

Effetti della vegetazione erbacea a radicazione profonda negli interventi di protezione superficiale dei versanti, difesa spondale e controllo dell'erosione

A. Vecchietti¹, M. Cecconi¹, V. Pane¹, D. Bellavita¹, F. Cotana¹, S. Grimaldi², A. Petroselli³, C. Zarotti⁴

¹Dipartimento di Ingegneria (DI), Università degli Studi di Perugia

²Dipartimento per la Innovazione nei Sistemi Biologici, Agroalimentari e Forestali (DIBAF), Università degli Studi della Tuscia

³Dipartimento di Economia, Ingegneria, Società e Impresa (DEIM), Università degli Studi della Tuscia

⁴Prati Armati S.r.l.

SOMMARIO: L'utilizzo di tecniche di inerbimento attraverso piante erbacee a radicazione profonda può risultare particolarmente vantaggioso nel controllo dell'erosione, stabilizzazione di coltri superficiali o per la protezione spondale, sia dal punto di vista dell'efficacia dell'intervento, sia in un'ottica di sostenibilità. È ben noto che la vegetazione influisce significativamente sul bilancio idrologico dell'area di interesse e che le radici profonde di specie erbacee selezionate hanno la capacità di incrementare direttamente la resistenza a taglio dei terreni radicati per interazione meccanica. L'articolo presenta i risultati preliminari di un'attività di ricerca che ha per oggetto la valutazione dell'efficienza di interventi di inerbimento per la protezione di sponde arginali. Nella valutazione quantitativa degli effetti della vegetazione e della sua mutua interazione con terreno, particolare attenzione è dedicata alla definizione del profilo di area radicata *RAR*, alla valutazione dell'effetto sulle proprietà di ritenzione idrica del terreno e, conseguentemente, sulle caratteristiche di resistenza a taglio del terreno radicato.

Keywords: protezione superficiale dei versanti, erosione, radici profonde, rapporto di area radicata

1 TECNICHE DI INERBIMENTO PER LA PROTEZIONE DEI VERSANTI

È ad oggi ampiamente riconosciuto che fenomeni di erosione possono essere efficacemente contenuti mediante idonea copertura vegetale e che la vegetazione svolge un ruolo altrettanto importante nella protezione superficiale dei pendii (Stokes et al. 2007). Interventi di inerbimento mediante specie erbacee a radicazione profonda possono risultare utili, efficaci, innovativi e sostenibili nella stabilizzazione di coltri superficiali di versante, per la protezione spondale di fiumi, laghi, torrenti e canali irrigui, in sostituzione o in abbinamento con le opere tradizionali di difesa spondale. Tali interventi di controllo dell'erosione e stabilizzazione di terreni superficiali, quando attuati mediante specie opportunamente selezionate, possono inoltre comportare - rispetto a tecniche più tradizionali - una sottrazione importante di CO₂ dall'atmosfera.

Più in particolare, come ampiamente documentato nella letteratura scientifica, le radici di specie erbacee opportunamente selezionate hanno la capacità di incrementare direttamente la resistenza a taglio dei terreni radicati per interazione meccanica. Le radici

agiscono come dei sottilissimi ancoraggi di resistenza a trazione elevata, che si sviluppano in profondità nel terreno (Wu, 1976, Waldron, 1977; Gray & Sotir, 1996; Wan et al., 2011; Wang and Lee, 1998; Wu, 2013). La mutua interazione radice-terreno è influenzata da molteplici fattori (Figura 1). Tra questi, lo sviluppo radicale in profondità e le proprietà di resistenza della radice rivestono un ruolo fondamentale, e il contributo stabilizzante dipende dalle caratteristiche morfologiche e meccaniche del sistema radicale e dalle caratteristiche geotecniche e biochimiche del terreno.

L'influenza delle piante sul comportamento meccanico dipende fortemente dalla geometria dell'apparato radicale: nel caso di specie erbacee con radici profonde, l'apparato radicale può determinare una variazione di porosità nelle porzioni di terreno radicato, anche in ragione della tipologia di terreno; d'altra parte, la porosità stessa del terreno, la distribuzione granulometrica, la presenza di sostanza organica, la composizione mineralogica possono condizionare lo sviluppo stesso dell'apparato radicale, e quindi la resistenza a trazione delle radici.

È altrettanto ben noto che la vegetazione influenza significativamente i processi idrologici, condizionando non solo il deflusso superficiale, i processi di evapo-traspirazione e infiltrazione, ma anche le pro-

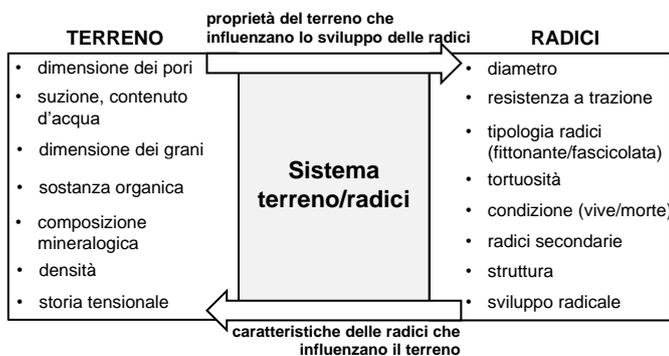


Figura 1 – Fattori che influenzano l’interazione terreno/radici (modificato da Loades 2010)

prietà di ritenzione idrica del terreno, il contenuto d’acqua e la suzione.

Nella nota si propongono i risultati preliminari di un’attività di ricerca che riguarda la valutazione degli effetti dovuti agli impianti radicali di specie erbacee comunemente impiegate in interventi eco-tecnologici di ingegneria naturalistica. Nella valutazione quantitativa degli effetti della vegetazione e della sua mutua interazione con terreno, particolare attenzione è dedicata alla definizione del profilo di area radicata RAR , del suo effetto sulle proprietà di ritenzione idrica del terreno e, conseguentemente, sulle caratteristiche di resistenza a taglio del terreno radicato.

2 IL CONTRIBUTO DELLE RADICI ALLA RESISTENZA DEL TERRENO

2.1 Effetto meccanico

L’incremento di resistenza a taglio offerto al terreno dalle radici di piante arboree ed erbacee è da tempo riconosciuto e studiato (Wu, 1976; Waldron, 1977; Bischetti, 2000; Belfiore & Urciuoli, 2004; Schwartz et al., 2010; Pollen-Bankhead et al., 2013). Wu (2013) passa in rassegna i diversi modelli analitici proposti in letteratura per la valutazione del comportamento degli apparati radicali. In alcuni modelli, il comportamento della singola radice è assimilato a quello di una fibra cilindrica elastica di elevata resistenza a trazione o di un palo sollecitato da forze orizzontali, in altri modelli a quello di un cavo flessibile. Nel caso di specie erbacee a radicazione profonda, nella valutazione del contributo alla resistenza a taglio del terreno si assume implicitamente che la lunghezza della radice sia sufficiente a non provocare lo sfilamento della radice stessa e che la resistenza offerta sia prossima alla resistenza a trazione. Nel noto modello semplificato di rinforzo per la singola radice (Waldron, 1977), uno stato di deformazioni di taglio nel terreno – causato dallo scorrimento lungo una potenziale superficie che delimita una porzione di terreno instabile - induce l’allungamento delle radici e lo sviluppo di tensioni di trazione all’interno di esse, compatibilmente con la massima resistenza della radice stessa; tale stato

tensionale agisce sul volume di terreno instabile dando luogo a forze esterne stabilizzanti.

L’azione stabilizzante delle radici viene schematizzata come un incremento di resistenza a taglio, $\Delta\tau_r$. L’incremento di resistenza a taglio offerto dalle radici al terreno esteso all’intero apparato radicale, $\Delta\tau_r(z)$, può essere valutato in base alla seguente equazione (si vedano ad esempio Wu, 2013; Cazzuffi et al., 2014, Cecconi et al., 2014):

$$\Delta\tau_r(z) = k \cdot t_{rm} \cdot RAR(z) \quad (1)$$

dove k è un fattore empirico, legato alla distorsione angolare della radice che attraversa la potenziale superficie di scorrimento, mentre t_{rm} è associata al diametro medio delle radici della specie e rappresenta la resistenza mobilitata nella radice ($t_{rm} \leq t_r$). La grandezza $RAR(z)$ rappresenta il rapporto di radicazione, ovvero il rapporto tra l’area effettivamente occupata dalle radici e l’area di terreno radicata di riferimento.

Il modello semplificato assume che le radici abbiano un comportamento elasto-plastico con resistenza a trazione completamente mobilitata, e siano orientate perpendicolarmente alla superficie di scorrimento. Da una rassegna della letteratura specifica (Thomas & Pollen-Bankhead 2010), il coefficiente k assume valori compresi tra 0.6 e 1.3 per terreni con angolo di attrito compreso tra 20 e 40°. Spesso, in mancanza di indicazioni sulla geometria della potenziale superficie di rottura, si assume $k = 1.2$ (Wu 2013). La resistenza a trazione della radice dipende principalmente dalla specie e dal diametro delle radici (es., Bischetti et al., 2007; Thomas & Pollen-Bankhead, 2010; Cazzuffi et al. 2014). Sulla base di risultati sperimentali, tali Autori esprimono la resistenza a trazione della radice t_r (MPa) in funzione del diametro, d :

$$t_r = a \cdot d^{-b} \quad (2)$$

con a e b parametri dipendenti dalla specie (d in mm). Per quanto riguarda i valori numerici dei parametri a , b si veda ad esempio lo studio di Cazzuffi & Crippa (2005) riferito a piante erbacee della famiglia delle *Graminacee*.

Le proprietà degli apparati radicali dipendono dalla specie e dalle condizioni del terreno in cui l’apparato si sviluppa. Le radici si sviluppano nel terreno in funzione delle sostanze nutrienti, della presenza di acqua, della porosità stessa del terreno, solo per citare alcuni fattori.

La mutua interazione tra terreno e radici è ad oggi oggetto di ricerche e studi condivisi tra botanici, agronomi, geologi, ingegneri geotecnici. Non essendo a tutt’oggi note le relazioni che legano lo sviluppo delle radici alle condizioni ambientali del sito, generalmente, si procede con valutazioni empiriche. In letteratura, diversi Autori hanno analizzato gli apparati radicali di alberi (Mao et al., 2005; Pagès et al., 2000;

Bischetti et al. 2007; Danjon et al., 2008; Vergani et al., 2017), mentre studi disponibili riferiti ad arbusti e piante erbacee sono più limitati (Simon & Collison 2002; Bischetti, et al. 2005; Preti et al. 2010; Fortier et al., 2013).

2.2 Rapporto di Area Radicata, RAR

L'apparato radicale si modifica durante la vita della piante e possono modificarsi stagionalmente seguendo le variazioni ambientali. Le proprietà chimiche e fisiche del terreno hanno un'importanza fondamentale nel condizionare lo sviluppo radicale (Jakobsen & Dexter 1987; Pierret et al., 2007). Le più importanti sono la densità, la tessitura, le condizioni di drenaggio e areazione, mentre, dal punto di vista chimico, si annoverano il pH e la concentrazione di minerali e tossine (Pollen-Bankhead et al. 2013). Nei terreni granulari addensati, la maggiore frequenza di pori di piccole dimensioni potrebbe da un lato inibire lo sviluppo naturale dell'apparato radicale con la profondità, ma dall'altro indurre un'espansione laterale di tutto l'apparato con conseguente incremento del diametro delle radici e dell'area radicata anche a modeste profondità (Stokes et al., 2007).

Nel caso di piante erbacee, lo sviluppo delle radici, anche molto sottili, può raggiungere i 3-4 metri di profondità. Con riferimento a specie erbacee con un sistema radicale di tipo fascicolato, il profilo di area radicata $RAR(z)$ - calcolato come rapporto tra l'area radicata A_r e l'area di terreno di riferimento - può essere descritto da una legge esponenziale del tipo:

$$RAR(z) = \frac{A_r(z)}{A_s} = \exp\left(-\left(\frac{z}{c} + f\right)\right) \quad (3)$$

con c (in m) e f parametri di *curve fitting* dipendenti dalla specie (Cecconi et al., 2013).

La distribuzione del rapporto $RAR(z)$ è rappresentata in Figura 2. In particolare, il parametro f è proporzionale alla porosità del terreno, tenuto conto del fatto che, ragionevolmente, per ridotti valori di porosità, il profilo RAR può tendere a valori piccolissimi (terreno "impenetrabile" dalle radici) e che, al contrario, per porosità elevate la RAR può raggiungere valori elevati dell'ordine del 5 - 10% (al piano campagna). Si auspica di poter disporre quanto prima di risultati sperimentali a riguardo (vedi paragrafo 4).

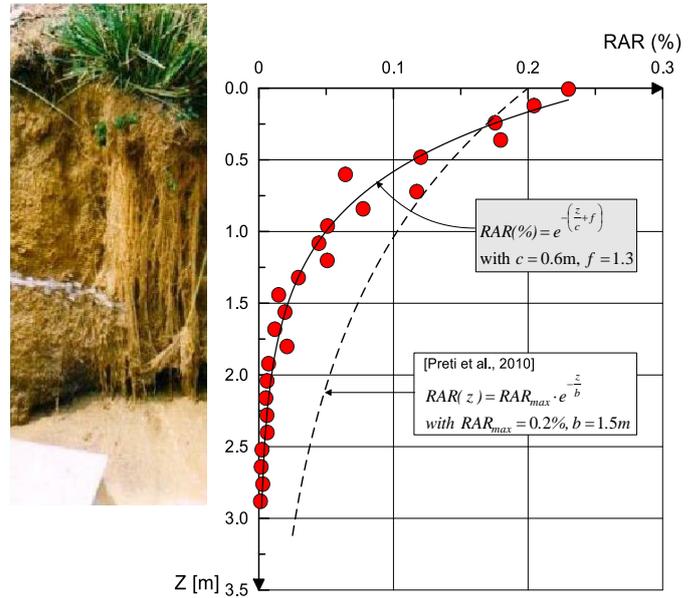


Figura 2 – Impianti radicali di tipo fascicolato relativi a specie erbacee (da Cecconi et al., 2013)

2.3 RAR e porosità

La presenza di radici sottili di dimensioni millimetriche induce una variazione di porosità effettiva del terreno, attribuibile al riempimento dei pori da parte delle radici. Con riferimento ad un interessante lavoro di Ng et al. (2016), e al diagramma delle fasi rappresentato in Figura 3 per un elemento di volume di terreno radicato, l'indice dei vuoti, e , del terreno radicato può essere calcolato mediante l'equazione:

$$e = \frac{e_0 - R_v(1 + e_0)}{R_v \cdot (1 + e_0) + 1} \quad (4)$$

laddove e_0 è l'indice dei vuoti del terreno in assenza di radici, e la grandezza $R_v = V_r/V_{tot}$ rappresenta il rapporto tra il volume occupato dalle radici e il volume totale di terreno occupato dalle radici. Di fatto, per un volume unitario di terreno, il rapporto R_v coincide con il rapporto RAR . L'Eq.(4) discende dall'ipotesi che la vegetazione occupi una porzione del volume della fase fluida, e l'assorbimento di acqua da parte delle radici (*root water uptake*) sia trascurabile ($w = w_0$).

La modifica dell'indice dei vuoti si riflette sulle proprietà di ritenzione idrica del terreno. Dai risultati sperimentali di prove in sito e in laboratorio riportati da Leung et al. (2015) e Ng et al. (2016) si osservano delle differenze apprezzabili tra la curva di ritenzione per il terreno vegetato rispetto a quella del terreno "tal quale". In particolare, per un terreno limo-sabbioso ($e_0 = 0.5 \div 0.72$), in presenza di radici di *S. heptaphylla*, è stato osservato un aumento del valore di ingresso dell'aria (AEV, *Air Entry Value*) da 1 a 4 kPa, mentre la pendenza della curva di desaturazione rimane pressoché invariata (Ng et al. 2016).

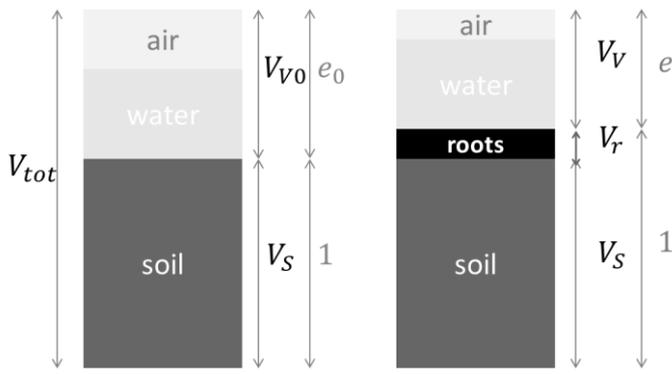


Figura 3 – Diagramma delle fasi per terreno radicato e non radicato.

3 CURVE DI RITENZIONE IDRICA

Per valutare l'effetto dell'impianto radicale sulle proprietà di ritenzione idrica dei terreni si è proceduto, in una prima fase, attraverso una trattazione analitica.

In letteratura si rinvencono numerosi studi che propongono approcci per descrivere la curva di ritenzione a partire dalle caratteristiche granulometriche e porosimetriche di un terreno. Tra questi, gli approcci di tipo fisico-empirico si basano principalmente sul significato fisico e sulla "similitudine" tra la distribuzione granulometrica cumulata e la curva di ritenzione (ad es., Fredlund et al., 1997). L'approccio originariamente proposto da Arya & Paris (1981) per terreni prevalentemente granulari si fonda sulla relazione intrinseca tra distribuzione dei grani e distribuzione porosimetrica: nell'ipotesi che i granelli solidi abbiano forma sferica e che i pori siano assimilabili a tubi cilindrici, al raggio medio (R_i) della i -esima classe diametrica dei grani, corrisponde il raggio dei pori (r_i):

$$r_i = R_i \left[2 \cdot e \cdot n_i^{1-\alpha} / 3 \right]^{1/2} \quad (5)$$

dove n_i , ed e rappresentano rispettivamente il numero di grani sferici e l'indice dei vuoti, mentre α è un parametro empirico (costante, maggiore di 1). La dimensione stimata dei pori è convertita in suzione equivalente sfruttando le equazioni della capillarità:

$$(u_a - u_w)_i = s_i = 2T_w / r_i \quad (6)$$

con T_w tensione superficiale dell'acqua ($T_w = 7.27 \times 10^{-2}$ N/m a 20°C). Nell'applicazione del modello, l'influenza del parametro α , assunto originariamente indipendente dalla granulometria del terreno ($\alpha = 1.38$), è stata analizzata dagli stessi Autori: nel passare da terreni a grana fine a terreni a grana grossa, α varia nell'intervallo 1.1 ÷ 2.5 (Arya et al. 1999).

L'effetto dell'impianto radicale sulla variazione della curva di ritenzione, dovuto al riempimento dei

vuoti interstiziali da parte delle radici stesse, è stato pertanto indagato attraverso uno studio parametrico, avvalendosi dell'approccio fisico-empirico di Arya & Paris (1981). Le principali caratteristiche fisiche dei terreni considerati nello studio sono riportate nella Tabella 1, e le relative curve di distribuzione granulometrica sono rappresentate nella Figura 4: sono ascrivibili a n. 4 diverse tipologie di terreni, da limi argillosi a sabbie, caratterizzati da diversi valori della porosità iniziale e diverso assortimento granulometrico (coefficiente di uniformità). Per quanto riguarda i rapporti RAR , sono stati considerati valori costanti con la profondità pari a 0.3%, 3% ed 8%, valori appropriati per specie erbacee e arboree (Bischetti et al. 2005, Cazzuffi et al. 2014).

Per i terreni in esame, le curve di ritenzione espresse in termini di grado di saturazione, S_R , in funzione della suzione, s , sono state determinate con il modello di Arya e Paris (1981). L'effetto dell'impianto radicale è tenuto in considerazione modificando la porosità effettiva secondo l'eq. (4), per i diversi valori di RAR (Tabella 2). Le curve caratteristiche per terreno vegetato e non- sono rappresentate graficamente nella Figura 5.

In accordo con i risultati sperimentali riportati nello studio di Ng et al. (2016), dalla Figura 5 si evince in primo luogo che la presenza delle radici induce una modifica del valore di ingresso dell'aria. L'effetto è tanto più evidente quanto maggiore è il valore del rapporto di radicazione RAR .

Tabella 1 – Caratteristiche fisiche dei terreni in esame

	γ_d (kN/m ³)	G_s	e_0
Sabbia*	16.5	2.67	0.618
Limo sabbioso†	18.7	2.764	0.838
Limo*	16.58	2.72	0.640
Limo argilloso/sabbioso	16.96	2.72	0.603

*: Fredlund et al. 2012; †: Cecconi et al. (2019)

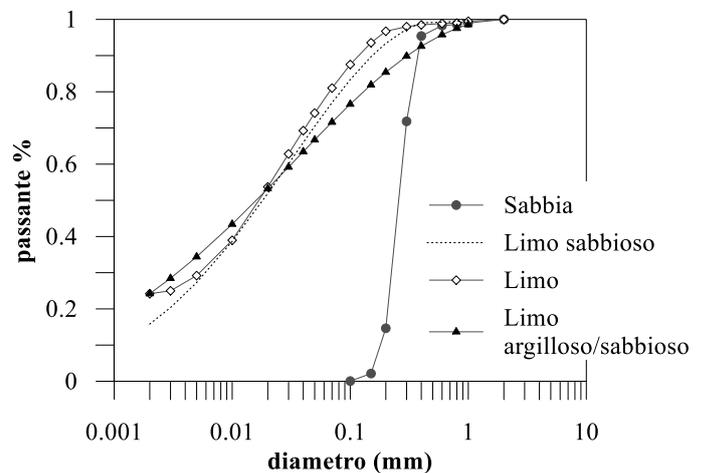


Figura 4 – Curve granulometriche relative ai terreni utilizzati nello studio.

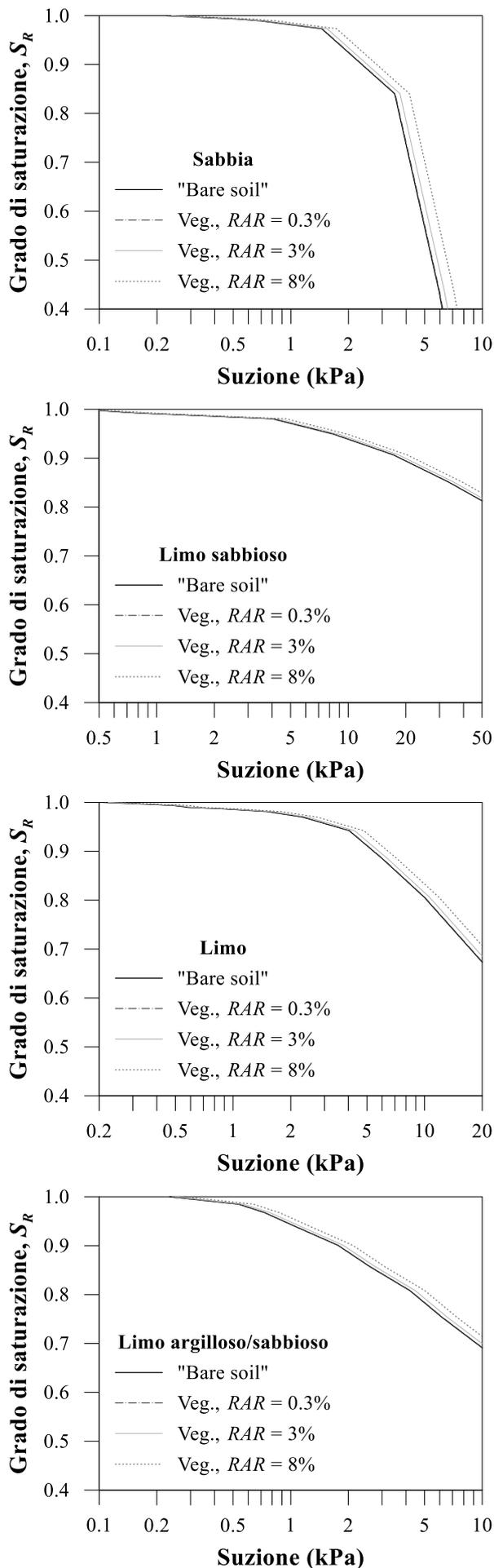


Figura 5 – Curve di ritenzione calcolate per diversi valori del parametro RAR .

Tabella 2 – Valori di e_0 , e per i terreni in esame

	e_0	e RAR 0.3%	e RAR 3%	e RAR 8%
Sabbia	0.618	0.610	0.543	0.433
Limo sabbioso	0.838	0.828	0.742	0.602
Limo	0.640	0.632	0.563	0.450
Limo argilloso/ sabbioso	0.603	0.595	0.529	0.421

Tabella 3 – Valori di AEV per le curve di ritenzione rappresentate in Figura 5

	AEV (kPa) "Bare soil"	AEV RAR 0.3%	AEV RAR 3%	AEV RAR 8%
Sabbia	3.0	3.1	3.2	3.6
Limo sabbioso	13.5	13.5	14.3	15.9
Limo	5.5	5.5	5.9	6.6
Limo argilloso/ sabbioso	1.6	1.6	1.7	1.9

La Tabella 2 mostra i valori di e_0 , e per i casi analizzati, mentre la Tabella 3 riporta i valori dell'AEV calcolati al variare del rapporto RAR per le diverse curve relative ai diversi terreni.

Si nota che il valore AEV aumenta del 6 ÷ 7% per un profilo RAR costante dell'ordine del 3%, e raggiunge approssimativamente il 18% quando il rapporto RAR raggiunge il valore 8%; a tale incremento del rapporto di radicazione corrisponde un incremento del valore AEV compreso tra + 0.3 e +2.4 kPa nei diversi casi e, rispettivamente, una riduzione dell'indice dei vuoti rispetto a quello iniziale del 12% e 30%. Il valore di $RAR = 0.3\%$ non produce variazioni apprezzabili della proprietà di ritenzione. Maggiore è la dimensione media dei grani, maggiore è l'effetto indotto dalla presenza di radici sul valore AEV.

4 ATTIVITÀ SPERIMENTALE IN CORSO

Dallo studio parametrico condotto, è evidente che l'adozione di tecniche di protezione dei versanti mediante inerbimento può influenzare le caratteristiche di resistenza meccanica dei terreni non solo attraverso l'interazione meccanica diretta, ma anche agendo sulla suzione, attraverso la modifica delle proprietà di ritenzione idrica dei terreni.

Specie erbacee caratterizzate da impianti radicali profondi presentano valori di RAR dell'ordine di 0.2 ÷ 0.4 % in superficie (RAR_{max}), che poi decresce (esponenzialmente) con la profondità; ne consegue che l'effetto delle radici sulle proprietà di ritenzione sia limitato alle porzioni di terreno più superficiali, mentre l'incremento della resistenza a taglio del terreno, in ragione dall'elevata resistenza a trazione delle singole radici, è riscontrabile anche a diversi

metri di profondità (Cecconi et al. 2015). L'incremento di resistenza a taglio si riflette nell'efficacia di interventi di inerbimento che, oltre ad essere utilizzati con finalità di protezione anti-erosiva, possono essere efficacemente impiegati anche per la stabilizzazione di coltri superficiali di versante (Cazzuffi et al. 2006; Cecconi et al. 2014, Salvatici et al., 2018) e sponde arginali (Simon & Collins 2002).

Ai fini della validazione della distribuzione *RAR* descritta dall'eq. 3, la seconda fase dello studio ha riguardato l'avvio di un'attività sperimentale in sito. Obiettivo primario dell'attività è l'osservazione in sito, il rilievo e la valutazione quantitativa dello sviluppo radicale di specie erbacee a radicazione profonda. Questa seconda fase dell'attività sperimentale si colloca nell'ambito di un progetto di ricerca sulla possibilità di combinare la gestione ecosostenibile della manutenzione di sponde arginali con interventi per la riduzione del rischio idraulico e di miglioramento della stabilità di sponde arginali.

4.1 Descrizione del sito sperimentale

L'attività in sito è stata avviata nella parcella sperimentale denominata *Cape Fear* (Tauro et al. 2017; Petroselli and Tauro 2017; Petroselli et al. 2019). Essa è caratterizzata sia da tradizionali strumenti per il monitoraggio in tempo reale dei processi idrologici, sia da un sistema di videocamere per l'osservazione della formazione del deflusso superficiale e dei processi di trasporto ad esso collegati. *Cape Fear* è localizzata all'interno dell'Azienda Agraria Didattico Sperimentale dell'Università degli Studi della Tuscia, Viterbo, e consiste in un volume di terreno avente base quadrata di $7 \times 7 \text{ m}^2$, pendenza del 17% e altezza massima di 1.2 m. 30 m^3 di terreno naturale costituiscono la porzione di terreno sommitale, mentre altri 10 m^3 ne costituiscono la base, sollevata dal piano campagna di circa 30 cm (Figura 6). La struttura perimetrale, su tre lati, consta di una serie di pali e tavole di carpenteria di castagno ed è delimitata da un telo di plastica impermeabile che impedisce gli scambi di acqua con le pareti verticali e con il terreno di fondazione. Una parete laterale è caratterizzata dalla presenza di pannelli vetrati di 2.5 m di lunghezza e 24 mm di spessore che permettono l'osservazione diretta del fronte umido. All'interno della struttura sono presenti 4 simulatori di pioggia che ne consentono il funzionamento in condizioni di precipitazione artificiale.

Il contenuto d'acqua del terreno viene registrato da 4 sensori Campbell Scientific CS615 disposti su due verticali, rispettivamente a monte e a valle e a 10 e 50 cm di profondità dal piano di campagna, a distanza di 2.5 m l'una dall'altra e al centro della struttura.

La caratterizzazione del terreno è riportata in (Tauro et al. 2017; Petroselli and Tauro 2017; Petroselli et al. 2019). Si tratta di sabbie argillose con limo (sabbia 44%, limo 35.6%, argilla 20.4%)

caratterizzate da un grado di saturazione medio del 54% e da una permeabilità $k = 2.5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.

Il deflusso superficiale e sub-superficiale viene raccolto mediante una canaletta triangolare in metallo localizzata alla base della collina sperimentale, e termina in una vasca dotata di tre partizioni in comunicazione tra loro: la prima è destinata alla raccolta del materiale solido grossolano, la seconda costituisce una vasca di calma, e la terza permette la misura sia della portata liquida tramite un sensore di livello Structural Testing System (S.T.S.) tarato tramite scala di deflusso appositamente calibrata, sia del materiale solido fine tramite un torbidimetro OBS-3+. Tutti i dati vengono acquisiti dai sensori ogni secondo, mediati nell'arco di 5 minuti, e infine registrati su un datalogger CR10X Campbell Scientific.

L'attività sperimentale è stata avviata nei primi giorni dell'anno con la semina di sementi di una miscela di specie erbacee della famiglia delle *Graminacee*. L'accrescimento dell'apparato radicale sarà opportunamente monitorato e la configurazione geometrica sarà rilevata attraverso la parete vetrata. Le misure acquisite permetteranno di validare la distribuzione del rapporto di radicazione espressa dall'eq. 3.



Figura 6 – Collina sperimentale UniTUS

5 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

L'articolo presenta i risultati preliminari di uno studio teorico e sperimentale sulla mutua interazione radice-terreno per specie erbacee a radicazione profonda, frequentemente utilizzate negli interventi di inerbimento e stabilizzazione superficiale dei versanti. Nello studio è stato evidenziato l'effetto delle radici sulle proprietà di ritenzione idrica, limitatamente alla tipologia di terreni esaminati. Per valori di *RAR*_{max} compresi tra 0.3% e 8%, la presenza delle radici produce un lieve aumento del valore di *AEV* ed una modifica delle proprietà di ritenzione.

Attualmente, è in corso una attività in sito volta a verificare sperimentalmente le caratteristiche dell'apparato radicale di specie erbacee contraddistinte da

impianti radicali profondi, in termini di dimensioni medie delle radici, densità e sviluppo di radicazione.

A fronte dell'attività sperimentale, il prosieguo dello studio riguarderà la modellazione numerica di sponde arginali interessate da interventi di protezione/stabilizzazione mediante specie erbacee a radicazione profonda. Nella modellazione del comportamento meccanico del terreno radicato, oltre all'incremento della resistenza al taglio per interazione meccanica, verrà tenuto in conto l'effetto della parziale saturazione e di eventuale assorbimento di acqua da parte delle radici (*root water uptake*) nella porzione interessata da una maggiore densità radicale.

BIBLIOGRAFIA

- Arya, L.M. & Paris, J.F. (1981). A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle size. *Soil Science Society of America Journal* 45:1023-1030.
- Arya, L.M., Feike, J.L., van Genuchten M.T., Shouse, P.J. (1999). Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle size distribution data. *Soil Science Society of America Journal* 63:510-519.
- Belfiore, G. and Urciuoli, G. (2004) Analisi del contributo meccanico delle radici alla resistenza del terreno. In: *Proceedings of the Annual Meeting of the Geotechnical Researchers 2004 – IARG 2004*, Trento.
- Bischetti, G. B., Chiaradia, E. A., Simonato, T., Speziali, B., Vitali, B., Vullo, P., & Zocco, A. (2007). Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy). In: *Eco-and ground bio-engineering: The use of vegetation to improve slope stability*, pp. 31-41.
- Bischetti, G.B. (2000). Quantificazione dell'effetto dell'apparato radicale sulla stabilità dei versanti. *Journal of Agricultural Engineering* 2, 70-81.
- Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Simonato, T., Speziali, B., Vitali, B., Vullo, P., Zocco, A. (2005) Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy). *Plant and Soil*, Volume 278, 11–22.
- Cazzuffi, D. and Crippa, E. (2005) Shear strength behaviour of cohesive soils reinforced with vegetation. In: *Proceedings of 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Osaka, Japan, pp. 2493–2498.
- Cazzuffi, D., Cardile, G., & Gioffrè, D. (2014). Geosynthetic engineering and vegetation growth in soil reinforcement applications. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 1(3-4), 262-300.
- Cazzuffi, D., Corneo A., & Crippa E. (2006) Slope stabilisation by perennial “gramineae” in Southern Italy: plant growth and temporal performance. *Geotechnical and Geological Engineering* 24: 429–447
- Cecconi M., Mannocchi F., Napoli P., Pane V., Todisco F., Urciuoli G., Vecchietti A. (2014). Interventi di protezione dei versanti per il controllo dei fenomeni erosivi e la stabilizzazione superficiale. *Associazione Geotecnica Italiana, XXV Convegno Nazionale di Geotecnica*, Baveno 4-6 giugno.
- Cecconi M., Napoli P., Pane V. (2015). Effects of soil vegetation on shallow slope instability. *Environmental Geotechnics*, vol. 2, issue EG3, p. 130–136.
- Cecconi M., Pane V., Napoli P., Zarotti C. (2013). Mechanical and hydraulic effects of deep roots planting on slope stability. *TC 215 CPEG 2013 Symposium, Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics*, Torino, Italy, July 2013, p. 533-540.
- Cecconi, M., Vecchietti, A., Pane, V., Russo, G., & Cencetti, C. (2019). Geotechnical Aspects in the Assessment of Stability Conditions of the Volumni Hypogeum in Perugia. In *National Conference of the Researchers of Geotechnical Engineering*, pp. 129-137. Springer, Cham.
- Danjon, F., Barker, D. H., Drexhage, M., & Stokes, A. (2008). Using three-dimensional plant root architecture in models of shallow-slope stability. *Annals of botany*, 101(8), 1281-1293.
- Fortier, J., Truax, B., Gagnon, D., & Lambert, F. (2013). Root biomass and soil carbon distribution in hybrid poplar riparian buffers, herbaceous riparian buffers and natural riparian woodlots on farmland. *SpringerPlus*, 2(1), 539.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons, Inc.
- Gray, D.H. & Sotir, R.B. (1996). *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: A Practical Guide for Erosion Control*. John Wiley and Sons
- Jakobsen, B.F. and Dexter, A.R. (1987). Effect of soil structure on wheat root growth, water uptake and grain yield. A computer simulation model. *Soil Tillage Res.* 10: 331-345.
- Leung, A. K., Garg, A., & Ng, C. W. W. (2015). Effects of plant roots on soil-water retention and induced suction in vegetated soil. *Engineering Geology*, 193, 183-197.
- Loades, K.W., Bengough, A.G., Bransby, M.F., Hallett, P.D. (2010) Planting density influence on fibrous root reinforcement of soils. *Ecological Engineering* 36(3): 276–284
- Mao, Z., Saint-André, L., Bourrier, F., Stokes, A., & Cordonnier, T. (2015). Modelling and predicting the spatial distribution of tree root density in heterogeneous forest ecosystems. *Annals of botany* 116(2), 261-277.
- Ng, C.W.W., Ni, J.J., Leung, A.K., & Wang, Z.J. (2016). A new and simple water retention model for root-permeated soils. *Géotechnique Letters*, 6(1), 106-111.
- Norris, J.E. et al. Eds. (2008). *Slope stability and erosion control: ecotechnological solutions*. Springer Science & Business Media.
- Pages, L., Asseng, S., Pellerin, S., & Diggle, A. (2000). Modelling root system growth and architecture. In: *Root Methods* pp. 113-146. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Petroselli A., Tauro F. (2017). Cape Fear: monitoring basic hydrological processes in an outdoor hillslope plot. *Environ Monit Assess* 189: 132.
- Petroselli A., Tauro F., Grimaldi S. (2019). Investigating runoff formation dynamics: field observations at Cape Fear experimental plot. *Environ Monit Assess* 191: 642.
- Pierret, A., Doussan, C., Capowiez, Y., & Bastardie, F. (2007). Root functional architecture: a framework for modeling the interplay between roots and soil. *Vadose Zone Journal* 6(2): 269-281.
- Pollen-Bankhead, N., Simon, A., & Thomas, R.E. (2013). The Reinforcement of Soil by Roots: Recent Advances and Directions for Future Research. *Treatise on Geomorphology* y Chapter 12.8
- Preti, F., Dania, A., Laio, F. (2010). Root profile assessment by means of hydrological, pedological and above-ground vegetation information for bio-engineering purposes. *Ecological Engineering* 36: 305–316.
- Salvatici, T., Tofani, V., Rossi, G., D'Ambrosio, M., Tacconi Stefanelli, C., Masi, E., ... & Catani, F. (2018). Application of a physically based model to forecast shallow landslides at a regional scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 1919-1935.
- Schwarz, M., Cohen, D., & Or, D. (2010). Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115.
- Simon, A. & Collison, A.J. (2002). Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank

stability. *Earth surface processes and landforms* 27(5): 527-546.

- Stokes, A., Spanos, I., Norris, J. E., & Cammeraat, E. Eds. (2007). Eco-and Ground Bio-engineering: the Use of Vegetation to Improve Slope Stability. In: *Proceedings of the First International Conference on Eco-engineering 13-17 September 2004* (Vol. 103).
- Tauro, F., Petroselli, A., Fiori, A., Romano, N., Rulli, M. C., Porfiri, M., Palladino, M., Grimaldi, S. (2017). Cape Fear - a hybrid hillslope plot for monitoring hydrological processes. *Hydrology* 4, 35.
- Thomas, R. E., & Pollen-Bankhead, N. (2010). Modeling root-reinforcement with a fiber-bundle model and Monte Carlo simulation. *Ecological Engineering*, 36(1), 47-61.
- Vergani, C., Giadrossich, F., Buckley, P., Conedera, M., Pivodori, M., Salbitano, F., ... & Schwarz, M. (2017). Root reinforcement dynamics of European coppice woodlands and their effect on shallow landslides: A review. *Earth-science reviews*, 167, 88-102.
- Waldron L.J. (1977). The shear stress resistance of root permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Science Society of America Journal*, 41, 843-849.
- Wan, Y., Xue, Q., Zhao, Y. (2011). Mechanism study and numerical simulation of vegetation affecting the slope stability, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 16: 742-751
- Wang, K. and Lee, C. (1998). Brief mechanical analysis of bio-engineering techniques for slope protection, *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 17(6): 687-691.
- Wu, T.H. (1976). Investigations of landslides on Prince of Wales Island, Alaska, *Geotech. Eng. Rep 5*, Columbus, OH: Dept. Civ. Eng., Ohio State Univ. 94 p.
- Wu, T.H. (2013). Root reinforcement of soil: review of analytical models, test results, and applications to design. *Canadian Geotechnical Journal* 50, 259-274.

RINGRAZIAMENTI

Lo studio è stato svolto nell'ambito del progetto di Ricerca "Metodologie integrate per le attività di manutenzione e gestione delle opere di difesa del territorio, GestRiver", finanziato dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.

ABSTRACT

ON THE EFFECTS OF DEEP ROOTS PLANTING IN SHALLOW SLOPE STABILITY, RIPARIAN RESTORATION AND EROSION CONTROL

Keywords: shallow slope stability, erosion control, deep root systems, Root Area Ratio

Within Bioengineering techniques, slope vegetation using grass plants with deep roots is an increasingly widespread practice. Such eco-technological solution is applied to mitigate erosive phenomena, for improving slope stability or for riparian restoration, taking advantages also from an environmental sustainability point of view.

The root/soil interaction processes result in both mechanical and hydraulic effects. The shear strength of a vegetated soil increases due to roots acting as a mechanical soil reinforcement; roots also have beneficial influence upon the hydrologic balance of the involved area. Furthermore, selected grass plants can significantly act in reducing the carbon footprint of engineering works, compared to traditional techniques.

The paper presents some preliminary results of wide research activity concerning the evaluation of benefits in using deep roots planting for riparian slope stabilization. In particular, the role of root development in the mechanical contribution is investigated, focusing on the influence of roots on soil porosity and soil water retention properties.