotto la macchia, e l'altro nel prato (Fig. 1a). Ogni gruppo è costituito da una trincea drenante per l'intercettazione del deflusso idrico sottosuperficiale (Fig. 1b), da una rete di piezometri per la misura dei livelli di falda, e da sonde TDR per la stima dell'umidità del suolo. La trincea, lunga 2.5 m, larga 0.4 m e profonda circa 0.5 m è stata scavata alla base del pendio. I volumi idrici drenati sono captati da un tubo fessurato messo in opera sul fondo della trincea e trasferiti in un apparato di misura composto da una vasca con uno stramazzo triangolare e da un pluviometro (Fig. 1c). Lo stramazzo, dotato di un trasduttore di pressione (mini-Diver) per la misura del tirante idrico, fornisce la stima dei deflussi sottosuperficiali fino ad un limite inferiore di portata di 0.4 l s^{-1} . Per valori minori, la misure del deflusso idrico è affidata al pluviometro.

Le fluttuazioni della falda ipodermica sono state monitorate in una rete di sette piezometri collocati a diversa quota lungo il pendio, come illustrato in Fig. 1. La loro installazione è avvenuta mediante trivellazione manuale del suolo fino al sottostante substrato poco permeabile. I livelli idrici nei piezometri da P1 a P6 sono stati misurati mediante sonde TDR (modello CS616 della Campbell Sci., guide d'onda lunghe 30 cm). Nel settimo piezometro (D1) la misura è stata effettuata con un trasduttore di pressione. Una apposita sperimentazione di laboratorio è stata realizzata per calibrare le sonde TDR allo scopo di impiegarle come misuratori idrometrici. Durante la sperimentazione una sonda TDR disposta verticalmente è stata parzialmente sommersa utilizzando differenti battenti idrici.

È stata in tal modo individuata una relazione funzionale (Fig. 2) fra l'output strumentale (μs) e la percentuale di sommersione delle guide d'onda della

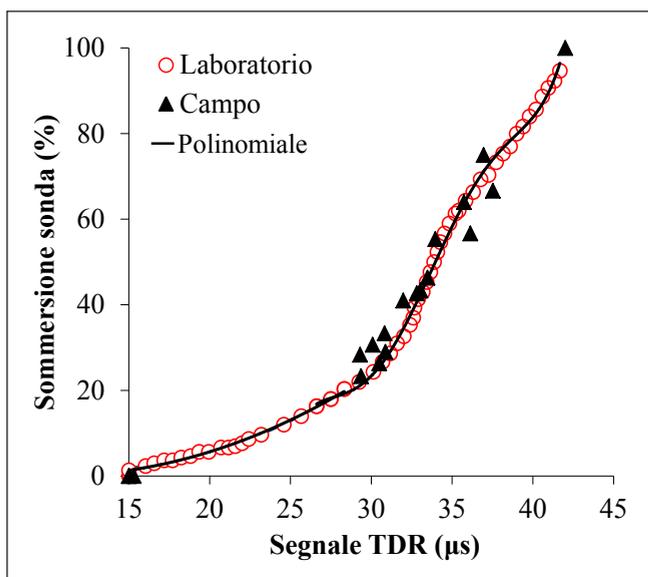


Fig. 2 – Curva di calibrazione delle sonde TDR per la misura dei livelli di falda

sonda. La validità di tale relazione, espressa nella forma di funzione polinomiale, è stata in seguito verificata in campo mediante misure idrometriche manuali. Lo scarto tra il valore di livello idrico stimato mediante la curva di calibrazione e quello osservato in campo è stato mediamente di 1 cm.

Lo schema di monitoraggio è completato da tre sonde TDR inserite verticalmente nel terreno per la misura delle variazioni d'umidità a differenti quote nel versante. Tutte le misure automatiche sono state effettuate ogni 5 minuti e memorizzate da un datalogger CR1000. Le restanti grandezze idrologiche (precipitazione, temperatura, umidità dell'aria, pressione barometrica) sono registrate con lo stesso passo temporale da una stazione meteorologica sita nelle immediate vicinanze dell'area sperimentale.

2.3 Prove di saturazione artificiale del suolo

Nella primavera del 2014, al fine di valutare la risposta idrologica del versante in occasione di piogge molto intense, sono state condotte delle prove di saturazione artificiale dei suoli. Tali prove sono state realizzate nella macchia e nel prato in parcelle sperimentali della lunghezza di 10 m e larghe 7 m poste immediatamente a monte della trincea drenante, e comprendenti la rete dei piezometri. L'acqua è stata somministrata per aspersione sottochioma garantendo una distribuzione uniforme della pioggia sulla parcella. Una prima prova di irrigazione è stata effettuata nella macchia l'1 aprile, con intensità di pioggia di 30 mm/h ed una durata di 2.75 ore. Il 3 aprile sono state effettuate in successione altre due prove, una nella macchia e l'altra nella fascia inerbita, aventi ciascuna una intensità di pioggia di 70 mm/h e una durata di 2.5 ore.

2.4 Metodologia di calcolo della K_S

Il metodo di calcolo della K_S laterale è basato sulla soluzione proposta da Childs (1971), applicata ad una falda freatica che fluisce sopra un piano impermeabile inclinato verso un opera di captazione normale alla direzione di flusso.

Introducendo le ipotesi semplificative di Dupuit (linee di flusso parallele al letto impermeabile e gradiente idraulico pari alla pendenza della superficie piezometrica), e trascurando il flusso laterale nella zona non satura, la portata filtrata q ($L^2 T^{-1}$) per unità di lunghezza del dreno può essere espressa tramite la legge di Darcy:

$$q(T) = K_s \cdot T \cdot \left(\frac{dZ}{ds} \right) \quad (1)$$

dove T (L) è lo spessore di suolo saturo, s (L) è la distanza percorsa dal flusso lungo il piano inclinato, e Z (L) è il carico piezometrico misurato rispetto ad un piano di riferimento orizzontale. Nel presente studio q , T e dZ/ds sono misurati in campo, o dedotti geometricamente, cosicché l'equazione (1) è direttamente risolvibile. La K_S così determinata assume il significato di valore medio di conducibilità idrica per lo spessore di suolo saturo.

3. Risultati

3.1 Livelli della falda e portate drenate

La precipitazione, i livelli di falda e i deflussi sottosuperficiali drenati, illustrati in figura 3, sono stati monitorati nel suolo a macchia e nel prato per il periodo intercorso tra gennaio e giugno 2014. Nel prato si è osservata una rapida risposta della falda alle precipitazioni. I livelli di falda sono risultati sempre più superficiali alla quota media del versante dove, in corrispondenza degli eventi di pioggia più intensi, sono risaliti fino a quasi intercettare la superficie topografica. Per contro, i livelli più bassi sono stati osservati nei piezometri posizionati alla quota più bassa, probabilmente perché essi risentono della vicinanza del dreno. A differenza del prato, nella macchia la falda raramente ha risposto agli eventi meteorici. I livelli più alti si sono registrati nei piezometri posti a quota intermedia, ma in nessun caso sono state raggiunte altezze prossime alla superficie del suolo. La debole risposta agli eventi meteorici osservata nella macchia è stata attribuita all'elevato grado di intercettazione fogliare che, nel clima semiarido mediterraneo, può determinare una significativa riduzione di apporto idrico al suolo (Llorens e Domingo, 2007).

L'andamento del deflusso sottosuperficiale misurato al dreno è risultato concordante con l'andamento delle altezze di falda, con una risposta rapida alle precipitazioni nel prato, ed un limitato numero di eventi di deflusso osservati nella macchia (Fig. 3e, 3f). In condizioni di pioggia naturale, nel prato la portata massima di 0.19 l s^{-1} è stata raggiunta durante l'evento del 9 febbraio, mentre nella macchia la portata massima è stata di 0.02 l s^{-1} , registrata il 27 marzo.

Durante le prove di saturazione artificiale, nei due suoli sono state osservate

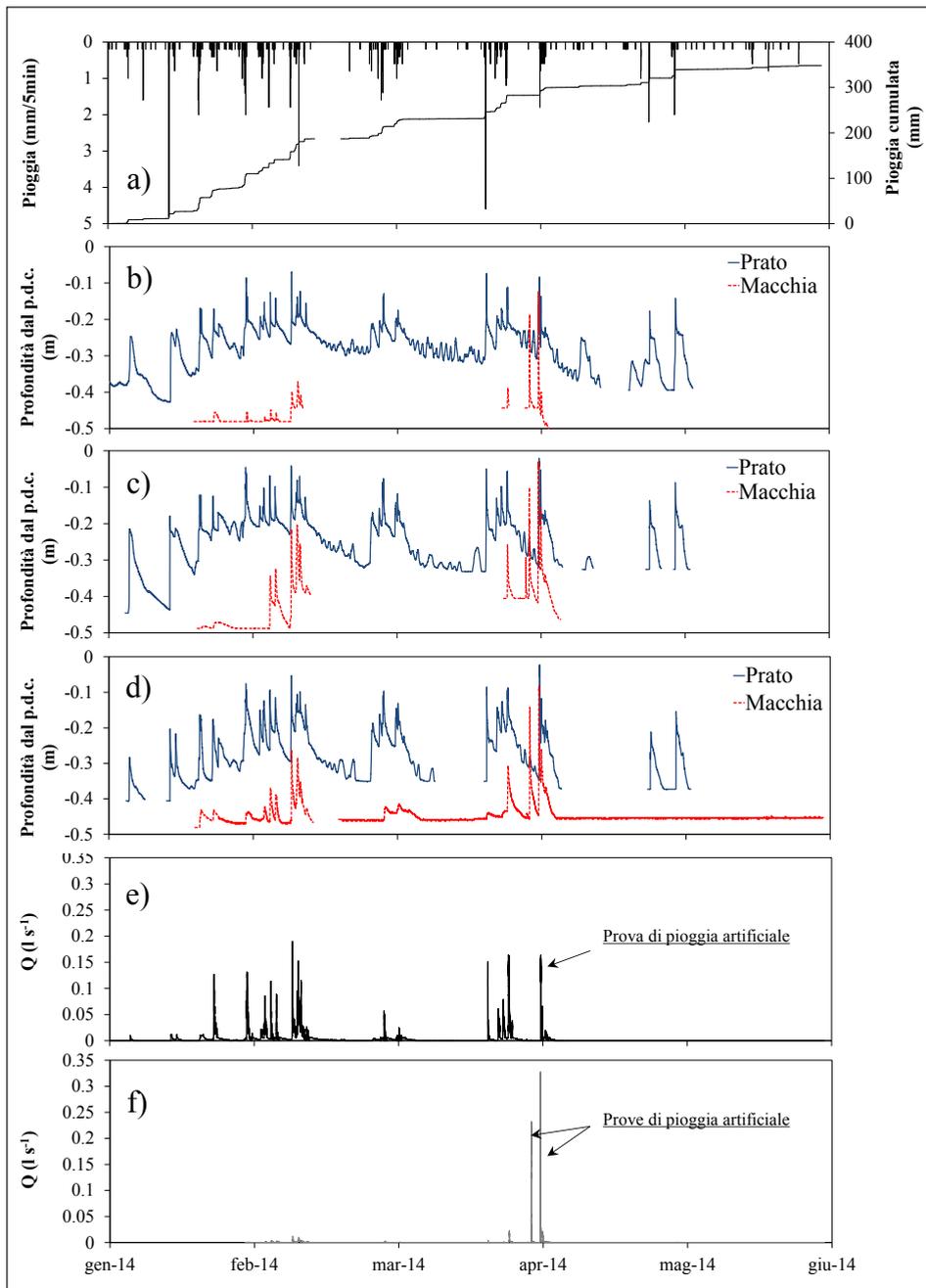


Fig. 3 – (a) Dato osservato di precipitazione; profondità della falda osservata nella macchia e nel prato nei piezometri: (b) profondità media tra P1 e P4, (c) profondità media tra P2 e P5, (d) profondità media tra P3 e P6; deflusso sottosuperficiale drenato (e) nel prato e (f) nella macchia

diverse risposte idrologiche. Come si può osservare in figura 4, nella prova del 3 aprile è stata misurata nel prato la portata massima di 0.16 l s^{-1} , minore di quella massima osservata in condizioni di pioggia naturale. Questo nonostante che durante la prova di saturazione artificiale siano stati registrati livelli più alti di falda. Nella macchia, nel corso della prova del 1 aprile è stata raggiunta la portata massima di 0.22 l s^{-1} , mentre il 3 aprile la massima portata è stata di 0.33 l s^{-1} . Comparando la risposta dei suoli in occasione delle prove del 3 aprile, si può notare che nel suolo a prato il deflusso si origina in anticipo rispetto alla macchia, ed anche la fase stazionaria delle portate viene raggiunta prima. Una volta sospesa l'irrigazione, nel prato le portate rimangono pressoché stabili per circa 10 minuti, prima di iniziare a decrescere. Al contrario, nella macchia la riduzione delle portate è praticamente contemporanea all'arresto dell'apporto idrico artificiale.

Nelle figure 5a e 5b è riportata la relazione fra i livelli di falda misurati e le portate drenate, sia in condizioni di pioggia naturale che durante le prove di saturazione artificiale. Nel prato si è osservata una scarsa risposta delle portate al crescere dei livelli idrici fino alla profondità di 0.2 m dal piano di campagna. Successivamente, quando la falda ha interessato lo strato di suolo superficiale il deflusso drenato è aumentato significativamente. Lo stesso comportamento a soglia è stato riscontrato anche nella macchia, con la differenza che le portate sono cresciute significativamente quando i livelli di falda sono risaliti oltre la profondità di 0.3 m. Tale comportamento osservato nei due suoli è probabilmente legato all'estensione della zona di sviluppo radicale, la quale risulta più superficiale nel prato rispetto alla macchia.

3.2 Conducibilità laterale saturata

I valori di K_S alla scala di versante sono stati determinati risolvendo l'equazione (1). Per l'esecuzione dei calcoli la portata q utilizzata è quella misurata al dreno, lo spessore saturo T è calcolato come media aritmetica dei livelli di falda

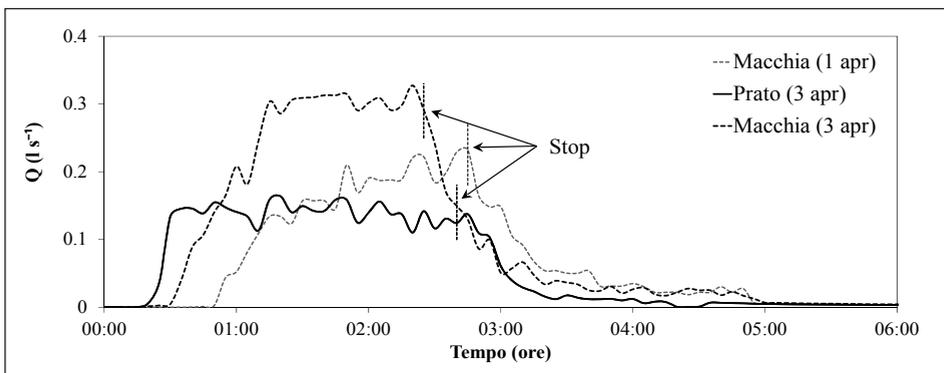


Fig. 4 – Deflusso sottosuperficiale drenato durante le prove di pioggia artificiale nella macchia e nel prato. Il tratteggio verticale indica l'istante d'arresto della pioggia artificiale

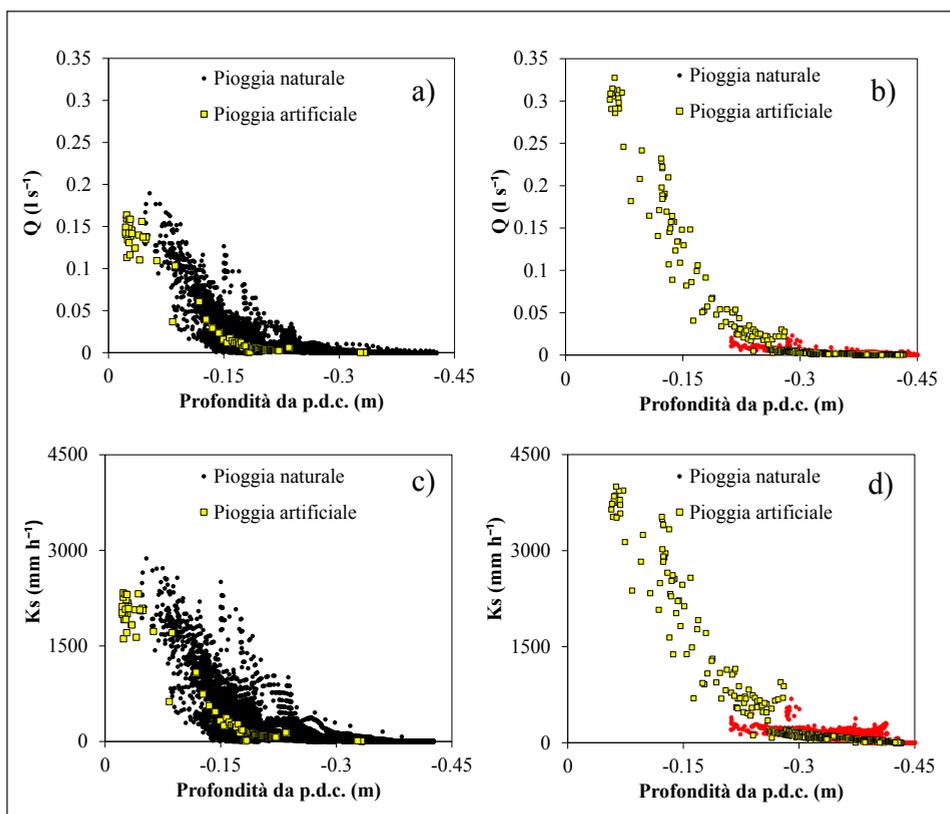


Fig. 5 – Relazione tra il deflusso sottosuperficiale drenato e la profondità della falda (a) nel prato e (b) nella macchia; relazione fra la K_s stimata e la profondità di falda (c) nel prato e (d) nella macchia

misurati nei piezometri P3 e P6, ed il gradiente idraulico dZ/ds è assunto pari alla pendenza media della falda osservata fra i piezometri P2–P3 e P5–P6.

La relazione stimata tra la K_s e la profondità della falda è illustrata nelle Fig. 5c e 5d. Al pari di quanto già osservato per le portate, nei suoli studiati i valori di K_s esibiscono un comportamento a soglia, presentando un marcata crescita solo dopo che l'altezza della falda raggiunge l'orizzonte superficiale maggiormente interessato dall'apparato radicale. Nella macchia, la crescita è più ripida rispetto al prato e, a parità di altezza di falda, i valori di K_s calcolati sono mediamente risultati superiori. Nella macchia il massimo valore stimato di K_s è stato di $4000\ mm\ h^{-1}$, relativo ad una profondità di falda di $0.06\ m$ registrata durante le prove di saturazione artificiale del 3 aprile, mentre sono trascurabili i valori di K_s stimati in condizioni di pioggia naturale. Il valore massimo di K_s stimato nel prato è stato di $2870\ mm\ h^{-1}$ in condizioni di precipitazione naturale e relativo ad una profondità di falda di $0.05\ m$. Nel corso delle prove di saturazione artificiale, il valore massimo calcolato di K_s è stato di $2400\ mm\ h^{-1}$, riferito ad una profondità di falda di $0.02\ m$.

4. Conclusioni

Nel presente lavoro sono illustrati i risultati di una metodologia sperimentale finalizzata alla valutazione della K_S alla scala di versante, dato relativamente poco frequente nella letteratura scientifica. La metodologia è stata applicata in un versante che presentava due aree adiacenti, una con copertura a macchia mediterranea, l'altra destinata a prato. Sono stati osservati i livelli di falda e i deflussi idrici sottosuperficiali del suolo, e le misure sono state usate per il calcolo della K_S alla scala di versante tramite l'equazione di Darcy. Il monitoraggio è stato effettuato in condizioni di pioggia naturale e, successivamente, durante tre prove di saturazione del suolo con pioggia artificiale intensa.

Lo studio comparativo svolto ha indicato che l'eliminazione della macchia a favore del prato ha causato una netta riduzione della permeabilità del suolo. Nel prato, in condizioni di pioggia naturale è stato calcolato un valore massimo di K_S di 2870 mm h⁻¹ relativo ad una profondità di falda di 0.05 m. Durante la prova di pioggia artificiale, il valore massimo stimato di K_S è stato del 15% più basso, ma relativo a una profondità di falda di 0.02 m. Questo risultato suggerisce che le differenti modalità di apporto idrico (pioggia naturale o artificiale) nonché la diversa estensione dell'area sperimentale drenata (intero versante o parcella irrigua) influenzano la stima della K_S . Nella macchia, durante il periodo di pioggia naturale sono state osservate basse portate sottosuperficiali, che hanno fornito stime della K_S trascurabili. La scarsa reattività del suolo a macchia è stata prevalentemente determinata dall'elevata aliquota di intercettazione fogliare della copertura boschiva, che ha influito negativamente sulla risposta idrologica nel suolo sottostante. Numerosi valori di K_S sono stati comunque ottenuti nel corso delle prove di saturazione artificiale, durante le quali è stato calcolato il valore massimo di 4000 mm h⁻¹.

I valori stimati di K_S alla scala di versante sono significativamente più alti rispetto a quelli stimati alla scala puntuale negli stessi suoli da Pirastru et al. (2013) attraverso un permeametro ad anello singolo. Analoghi risultati sono riportati in letteratura da altri autori (ad es. Brooks et al., 2004; Grayson et al., 1992), i quali hanno attribuito questa differenza alla diversa scala spaziale di misura della K_S . Infatti, la misura alla scala di versante può aver meglio catturato l'influenza della rete di macropori nel versante, le cui caratteristiche di connettività su un'ampia scala hanno un ruolo fondamentale nel condizionare la risposta idrologica del suolo. Questo aspetto sarà approfondito attraverso un ulteriore studio teorico e sperimentale.

Bibliografia

1. Bachmair S., Weiler M., *Interactions and connectivity between runoff generation processes of different spatial scales*, Hydrological Processes 28 (4): 1916–30, (2014).
2. Beven K., Germann P., *Macropores and water flow in soil*, Water Resources Research 18 (5): 1311–25, (1982).
3. Blain C.A., Milly P.C.D., *Development and application of a hillslope hydrologic model*, Advances in Water Resources 14 (4): 168–74, (1991).

4. Bouma, J., *Soil morphology and preferential flow along macropores*, *Agricultural Water Management* 3 (4): 235–50, (1981).
5. Brooks E.S., Boll J., McDaniel P.A., *A hillslope-scale experiment to measure lateral saturated hydraulic conductivity*, *Water Resources Research* 40: W04208, (2004).
6. Chappell, N.A., Franks S.W., Larenus J., *Multi-scale permeability estimation for a tropical catchment*, *Hydrological Processes* 12 (9): 1507–23, (1998).
7. Childs E.C., *Drainage of groundwater resting on a sloping bed*, *Water Resources Research* 7 (5): 1256–63, (1971).
8. Grayson, R.B., Moore I.D., McMahon T.A., *Physically based hydrologic modeling 2. is the concept realistic?*, *Water Resources Research* 28 (10): 2659–66, (1992).
9. Llorens P., Domingo F., *Rainfall partitioning by vegetation under mediterranean conditions. a review of studies in europe*, *Journal of Hydrology* 335 (1-2): 37–54, (2007).
10. Parlange M.B., Steenhuis T.S., Timlin D.J., Stagnitti F., Bryant R. B., *Subsurface flow above a fragipan horizon*, *Soil Science* 148 (2): 77–77, (1989).
11. Pirastru M., Castellini M., Giadrossich F., Niedda M., *Comparing the hydraulic properties of forested and grassed soils on an experimental hillslope in a mediterranean environment*, *Procedia Environmental Sciences* 19: 341–50, (2013).

