

# RICARICA ARTIFICIALE DI ACQUIFERI PREALPINI. MONITORAGGIO E MODELLAZIONE DEL SITO DI MERETO, FRIULI

Pietro Teatini<sup>1</sup>, Andrea Comerlati<sup>1,2</sup>, Grazia Martelli<sup>3</sup>, Massimo Canali<sup>4</sup> & Giorgio Mattassi<sup>5</sup>

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale, Università di Padova; (2) C+P Engineers, San Pietro in Cariano (VR); (3) Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura, Università di Udine; (4) Consorzio di Bonifica Pianura Friulana – ex Ledra-Tagliamento (UD); (5) Dipartimento Provinciale di Udine, ARPA-FVG

## ASPETTI CHIAVE

- Un test massivo di ricarica artificiale di acquiferi prealpini è stato condotto a Mereto (UD) tra marzo e ottobre 2014. Un volume di  $\sim 10^3$  m<sup>3</sup>/giorno è stato infiltrato attraverso un bacino di estensione 50×13 m<sup>2</sup> e profondità 6 m
- Un modello locale 3D agli EF dell'acquifero freatico è stato calibrato utilizzando i risultati del monitoraggio idrologico e idrogeofisico del test
- Un modello numerico alla scala dell'alta pianura friulana ha evidenziato come l'utilizzo simultaneo dei bacini di ricarica presenti sul territorio possa contrastare l'abbassamento della falda freatica

## 1. INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni la risorsa idrica sotterranea negli acquiferi prealpini è risultata oggetto di un crescente utilizzo per usi civili, agricoli e industriali e, contemporaneamente, di una minore ricarica naturale a seguito di un generale decremento degli apporti forniti dalla precipitazione, una crescente urbanizzazione nelle zone di ricarica, le modifiche degli alvei fluviali e dei sistemi di irrigazione. Ne è derivata una marcata riduzione delle quote piezometriche, uno spostamento verso valle della linea delle risorgive ed una perdita delle loro portate di sfioro. Anche l'alta pianura friulana (Figura 1a) ha sperimentato negli ultimi decenni un progressivo e continuo abbassamento della falda freatica (in media 5 m negli ultimi 40-50 anni) con una conseguente migrazione verso mare della linea delle risorgive di circa 1 km rispetto agli anni 1930 (Martelli & Granati, 2010).

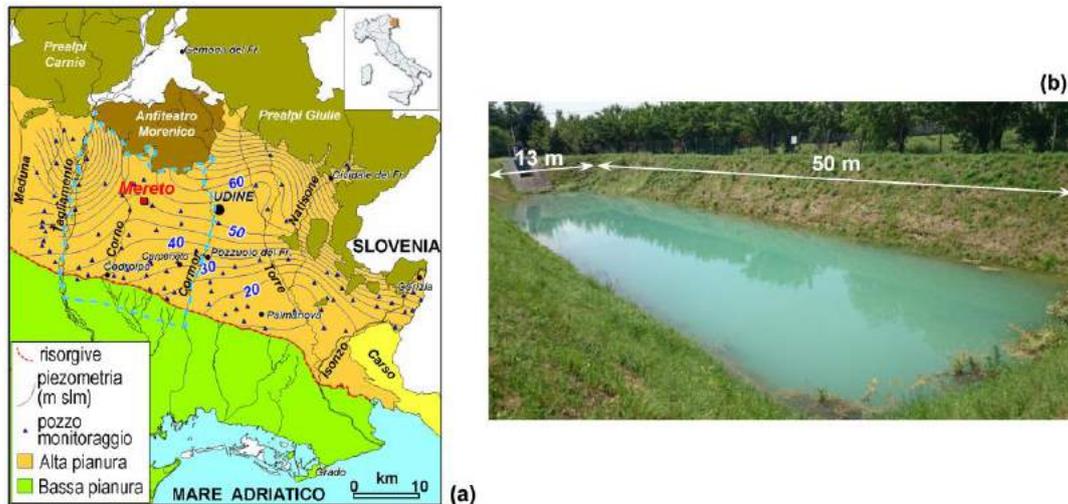
La ricarica "artificiale" (o meglio "in condizioni controllate") rappresenta oggi una delle strategie per ripristinare l'equilibrio idrico delle falde. Benché programmi di ricarica di acquiferi siano diffusamente attuati sin dal XIX secolo in diverse nazioni, ad esempio nelle regioni aride del Mediterraneo, in India, Stati Uniti e Spagna (e.g., Chaieb et al., 2013; Sanchez-Vila et al., 2012), in Italia si è ancora in fase di sola sperimentazione e ricerca. Ciò principalmente a causa della mancanza nel piano normativo nazionale e regionale di un'adeguata regolamentazione (Bonfanti & Capone, 2014).

Il presente contributo s'inserisce in quest'ambito. Nell'ambito del Progetto EU LIFE+ WARBO (<http://www.warbo-life.eu/>), un esperimento di ricarica controllata è stato condotto tra marzo e ottobre 2014 a Mereto (UD) utilizzando un bacino d'infiltrazione. Il bacino costituiva la vasca di decantazione di un più complesso sistema di ravvenamento della falda freatica realizzato dal Consorzio Pianura Friulana nel 2000-2001 e il cui utilizzo è stato bloccato dalla Procura della Repubblica di Udine nel 2002 (Civita, 2005).

Il monitoraggio della ricarica, condotto per mezzo di piezometri e metodologie idro-geofisiche, ha permesso un'accurata caratterizzazione dell'acquifero freatico e la calibrazione di un modello numerico 3D locale della falda freatica (Teatini et al., 2015). Il possibile effetto della ricarica artificiale è stato quindi analizzato nel contesto del deflusso naturale dell'acquifero freatico dell'alta pianura friulana. Per mezzo di un modello di flusso sotterraneo a scala regionale, sviluppato utilizzando i numerosi rilievi idrogeologici a disposizione (Martelli & Granati, 2010), e calibrato su dati piezometrici di letteratura, sono stati simulati alcuni scenari di ricarica artificiale, debitamente quantificati sulla base dei risultati della modellistica a scala locale. E' stata quindi eseguita una prima valutazione delle potenzialità nella ricarica controllata nella gestione dell'equilibrio idrico della falda freatica friulana.

## 2. L'ESPERIMENTO DI RICARICA

Il sito di Mereto è ubicato una decina di chilometri a Sud dell'anfiteatro morenico, in sinistra del Fiume Corno (Figura 1a).



**Figura 1.** (a) Principali caratteristiche idrogeologiche della pianura Friulana con indicazione del sito di ricarica di Mereto. La linea tratteggiata in azzurro rappresenta l'estensione del modello regionale. (b) Foto del bacino di ricarica di Mereto durante il test di infiltrazione condotto nel 2014.

La quota media del piano campagna e la profondità media della falda freatica sono pari rispettivamente a 102 m slm e 49 m. Acquisizioni geofisiche (sismica, GPR, tomografia elettrica) e analisi litostratigrafiche sui numerosi pozzi presenti nell'area hanno permesso di caratterizzare la struttura idrogeologica dell'area: nei 70 m più superficiali sono stati individuati quattro orizzonti principali (denominati A1–A4) costituiti, dall'alto verso il basso, da ghiaia (A1, spessore  $s \approx 15$  m), ghiaia argillosa (A2,  $s \approx 9$  m), ghiaia ( $s \approx 21$  m) e conglomerato fratturato (A4,  $s \approx 25$  m), caratterizzati da una geometria sostanzialmente planare.

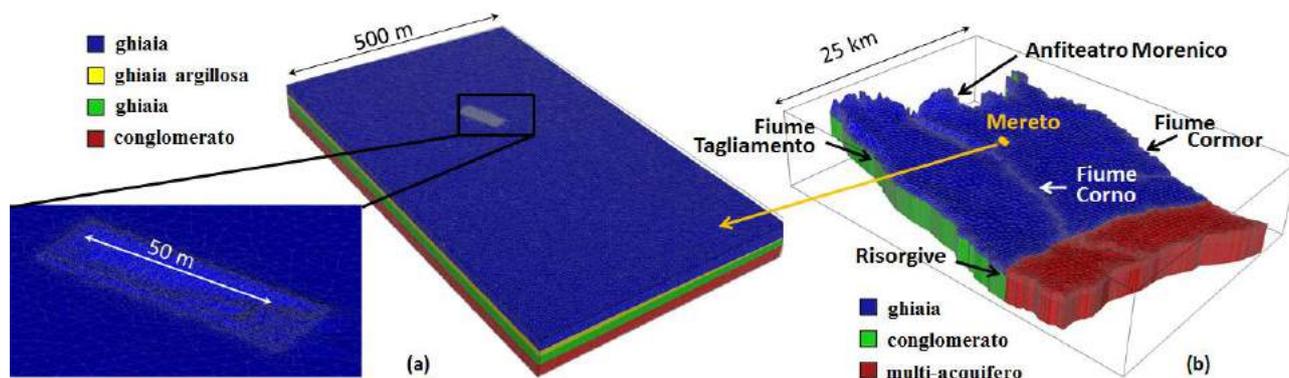
Il bacino d'infiltrazione è caratterizzato da un'estensione areale di  $50 \times 13 \text{ m}^2$  ( $45 \times 7 \text{ m}^2$  al fondo) e una profondità di 6 m (Figura 1b); la sua geometria che è stata caratterizzata per mezzo di un'acquisizione Lidar (Figura 2a, zoom). Il test di ricarica, protratto tra il 19/03/2014 ed il 24/10/2014, è consistito in alcune fasi di riempimento e svuotamento della vasca, permettendo così una buona caratterizzazione della fase transitoria del processo d'infiltrazione. Il volume complessivamente infiltrato è stato pari a circa  $220 \times 10^3 \text{ m}^3$ , (circa  $10^3 \text{ m}^3/\text{giorno}$ ), con l'acqua che è recapitata attraverso una derivazione del Fiume Tagliamento. Un'appropriata caratterizzazione idro-chimica ha evidenziato la compatibilità tra l'acqua di strato e l'acqua di falda (Martelli et al., 2014).

Il monitoraggio spazio-temporale delle variabili idrodinamiche è stato condotto attraverso la registrazione in continuo del volume d'acqua immesso e del livello idrico nella vasca, della quota della falda in piezometri a 15 e a 70 m di profondità, e per mezzo di acquisizioni di tomografia elettrica in modalità "time-lapse" con due estendimenti posti rispettivamente sul fondo e lungo il margine del bacino di ricarica. I dati del monitoraggio hanno evidenziato: i) la formazione di una falda sospesa al di sopra del livello A2; ii) un innalzamento limitato (nell'ordine di 10 cm) della falda regionale localizzata nel livello A4; iii) la sedimentazione sul fondo del bacino di uno strato di materiale fine trasportato in sospensione dalla canaletta di adduzione in occasione di lavori di sistemazione idraulica, con conseguente effetto "clogging" che ha ridotto la capacità d'infiltrazione nella seconda parte del test di ricarica.

### 3. MODELLAZIONE NUMERICA

FLOW3D, il modulo per la simulazione del flusso sotterraneo del codice di modellazione idrologica CATHY (Camporese et al., 2010), è stato utilizzato per simulare il test di infiltrazione condotto a Mereto e valutare gli effetti di alcuni scenari di ricarica artificiale sulla falda freatica a scala regionale. FLOW3D risolve l'equazione di Richard, che per un sistema tridimensionale può scriversi come:

$$\sigma(S_w) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot [K_s K_r(S_w) (\nabla \psi + \eta_z)] + q \quad (1)$$



**Figura 2.** Griglie tridimensionali agli elementi finiti utilizzate (a) per la simulazione alla scala locale del test di ricarica controllata condotto a Mereto e (b) per la valutazione di alcuni scenari di ricarica a scala regionale. I colori sono rappresentativi delle diverse unità litostratigrafiche. La geometria della vasca è evidenziata nello zoom in (a).

dove  $\sigma(S_w) = S_w S_s + \phi \partial S_w / \partial \psi$ ,  $S_w$  è il grado di saturazione,  $S_s$  il coefficiente di immagazzinamento elastico,  $\phi$  la porosità,  $\psi$  il potenziale piezometrico,  $\nabla$  l'operatore gradiente,  $K_s$  il tensore di conducibilità idraulica,  $K_r(\psi)$  la conducibilità idraulica relativa,  $\eta_z = (0, 0, 1)^T$ ,  $z$  la coordinata verticale, e  $q_s$  il termine di sorgente o prelievo. L'equazione (1) è altamente non lineare in quanto i termini di immagazzinamento e la conducibilità dipendono dal potenziale piezometrico; la linearizzazione è ottenuta utilizzando gli schemi iterativi di Picard o Newton. Le caratteristiche idrauliche del suolo nella zona a parziale saturazione sono espresse attraverso il modello di van Genuchten.

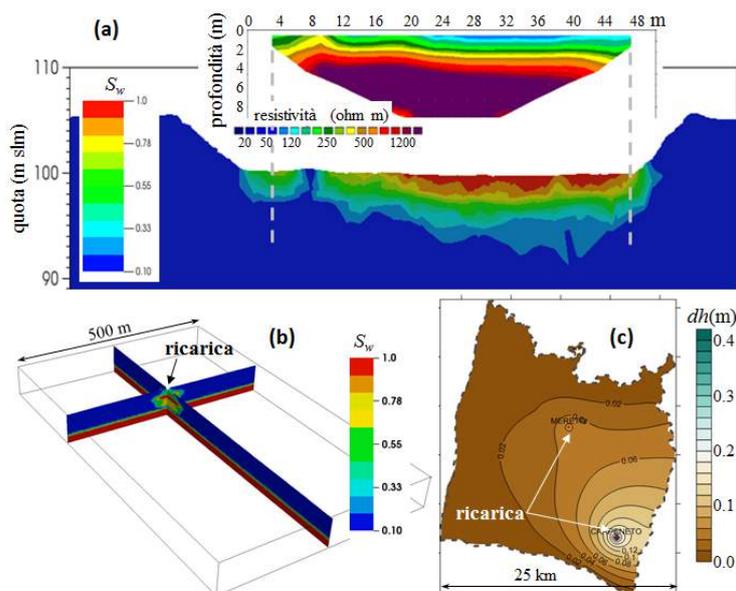
### 1.1 Modellistica alla scala del bacino d'infiltrazione

Il dominio simulato, centrato sul bacino di ricarica, ha un'estensione di 500x810 m ed è delimitato superiormente dalla superficie del terreno e inferiormente da un basamento posto ad una quota di 35 m sul lmm, per uno spessore complessivo del dominio che in media è pari a 65 m (Figura 2a). Il dominio è stato discretizzato con una griglia tridimensionale ad elementi tetraedrici formata da 551'978 nodi e di 3'272'223 elementi e generata utilizzando la sequenza litologica ricostruita avvalendosi delle informazioni stratigrafiche a disposizione. Gli elementi sono caratterizzati da una dimensione che varia da 2 m di lato nelle zone più prossime al lago, a 6 m in prossimità alla frontiera del dominio (Teatini et al., 2015).

Utilizzando per i parametri di van Genuchten dei valori desunti da alcune curve granulometriche ( $\psi_s = 1.88$  m,  $n = 0.3$ ,  $S_w = 0.1$ ), la calibrazione del modello sul test di ricarica ha consentito di caratterizzare le proprietà idrauliche dei diversi layer geologici: 1) la permeabilità dell'ammasso ghiaioso è pari a  $2 \times 10^{-5}$  m/s (calibrazione con i dati della tomografia elettrica, Figura 3a); 2) l'importanza di livelli a minore permeabilità (circa un ordine di grandezza rispetto alla ghiaia) nella formazione di acquiferi sospesi temporanei (calibrazione con i dati dei piezometri a 15 m di profondità, Figura 3b); 3) l'elevata permeabilità ( $\sim 1.1 \times 10^{-3}$  m/s) del conglomerato fratturato sede dell'acquifero regionale tale per cui una ricarica localizzata produce una crescita del livello piezometrico di poche decine di cm (calibrazione utilizzando i livelli registrati ai pozzi di profondità 60-70 m). Un'appropriata legge di riduzione del valore di conducibilità idraulica è stata implementata nello strato A1 per considerare l'effetto clogging ( $K_s$  da  $2 \times 10^{-5}$  m/s a  $0.8 \times 10^{-5}$  m/s).

### 1.2 Modellistica a scala regionale

La modellizzazione regionale è stata condotta per l'alta pianura Friulana considerando l'acquifero indifferenziato delimitato dall'Anfiteatro Morenico (Nord), il fiume Tagliamento (ad Ovest) il fiume Cormor (Est) ed un allineamento 4-5 km a Sud della linea delle risorgive (verso Sud) (Figura 1a). Il dominio considerato ha un'estensione di circa 35x24 km ed è delimitato superiormente dal piano campagna ed inferiormente dal bottom del conglomerato. Per rappresentare accuratamente la topografia del terreno e la litostratigrafia, la griglia di calcolo è composta di 138'958 nodi e di 732'718 tetraedri (Figura 2b). Una prima serie di simulazioni è stata condotta in regime stazionario per calibrare i parametri idrologici sulla piezometria media misurata nel periodo 1990-2000.



**Figura 3.** (a) Confronto tra il grado di saturazione calcolato dopo 7 ore dall'inizio del test di ricarica e la sezione di resistività ottenuta allo stesso istante dalla tomografia elettrica eseguita sul fondo della vasca. (b) Grado di saturazione dopo 50 giorni dall'inizio della ricarica; è evidente la formazione di una falda sospesa (in rosso). (c) Risultato del modello regionale in termini d'innalzamento del livello della falda freatica per lo scenario con ricarica a Mereto e Carpeneto (12'000 m<sup>3</sup>/giorno).

In accordo con le stime a disposizione (Martelli & Granati, 2010), il sistema acquifero è alimentato dal Tagliamento con un flusso giornaliero pari a circa 3'900'000 m<sup>3</sup>/giorno, da una precipitazione efficace di circa 890'000 m<sup>3</sup>/giorno (730 mm/anno su una superficie circa pari a 444.8 km<sup>2</sup>), e da una ricarica di 780'000 m<sup>3</sup>/giorno dall'Anfiteatro Morenico. Il Cormor è sostanzialmente un asse di simmetria per il sistema sotterraneo (flusso nullo). Sono quindi stati implementati alcuni scenari di ricarica sulla base dei risultati della simulazione a scala locale. Con l'utilizzo del solo bacino di Mereto (ricarica di 1'000 m<sup>3</sup>/giorno) non si verifica una variazione significativa della quota della falda freatica; considerando l'uso simultaneo dei siti di ricarica di Mereto e Carpeneto (Figura 1a) realizzati dal Consorzio di Bonifica Pianura Friulana (per una portata complessiva dell'ordine di 12'000 m<sup>3</sup>/giorno) di ottiene un innalzamento della quota di falda fino a 0.4 m (Figura 3c), con una traslazione verso monte della linea delle risorgive pari a 30 m. Risultati ancora più significativi potrebbero essere ottenuti qualora la ricarica controllata venisse condotta utilizzando anche altri siti già presenti, ad esempio le numerose cave di materiale inerte sparse sul territorio dell'Alta Pianura.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bonfanti, M. & Capone F. A preliminary assessment of the normative framework regulating MAR schemes in Europe: the EU Directives and their implementation in nine national legislations, *Acque Sotterranee*, 2014, AS10048, 61-66.
- Camporese, M., Paniconi, C., Putti, M. & Orlandini, S. Surface-subsurface flow modeling with path-based runoff routing, boundary condition-based coupling, and assimilation of multisource observation data, *Water Resour. Res.*, 2010, 46(2), W02512, doi:10.1029/2008WR007536.
- Chaieb, H., Moncef, R., Ouerfelli, N., Laghi, M., Magagnini, L., Tosatto, O., De Angelis, A., Sollazzo, F. & Teatini, P. On the effectiveness of reusing treated wastewater by infiltration ponds in coastal farmlands. Preliminary investigation on insights from the Korba site, Tunisia, in 1st CIGR Inter-Regional Conference on Land and Water Challenges, Paper no S7-8, 2013.
- Civita, M. Parere tecnico sul ravvenamento dell'acquifero libero nei Comuni di Lestizza, Pozzuolo del Friuli, Mereto di Tomba (UD). Consorzio di Bonifica Ledra - Tagliamento, 2005.
- Martelli, G. & Granati, C. A comprehensive hydrogeological view of the Friuli alluvial plain by means of a multi-annual quantitative and qualitative research survey, *Mem. Descr. Carta Geol. d'Italia*, 2010, XC, 181-208.
- Martelli, G., et al. Artificial recharge of phreatic aquifer in the Mereto di Tomba area (upper Friuli plain), *Procedia Engineering*, 2014, 89, 1241-1248.
- Sanchez-Vila, X., Armenter, J.L., Ortuño, F., Queralt, E. & Fernandez-Garcia, D. Managed artificial recharge in the Llobregat aquifers: quantitative versus qualitative aspects, in *The Llobregat: The Story of a Polluted Mediterranean River*, Hdb. Env. Chem., Springer, Berlin, 2012, pp. 51-68.
- Teatini, P., et al. Artificial recharge of the phreatic aquifer in the upper Friuli plain, Italy, by a large infiltration basin, *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(6), 2579-2595.