

INDAGINE SULLA PERFORMANCE DI MODELLI PREVISIONALI NELL'ANALISI DI FILTRAZIONE IN REGIME TRANSITORIO DI UNA SEZIONE ARGINALE DEL FIUME SECCHIA

Ilaria Bertolini

Università di Bologna, Scuola di Ingegneria, DICAM

ilaria.bertolini3@unibo.it

Carminè Gerardo Gragnano

Università di Bologna, Scuola di Ingegneria, DICAM

carminè.gragnano2@unibo.it

Guido Gottardi

Università di Bologna, Scuola di Ingegneria, DICAM

guido.gottardi2@unibo.it

Sommario

Il contributo è centrato sulla modellazione della filtrazione in regime transitorio all'interno di una sezione arginale strumentata del fiume Secchia, presso Cavezzo (Modena) nel periodo temporale 2017-2018. Il codice commerciale Hydrus 2D di Pc-Progress è stato utilizzato per condurre tali simulazioni dirette. Differenti modelli idraulici sono stati adottati e messi a confronto al fine di quantificarne la performance e individuare quello più adatto a rappresentare i fenomeni studiati. Il confronto fra la risposta del modello e il comportamento reale della sezione arginale è eseguito sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo, ma in questa sede solamente l'approccio qualitativo verrà presentato. Esso risulta il primo e fondamentale passo nel percorso di valutazione e successiva calibrazione di un modello numerico. Sensori che monitorano il contenuto umido e la suzione sono stati installati nel corpo arginale e forniscono i dati osservati con cui eseguire il confronto diretto con l'*output* del modello.

1. Introduzione

Il più comune approccio adottato per valutare la *performance* di modelli previsionali è mediante la comparazione tra *output* del modello e il set di punti di osservazione. La comparazione può avvenire utilizzando criteri quantitativi e/o qualitativi. I criteri qualitativi si basano sulla comparazione grafica tra punti osservati e simulati, mentre quelli quantitativi sulla performance di metriche o indici. Entrambi gli approcci sono strumenti fondamentali ad una analisi dettagliata del comportamento di modelli previsionali, soprattutto quando a valle è richiesta l'identificazione del migliore modello da adottare. Gli approcci qualitativi sono indubbiamente più facili e immediati poiché grafici (pensiamo per esempio al grafico "punti osservati vs punti simulati") e permettono una facile comunicazione, ma soffrono di una "influenza" più marcata del parere soggettivo del modellatore ed una intrinseca difficoltà quando si lavora con un ingente numero di modelli numerici diversi o modelli numerici le cui *performance* si discostano poco le une dalle altre. Più complessi e meno immediati sono i metodi quantitativi che però garantiscono a valle una valutazione chiara, oggettiva e facilmente confrontabile.

Si possono individuare diverse famiglie di metriche e indici: metriche di accuratezza, metriche di efficienza e metriche di selezione del modello. Ognuna di queste famiglie presenta proprie peculiarità e limiti ed un loro uso combinato risulta sempre vincente per una efficace valutazione quantitativa della *performance* di modelli numerici. Criteri qualitativi e quantitativi insieme permettono di ottenere una panoramica completa sulla prestazione di qualsiasi modello numerico: i criteri qualitativi per una

prima analisi di massima e quelli quantitativi per convergere lo sguardo sul comportamento del modello in particolari condizioni (temporali, spaziali). Il loro uso accoppiato è sempre raccomandato quando possibile.

2. La sezione arginale in esame

Il fiume Secchia è il maggiore affluente destro del Fiume Po, dopo il Panaro, con un bacino imbrifero di 2292 km² e una lunghezza di 172 km. Essendo un fiume appenninico è soggetto ad una alternanza di magre estive e piene invernali particolarmente rapide e irruenti. La sezione arginale scelta si trova 10 km a valle del punto dove il 19 Gennaio 2014 è stato registrato il collasso di una porzione dell'argine destro del fiume che ha causato conseguenze molto severe sia dal punto di vista umano che economico. La sezione in esame è alta 11 m dal piano campagna, con una pendenza verso fiume di 32° e verso lato campagna di 28°. La cresta ha una larghezza di 4.6 m e consente l'accesso ai mezzi di trasporto. La berma lato fiume è larga 5.5 m ed è posizionata a 5.2 m rispetto alla cresta. I due versanti dell'argine sono coperti da bassa vegetazione ripariale, soggetta a sfalcio due volte l'anno. Quattro prove penetrometriche con determinazione delle sovrappressioni neutre CPTU sono state eseguite per tracciare la stratigrafia della sezione in esame. L'argine è costituito da un mix in diverse proporzioni di limo e argilla che diventa passo passo più fine allontanandosi dal corso del fiume. In *Fig.1* è rappresentata la stratigrafia della sezione in esame così come elaborata dallo studio delle prove penetrometriche. L'unità A è una alternanza di limo - limo sabbioso, l'unità A' è costituita da sedimento più grossolano depositato nel corso del tempo dal fiume, l'unità B presenta una granulometria leggermente più fine rispetto alla soprastante unità. L'unità C è sede dell'acquifero superficiale ed è caratterizzata da materiale più granulare. L'unità D, sottostante all'unità C, è costituita da una argilla praticamente uniforme.

3. La strumentazione installata per il monitoraggio in continuo delle grandezze di interesse

Nell'arco temporale 2016-2017 la sezione in esame è stata strumentata con diversi tipi di sensori per una acquisizione in continuo delle grandezze di interesse. Tutti i sensori installati sono venduti da note compagnie che operano specialmente nel campo dell'agricoltura con il compito di monitorare, controllare e incrementare il livello di efficienza nella produzione agricola. Il loro funzionamento e la metodologia di installazione sono state convertite da un uso più agricolo ad uno più ingegneristico per adattarsi al diverso scopo di questa ricerca (Rocchi et al., 2018). Sono stati installati 7 sensori GS3 di Decagon Devices (5 in cresta e 2 in golenia) e 4 sensori SM150-T di Delta-T Device (3 in cresta e 1 in golenia), entrambi per il monitoraggio del contenuto umido. Inoltre nello stesso periodo sono stati installati 9 tensiometri MPS6 di Decagon Device (6 in cresta e 3 in golenia) e 3 tensiometri T8 di UMS (2 in cresta e 1 in golenia) per il monitoraggio delle pressioni neutre (positive e negative) sviluppatesi, mentre 2 Piezometri Casagrande erano già installati in corrispondenza dell'area di studio. Un totale di 25 sensori è dunque installato nella sezione in esame (*Fig.1*). Il sensore T8 misura direttamente il potenziale idrico prendendo come riferimento la pressione atmosferica nel range -85/+100kPa, con una accuratezza nominale di +/- 0.5 kPa. Il sensore T8 non richiede una calibrazione specifica di sito. Il sensore MPS6 misura la permittività dielettrica di un disco poroso in ceramica in equilibrio idrico con il volume di terreno circostante. La permittività dielettrica è una proprietà direttamente correlabile al contenuto umido di terreno e indirettamente al potenziale idrico mediante la conoscenza della curva di ritenzione della pietra porosa che è fornita dal produttore. MPS6 ha una curva a 6 punti di calibrazione e una accuratezza nel range -9 / -100 kPa di +/- 10% delle letture +2kPa. GS3 e SM150T utilizzano un oscillatore per generare una corrente elettrica alternata tra due elettrodi e misurare così la resistenza opposta dal terreno circostante. Entrambi i sensori determinano il contenuto umido volumetrico mediante misura della costante dielettrica del mezzo e applicando in seguito la teoria del Dominio di Frequenza. Un campo magnetico di 70 e 100 MHz viene creato attorno agli aghi metallici del sensore

GS3 ed SM150T, rispettivamente. Entrambi gli strumenti hanno un campo di lettura nel range 0-1 m^3/m^3 con una accuratezza di $\pm 0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Per l'installazione dei sensori sono stati eseguiti 12 sondaggi: in alcuni casi è stata prevista una singola installazione di sensore per foro, in altri casi multiple installazioni (Rocchi et al., 2020).

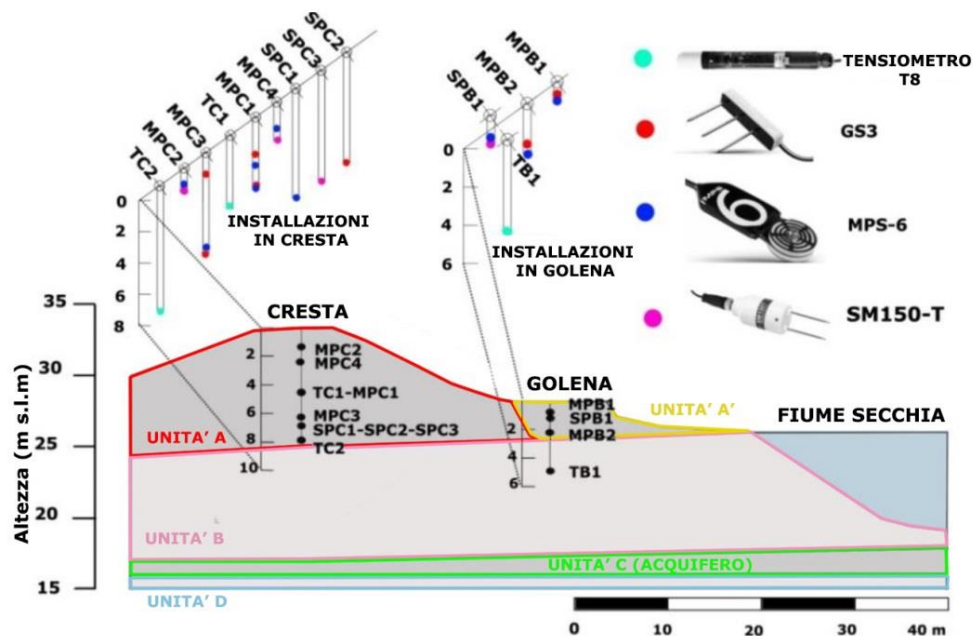


Fig 1. Rappresentazione schematica della sezione strumentata con indicazione del posizionamento dei sensori

4. Il modello numerico FE

Hydrus2D di Pc-Progress è un software commerciale di grande respiro che si occupa della simulazione di flusso di acqua, inquinanti e calore in regime stazionario e transitorio all'interno di un mezzo poroso saturo o non. Nel presente caso di studio, esso è stato scelto e adottato per simulare il flusso di acqua in regime transitorio all'interno dell'argine in esame. Il programma risolve l'equazione di Richards in modo diretto usando un approccio agli Elementi Finiti nello spazio e alle Differenze Finite nel tempo, quando i parametri del modello, le condizioni iniziali e quelle al contorno sono conosciute.

Il profilo 2D esterno della sezione in esame è stato definito in dettaglio mediante opportuna campagna topografica ed è costituito da 47 punti geo-referenziati. Il dominio risultante è lungo 90m dal centro del letto del fiume al campo agricolo che si sviluppa a valle dell'argine ed è alto 23,4m. Punti di osservazione sono stati presi lì dove è stata installata la strumentazione in sito. Le condizioni al contorno applicate al modello sono rappresentate in Fig.2: nessun flusso attraverso il contorno inferiore (assunto impermeabile), il contorno di tipo atmosferico definito da dati di tipo precipitazione, evaporazione e traspirazione con cadenza 30min. Le informazioni atmosferiche sono rilevate da una centralina meteorologica installata a Cortile da Carpi (Lat. 44.778387, Lon. 10.971285) a 7km di distanza dalla sezione in oggetto e liberamente scaricabili dal sito dell'ARPAE (<http://simc.arpae.it/dext3r/>). Il contributo evapo-traspirativo è stato calcolato mediante il software CRITERIA1D sviluppato da ARPAE, che simula il bilancio idrico nel suolo mediante un algoritmo semplificato (*tipping bucket*) alla cui base troviamo il metodo Penman-Monteith (Penman, 1949, Monteith, 1965) modificato da Allen et al (1994). La condizione al contorno tra il corso del fiume e l'area golenale è di tipo Dirichelet: l'altezza idrometrica rilevata dall'idrometro installato a Ponte Bacchello (Lat. 44.747546, Lon. 10.98734) viene fornita nel tempo. L'estremo destro del modello presenta una condizione al contorno del tipo "altezza di pressione costante nel tempo" e definita

dall'altezza della falda lato campagna.

La *mesh* scelta non è strutturata ed è a base triangolare, con dimensione 1m e raffittita fino a una dimensione di 0,3m sul contorno atmosferico e in corrispondenza dei punti di osservazione. La *mesh* risultante è composta da 4788 nodi, 685 elementi 1D e 9231 elementi 2D (vedi Fig.2).

La distribuzione iniziale di pressioni neutre nel terreno (condizione iniziale) è stata elaborata simulando il periodo precedente (dal 30 Gennaio 2017 al 11 Novembre 2017) sempre mediante il codice di calcolo Hydrus2D e importando la distribuzione di pressioni dell'ultimo istante temporale nell'analisi del successivo periodo.

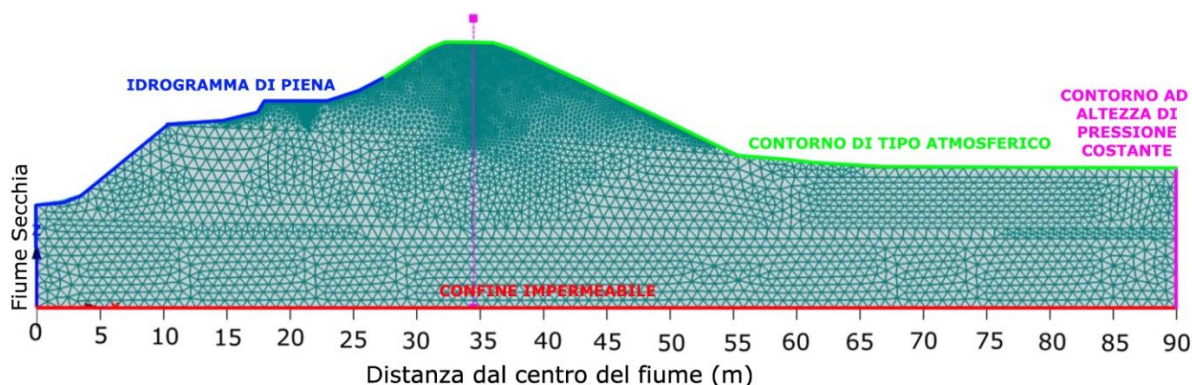


Fig 2. FE Mesh della sezione arginale con indicazione delle condizioni al contorno del modello numerico

5. Valutazione qualitativa della performance dei diversi modelli idraulici

Due diversi modelli idraulici sono stati impiegati per interpretare il comportamento idraulico dei terreni arginali in esame nell'intervallo temporale tra il 12 Novembre 2017 e il 23 Giugno 2018. Per necessità di brevità, non verranno enunciate le equazioni che descrivono le curve di ritenzione (SWRC) e di conducibilità per ognuno dei modelli, ma verranno riportati solamente i riferimenti bibliografici.

- Il modello di Van Genuchten (1980) (acronimo VGM) e la distribuzione statistica dei pori di Mualem (1976) per descrivere la curva di ritenzione SWRC e di conducibilità idraulica $K(h)$, rispettivamente.
- Il modello van Genuchten-Mualem che incorpora l'isteresi sia nella curva di ritenzione che in quella di conducibilità idraulica (acronimo HVGM) al fine di tenere in considerazione la non-univoca relazione che intercorre tra contenuto umido e potenziale idraulico dipendentemente dalla storia di imbibizione/asciugatura (*wetting/drying*) che il campione ha subito.

La performance dei due modelli idraulici nel periodo di indagine è stata confrontata prendendo in considerazione diversi nodi di interesse in corrispondenza dei punti di installazione dei sensori. In particolar modo sono stati considerati i sensori di pressione MPS6-MPC1-4,6m e MPS6-SPC1-7m e di contenuto umido GS3-MPC1-4,5m e GS3-SPC2-7,1m per l'unità A, GS3-MPB2-2,2m (contenuto umido) per l'unità A', e T8-TB1-4,9m (pressione neutra) per l'unità B. Sono stati scelti i punti di interesse più rappresentativi della risposta idraulica dell'argine e che si trovano sufficientemente al di sotto della coltre superficiale in modo da essere solo in minima parte influenzati dai fenomeni evapotraspirativi e in massima parte dal carico idraulico del fiume e delle proprietà di ritenzione dei terreni attraversati dal flusso. Questo perché il contributo evapotraspirativo è stato studiato con un grado di dettaglio inferiore rispetto alle proprietà idrauliche del terreno.

In Fig. 3 si può osservare come il comportamento dei modelli VGM e HVGM sia apparentemente analogo, con curve a prima vista sovrapposte. I modelli idraulici introdotti rappresentano bene il comportamento dei punti di osservazione di tipo pressione neutra nello strato di fondazione B (TB1) e nello strato arginale A (SPC1 ed MPC1), mentre relativamente bene il comportamento in termini di contenuto umido negli strati A' (MPB2) ed A (SPC2 ed MPC1).

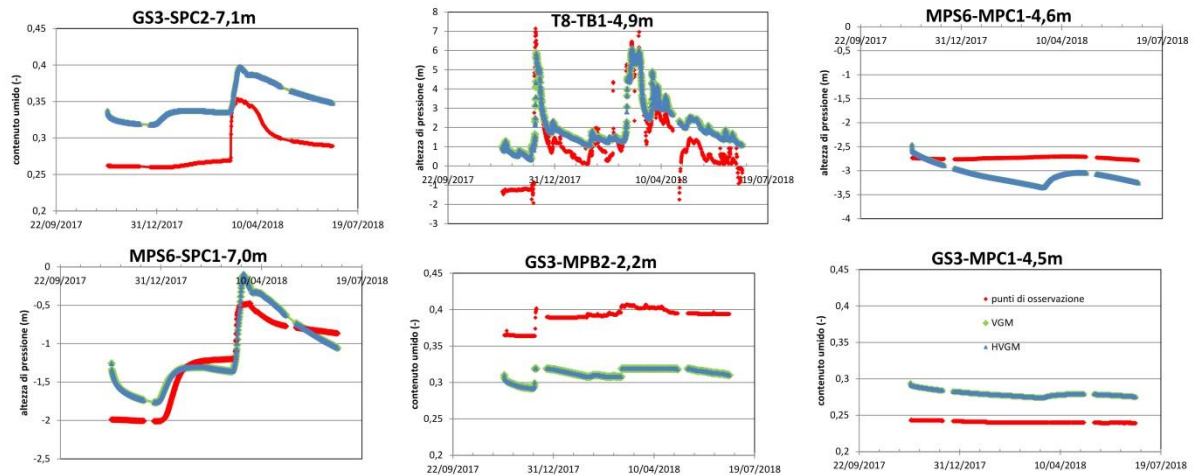


Fig 3. I grafici riportano un confronto tra dati osservati vs dati simulati nel tempo utilizzando VGM e HVGM.

E' anche facile osservare come i modelli simulati siano più responsivi rispetto ai dati osservati (vedi MPS6-MPC1e GS3-MPC1) e come l'influenza delle condizioni iniziali non sia trascurabile sull'intero periodo di simulazione. Il succedersi delle piene invernali e autunnali è in grado di cancellare solo in minima parte la loro influenza, rendendo di grande importanza per il problema in esame una loro precisa determinazione iniziale. Da Fig. 3 non è possibile però estrapolare in modo quantitativo le differenze riscontrate tra dati osservati-simulati in termini di contenuto umido e altezza di pressione così come stimate con i diversi modelli idraulici, elemento per cui bisogna utilizzare sistemi di confronto di maggior dettaglio con l'utilizzo di specifici indicatori e metriche (Bertolini, 2021). Inoltre, un tale tipo di confronto ha come scopo quello di indirizzare la calibrazione di un modello che fornisca una attendibile distribuzione di pressioni neutre nei periodi a maggiore rischio instabilità della sezione arginale, quindi nei periodi di piene a battente idrico elevato e prolungato nel tempo, tale da poter causare imbibizione profonda in tutto il corpo arginale. Per far questo è necessario avere a disposizione un orizzonte temporale più ampio del singolo evento di piena.

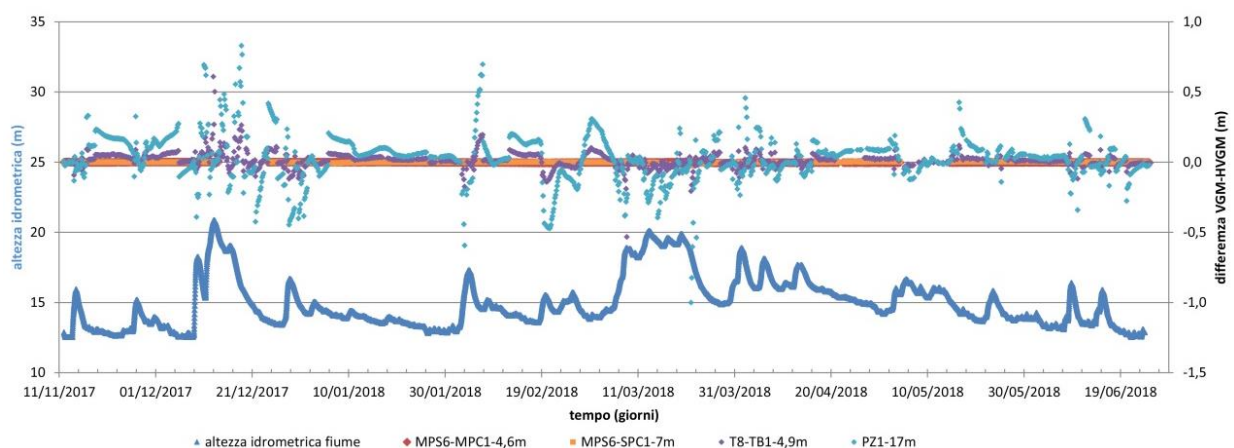


Fig 4. Il grafico riporta le differenze (m di colonna d'acqua) tra i dati simulati usando VGM e HVGM.

Fig.4 mette appunto in luce le differenze (in termini di metri di colonna d'acqua) nella risposta simulata utilizzando i due diversi modelli idraulici (VGM, HVGM) nel periodo novembre 2017 –

giugno 2018, in cui si alternano periodi di magra ordinaria e differenti eventi di piena. Le maggiori differenze sono riscontrate in corrispondenza delle piene più rilevanti (per altezza idrometrica raggiunta o persistenza nel tempo) mentre nei periodi di magra è osservabile una risposta simile tra i due modelli. Tali differenze non sono trascurabili poichè rilevate nei periodi più cruciali in vista di future analisi di stabilità. VGM e HVGM hanno lo stesso andamento nei punti di controllo all'interno dello strato arginale A (MPS6-MPC1; MPS6-SPC1), mentre andamento differente all'interno dell'area golenale (T8-TB1). Questo è dovuto al fatto che la durata di un evento di piena ha grande influenza sul comportamento isteretico dei terreni arginali. Se essa è piccola rispetto alla permeabilità dei terreni in esame, il fronte saturo permeerà poco all'interno del corpo arginale con conseguenti piccoli cambiamenti in termini di pressioni neutre. La golenale è l'area primariamente interessata dagli stimoli idraulici, dove essi permangono per maggior tempo. Per questo motivo le maggiori differenze tra i due modelli idraulici, isteretico e non, sono rilevate proprio in questa area e in corrispondenza dei maggiori eventi di piena.

6. Conclusioni

La valutazione qualitativa della performance dei modelli numerici utilizzati è un primo passo necessario verso la scelta del modello idraulico che meglio interpreta il comportamento reale della sezione arginale ed una dettagliata calibrazione dei relativi parametri. E' poi necessario affiancare uno studio di tipo quantitativo che, basandosi sui risultati di confronti preliminari estesi all'intero *set* dei dati di monitoraggio, focalizzi poi l'attenzione sulla performance di specifici punti di osservazione in determinati intervalli temporali, in particolare su quelli di maggior interesse per l'analisi del problema oggetto di studio. L'uso di metriche ed indici risulta a tal fine fondamentale per formulare un giudizio obiettivo, condivisibile e chiaro. Il presente caso studio, qui solo preliminarmente esposto con alcuni confronti qualitativi, risulta un complesso esempio di modello multi-parametrico in regime transitorio, che richiede pertanto una calibrazione attenta dei parametri idraulici degli strati di terreno in condizione di parziale saturazione.

Bibliografia

- Allen R.G., Smith M., Pereira L.S., Perrier A. (1994). "An update for the calculation of reference evapotranspiration". *ICID Bulletin*.
- Bertolini I (2021), A methodological approach for the performance optimization of transient seepage models through inverse analysis, Ph.D thesis.
- D'Alpaos L., Brath A., Fioravante V., Gottardi G., Mignosa P. and Orlandini S. (2014). Relazione tecnico-scientifica sulle cause del collasso dell'argine del fiume Secchia avvenuto il giorno 19 Gennaio 2014 presso la frazione San Matteo. Available online <http://www.regione.emilia-romagna.it>.
- Monteith J.L. (1965). "Evaporation and environment". *Proc. Symposium of the Society for Experimental Biology*, 19,205–234.
- Mualem Y. (1976). "A new model predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media". *Water Resources Research* 12, 513–522.
- Penman H.L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare soil and grass". *Proceedings of the Royal Society of London*, 193, 120–145.
- Rocchi I., Gragnano C.G., Govoni L., Mentani A., Bittelli M., Castiglione P., Buzzi O., Gottardi G. (2018). A new technique for deep in situ measurements of soil water retention behaviour. *Geotechnical Research*, vol 5.
- Rocchi I., Gragnano C.G., Govoni L., Bittelli M., Gottardi G.(2020) Assessing the performance of a versatile and affordable geotechnical monitoring system for river embankments. *Physics and Chemistry of the Earth*, parts A/B/C.
- van Genuchten M.(1980). "A closed-form equation for predicting the Hydraulic conductivity of unsaturated soils". *Soil Science Society of America Journal*, 44(5).