

STUDIO DEL TRASPORTO DI CONTAMINANTI IN MEZZO POROSO ETEROGENEO MEDIANTE UNA INSTALLAZIONE SPERIMENTALE DI LABORATORIO

Riccardo Avanzi^{1*}, *Zi Chen*², *Maria Giovanna Tanda*¹ & *Andrea Zanini*¹

(1) Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Parma

(2) Universitat Politècnica de València, Research Institute of Water and Environmental Engineering, Valencia, Spain

*email: nome.cognome@unipr.it

ASPETTI CHIAVE

- Esperienze in laboratorio sui mezzi porosi eterogenei
- Trasporto e dispersione di traccianti in sandbox
- Rilevazione ottica di concentrazione di fluorescina
- Rilevazione dell'evoluzione di pennacchio di tracciante su mezzo poroso eterogeneo bimodale

1 INTRODUZIONE

L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di analizzare il trasporto e la dispersione di inquinanti mediante esperimenti in laboratorio su vasca di filtrazione. Il ricorso agli esperimenti di laboratorio nell'ambito delle acque sotterranee è sempre di grande interesse e utilità in quanto l'osservazione dei processi in condizioni controllate permette di concentrare l'attenzione dei ricercatori sulle problematiche di maggiore complessità (Cupola et al., 2015; Tatti et al., 2016, 2018). L'installazione, realizzata nel laboratorio di Idraulica e Costruzioni Idrauliche del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università degli Studi di Parma, permette il monitoraggio, per mezzo di una tecnica fotografica, dell'evoluzione di un pennacchio di un soluto fluorescente immesso in un mezzo poroso eterogeneo. Lo scopo dell'attività è quello di raccogliere dati sperimentali, affidabili ed in condizioni note, utili per i ricercatori che si occupano delle problematiche connesse con l'inquinamento delle falde acquifere. In particolare gli scriventi sono interessati alla validazione di procedure numeriche mirate alla stima dei parametri idraulici, della posizione della sorgente di contaminante e dell'andamento del suo rilascio nel tempo.

2 DESCRIZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE

Il modello fisico (Figura 1) permette di simulare il comportamento bidimensionale in sezione di un acquifero freatico con lo scopo di poter riprodurre sperimentalmente ed analizzare differenti fenomeni che possono verificarsi all'interno delle falde acquifere. I fenomeni di interesse variano tra la visualizzazione della superficie piezometrica di falde freatiche, l'individuazione dei parametri idraulici e idrodispersivi del mezzo poroso e la rappresentazione del trasporto 2-D sul piano verticale. In precedenza il modello, riempito di un mezzo poroso omogeneo, è stato utilizzato per stimare la dispersività del mezzo poroso (Citarella et al., 2015) e per validare procedure di individuazione della sorgente di contaminante (Cupola et al., 2015).

Il modello, a forma di un parallelepipedo, è stato realizzato componendo lastre trasparenti di plexiglas di spessore 20 mm per le pareti verticali e di 30 mm per la base. Le dimensioni interne sono di $116 \times 70 \times 10$ cm³. Il contenitore è suddiviso in tre parti in modo da formare due camere di dimensioni planimetriche pari a 10×10 cm², una di monte e l'altra di valle provviste di setti a sfioro, utili a garantire un dislivello idrico noto e stabile; la sezione centrale di lunghezza 96 cm, atta a contenere il mezzo poroso, è stata delimitata a mezzo di griglie in acciaio con fori di diametro 1 mm ricoperte con un geotessuto, per trattenere il mezzo poroso costituito da sfere di vetro del diametro utilizzato per le esperienze (1 e 4 mm). L'allestimento si completa con un circuito idraulico alimentato da una pompa centrifuga con intervallo di lavoro 6 - 250 ml/s; l'acqua viene prelevata da un serbatoio di 70 litri; successivamente essa attraversa il mezzo poroso e può essere smaltita direttamente in fognatura, oppure può, attraverso un sistema di ricircolo, defluire nuovamente nella vasca di accumulo. Nel caso di scarico in fognatura il serbatoio viene alimentato in continuo da una condotta

adduttrice munita di un dispositivo di controllo regolato da un galleggiante. La portata viene misurata attraverso una microturbina collegata ad un sistema di acquisizione dati.

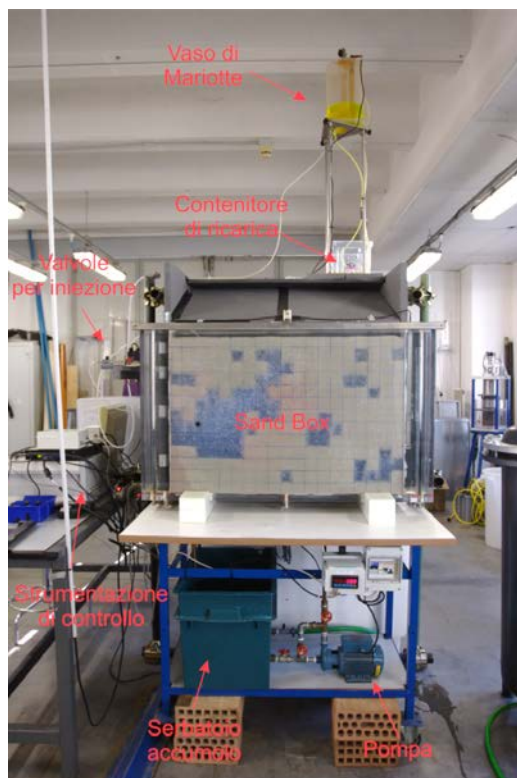


Figura 1. Quadro generale dell'apparato sperimentale (vista frontale).

Il mezzo poroso impiegato è costituito da sfere di vetro di dimensioni rispettivamente di 1 e 4 millimetri che, nel riempimento della vasca di filtrazione, sono state tenute separate. La scelta di tale materiale è dovuta alla facile reperibilità, la buona prestazione nel riprodurre un terreno e alla facilità di utilizzo, pulizia e riciclo per eventuali altri esperimenti. L'operazione di inserimento delle sfere è avvenuta in maniera tale da garantire l'omogeneità di compattazione. Per quanto riguarda le caratteristiche idrauliche del mezzo, attraverso prove sperimentali con permeametro a carico fisso, effettuate nel laboratorio di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, è stata stimata la permeabilità in $7 \cdot 10^{-3}$ m/s per le sfere da 1 mm e $1 \cdot 10^{-1}$ m/s per quelle da 4 mm. Al fine di semplificare il processo di riempimento, per riprodurre le eterogeneità si è scelto di dividere il volume totale in blocchi da 5×5 cm² e della profondità di 10 cm. La distribuzione spaziale di questi blocchi è basata sulla generazione di un campo stocastico con distribuzione log-normale e covarianza di tipo esponenziale, reso successivamente bimodale per consentire la realizzazione con sferette di due diametri.

All'interno del mezzo poroso è stato inserito un sistema di iniezione del tracciante, consistente in fluoresceina sodica. Questa è caratterizzata dalla distinzione netta tra il campo di eccitazione e quello di emissione; più specificamente l'eccitazione può avvenire o con l'utilizzo di raggi ultravioletti (UV) ad una lunghezza d'onda di $\lambda = 256$ nm o con luce blu con $\lambda = 490$ nm. La risposta, ovvero la restituzione dell'energia immagazzinata, avviene con radiazione nel campo del visibile ma ad una frequenza inferiore a causa di dissipazioni energetiche interne; in particolare la lunghezza d'onda d'uscita è $\lambda = 520$ nm corrispondente alla luce verde. Al fine di ridurre al minimo la contaminazione luminosa da luce esterna è stata costruita una piccola camera oscura intorno all'apparato, la fotocamera e al sistema di illuminazione a luce blu. La fotocamera utilizzata è una Canon EOS 40D, che ha una risoluzione massima di 10.1 MPixel, con un obiettivo grandangolare Canon 16/35 mm; l'immagine è catturata alla massima risoluzione, immagazzinata in formato RAW ed importata in MATLAB, dove successive elaborazioni forniscono la trasformazione in concentrazione assoluta [mg/l] della luminosità [0-4095], registrata con profondità di colore a 36 bpp (12 bit per canale).

Per l'immissione controllata ed uniforme del tracciante è stato costruito un apposito diffusore realizzato con un cilindro di ottone collocato nel mezzo poroso. Il tracciante, contenuto in soluzione acquosa all'interno di un vaso di Mariotte che ne garantisce il carico costante, viene convogliato al diffusore tramite un tubicino semirigido munito di valvola di controllo, utile alla regolazione dell'immissione.

Il fotogramma è stato referenziato tramite l'apposizione di markers in 10 punti di riferimento sui bordi della parete di ripresa; i centri di questi, rilevati con precisione del decimo di millimetro, costituiscono i punti di appoggio per una trasformazione proiettiva dell'immagine, ottenendo infine un ritaglio ed un raddrizzamento del fotogramma. Ulteriori errori di distorsione dovuti all'ottica della macchina fotografica sono stati valutati e ritenuti trascurabili.

L'esperimento tipo consiste in una iniezione controllata del tracciante nel mezzo poroso, la sua eccitazione mediante irradiazione a luce blu e la ripresa fotografica della fluorescenza da esso emessa (Figura 2a). In seguito i fotogrammi catturati vengono elaborati per ricostruire il valore della concentrazione dell'inquinante all'interno dell'acquifero (Figura 2b).

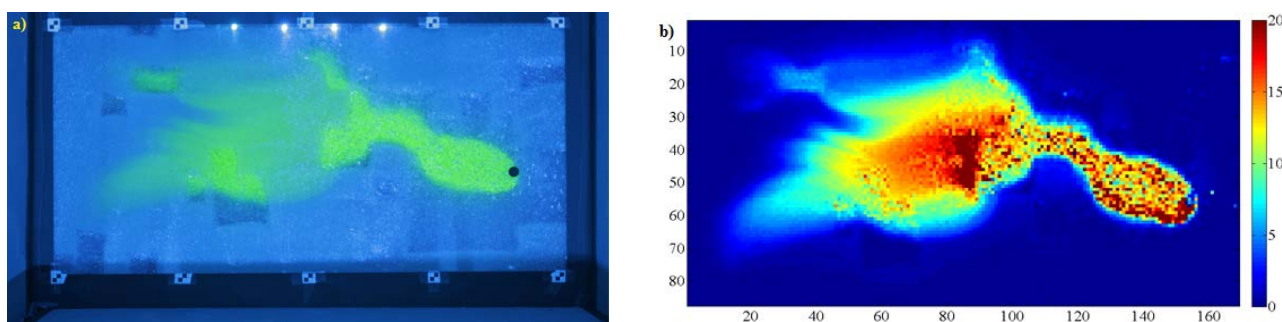


Figura 2. a) foto grezza; b) Mappa di concentrazione in mg/l ricostruita sulla base della elaborazione del grigio.

Sono state eseguite differenti tipologie di prove, a portata d'iniezione differente, per osservare come lo sviluppo del pennacchio evolve in situazioni diverse. In particolare le prove eseguite sono: a portata costante, ad impulso, a serie di impulsi ed a portata variabile.

Una fase molto importante nella sperimentazione è stata la calibrazione del processo di traduzione dell'intensità luminosa in concentrazione del tracciante; essa è realizzata saturando il mezzo poroso ad una concentrazione nota e catturando, attraverso le fotografie, l'intensità luminosa che tale concentrazione restituisce per ogni pixel del dominio di studio. Effettuando questa procedura per ogni pixel e per diverse concentrazioni, si è in grado di correlare una qualsiasi intensità luminosa alla relativa concentrazione. Una nuova calibrazione è stata realizzata immediatamente prima di ogni ciclo di esperienze.

3 MODELLO NUMERICO

Al fine di comprendere al meglio il processo del trasporto è stato realizzato un modello numerico dell'installazione sperimentale che riproduce sia la reale distribuzione delle sfere di vetro che le caratteristiche dell'iniezione (tempo e concentrazione immessa). Si è scelto di utilizzare MODFLOW (Harbaugh et al., 2005) per simulare il flusso e MT3D (Zhang et al., 1999) per il trasporto. La vasca di filtrazione è stata rappresentata da una griglia alle differenze finite avente: 97 celle lungo la direzione orizzontale x: 95 di esse hanno dimensione pari ad 1 cm mentre la prima e l'ultima di 0.6 cm per poter rappresentare al meglio le condizioni al contorno; 70 celle lungo la direzione verticale z della dimensione di 1 cm; 1 cella lungo la profondità, cioè l'asse y, di dimensione 10 cm.

La prima e l'ultima colonna (condizioni a carico assegnato) rappresentano le camere a carico costante che garantiscono il flusso all'interno del mezzo poroso. L'iniezione è stata rappresentata come un pozzo di ricarica.

La Figura 3 mostra come esempio i risultati della simulazione di flusso e trasporto in termini di distribuzione di un contaminante a seguito di una immissione costante.

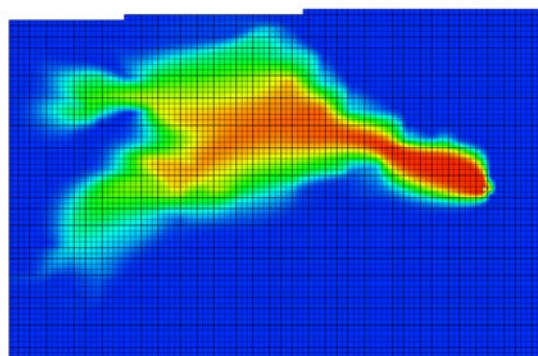


Figura 3. Modello numerico, distribuzione del tracciante a $t=1100$ secondi.

Si sono inseriti inizialmente dei parametri idro dispersivi di primo tentativo basati sulle esperienze precedenti e, attraverso il software PEST (Doherty, 2008), si è cercato quel set di parametri con i quali fossero minimizzate le differenze tra dati sperimentali (portate e concentrazioni osservate) e i dati modellati.

4 CONCLUSIONI

Questo studio ha riguardato il problema del trasporto di inquinanti all'interno di una falda freatica mediante l'utilizzo di una vasca di filtrazione riempita di un mezzo poroso (sandbox). La tipologia di acquifero realizzata è contraddistinta da una eterogeneità di tipo non Gaussiano che risulta poco studiata in letteratura, soprattutto con riguardo ai problemi di trasporto.

L'esperienza acquisita durante gli esperimenti effettuati sul mezzo omogeneo (Citarella et al., 2015) ha consentito di verificare la correttezza dei dati raccolti, mediante il controllo del bilancio di massa. Inoltre la procedura fotografica messa a punto dagli scriventi, si è dimostrata adeguata anche per lo studio del fenomeno di trasporto in un mezzo poroso eterogeneo.

L'installazione sperimentale ha permesso di tarare un modello numerico di un mezzo poroso eterogeneo sia dal punto di vista dei parametri idraulici che quelli dispersivi. Il modello numerico così tarato permette di simulare le più svariate condizioni di immissione ed è una utile fonte di dati per la validazione di procedure numeriche di stima dei parametri idraulici, della posizione della sorgente di contaminante e dell'andamento del suo rilascio nel tempo.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier Pub. Co., New York, 1972.
- Citarella D., Cupola F., Tanda M.G. & Zanini A. Evaluation of dispersivity coefficients by means of a laboratory image analysis, *Journal of contaminant hydrology*, 2015, 172:10-23.
- Cupola, F., Tanda, M.G. & Zanini, A. Laboratory sandbox validation of pollutant source location methods, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, 29(1):169-182.
- Doherty J. PEST, Model Independent Parameter Estimation. Addendum to User Manual: 5th Edition. <http://www.sspa.com/PEST/>. Watermark Numerical Computing, Brisbane, Queensland Australia, 2008.
- Harbaugh, A. W., E. W. Banta, et al. MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model- the Ground-Water Flow Process. U.S Geological Survey Techniques and Method: 6-A16, Reston, Virginia, 2005.
- Zheng, C. & Wang P. P. MT3DMS: A modular three-dimension multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reaction of contaminants in ground-water system; Documentation and user's guide. 1999, Vicksburg, MS, U.S. Army Engineer Research and Development Center N° SERDP-99-1. Vicksburg, MS.
- Tatti F., Papini M.P., Sappa G., Raboni M., Arjmand F. & Viotti, P. Contaminant back-diffusion from low-permeability layers as affected by groundwater velocity: A laboratory investigation by box model and image analysis, *Science of the Total Environment*, 2018, volume 622-623: 164 – 171.
- Tatti F., Petrangeli Papini M., Raboni M. & Viotti P. Image analysis procedure for studying back-diffusion phenomena from low-permeability layers in laboratory tests. *Sci. Rep.*, 2016, 6:30400.