

# UTILITÀ DEI POZZI DI RICIRCOLO PER IL COMPLETAMENTO DELLE BARRIERE IDRAULICHE

Vincenzo Francani (Thetys s.r.l.)

## . Premessa

L'utilizzo di pozzi di ricircolo per la bonifica delle acque sotterranee è praticato da molti anni, e il buon esito di progetti di recupero di falde e terreni di aree industriali ha evidenziato le possibilità offerte da questo tipo di intervento che comporta, come ben noto, che i pozzi compiano la funzione di estrarre le acque dalla falda inquinata per inviarle a un impianto di recupero, e reimmetterle nell'acquifero una volta depurate.

In generale si estrae acqua da una falda profonda inquinata, reimmettendola in una più superficiale dopo un processo di depurazione, creando in questa un alto piezometrico nel pozzo e nel suo intorno. Si genera così un processo di filtrazione attraverso il livello intermedio, che produce il miglioramento progressivo delle caratteristiche idrochimiche di tutti gli acquiferi. L'esperienza ha già permesso di individuare quali siano le litologie e i valori dei parametri idrogeologici che consentono la resa ottimale di questo tipo di intervento.

Meno usuale è lo schema di estrazione-reiniezione opposto, con prelievo dal livello più superficiale per immettere le acque in quello più profondo più contaminato.

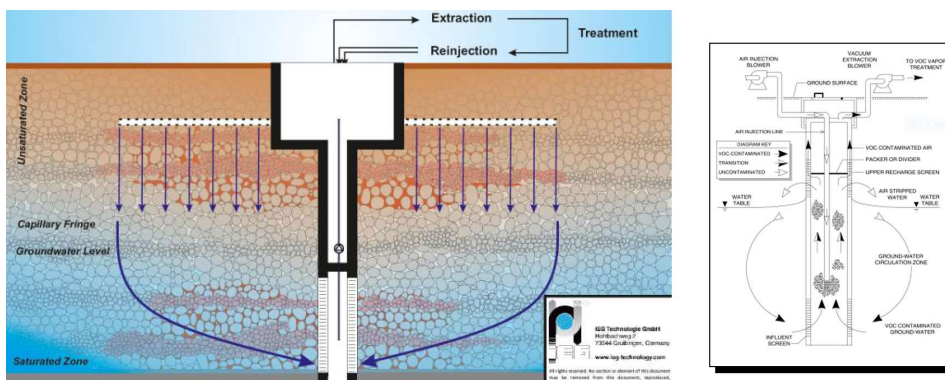


Figura 1 Schema di funzionamento di un pozzo di ricircolo (da IEG, 2024) a sinistra; a destra schema di EPA (1986)

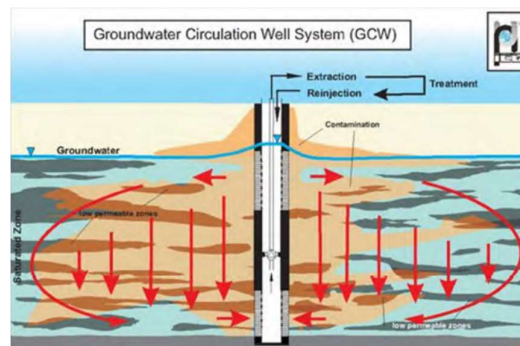
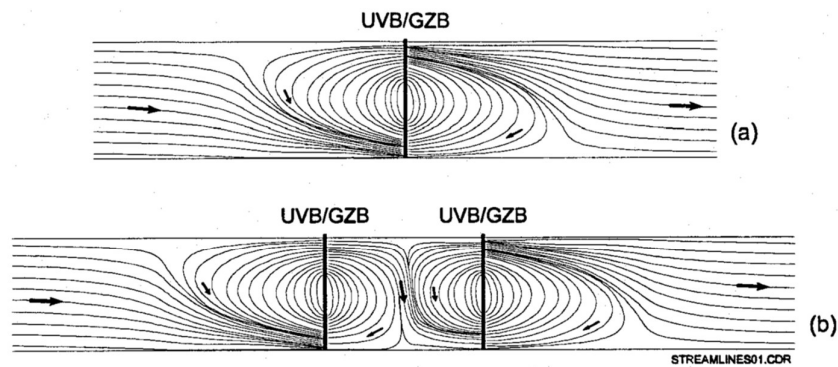


Figura 2 Schema di funzionamento del ricircolo nel caso di due acquiferi separati da aquitard discontinuo (da Petrangeli e al.)

Se l'acquifero è invece unico si ha lo schema rappresentato nella figura seguente (EPA,1997, da Herrling,1994)che riporta il caso dell'impiego di un solo o di più pozzi per un acquifero unico.



**Figure 3. Numerical Simulation Showing the Circulation Pattern around Two GCW Systems (Herrling et al., 1994).**

Figura 3 : schema di circolazione in un solo acquifero, da Ciampi et al.,2024

L'evoluzione della contaminazione viene monitorata in modo da conoscere anche all'intorno del pozzo le variazioni nel tempo del chimismo e della piezometria, e provvedere agli opportuni interventi in corso d'opera. In molte circostanze si è deciso di accompagnare il progetto con un modello matematico idoneo a simulare il comportamento ideale del sistema e a correggere tempestivamente i difetti o i malfunzionamenti dovuti a cause accidentali.

Tale procedura appare molto adatta ad affrontare in modo coordinato tutti i problemi di maggiore interesse in molti casi, e alcuni esempi pratici degli interventi che si possono adottare sono quelli di seguito discussi, a iniziare da quelli di supporto ad altre tecniche, in particolare ai sistemi Pump&Treat.

### **1. Condizioni per il buon rendimento dei pozzi di ricircolo**

Secondo la letteratura, i campi più favorevoli per l'applicazione di questo tipo di impianti si possono così riassumere :

*Tipo di contaminante* : soprattutto VOC, in minor misura semivolatili

*Utilità ai fini della strategia di decontaminazione*: particolarmente indicato per il trattamento della fonte di inquinamento, in minor misura per interventi atti a favorire la riduzione del pennacchio. E' sconsigliabile impiegarlo per il contenimento e l'intercettazione del pennacchio

*Spessore insaturo* : 3,0-35 m

*Tipo di acquifero* : si presta particolarmente per il recupero di un acquifero permeabile per porosità

*Permeabilità ideale* : ottimo con permeabilità di  $10 \text{ E-5 m/s}$

*Anisotropia* : rapporto delle permeabilità  $h/v$  fra 3 e 10

*Portate estratte per ogni pozzo : 1000-5000 l/h*

L'ultimo dato dipende dalle capacità depurative degli impianti, ed è quindi solo orientativo sui valori medi risultanti dall'esperienza.

Queste caratteristiche, che si adattano a un gran numero di casi, hanno portato ad avere un ampio utilizzo ei pozzi di ricircolo, soprattutto per affrontare inquinamenti di aquitard e/o di acquiferi di permeabilità non elevata, La tecnica appare quindi affermata e ben conosciuta, e resta solo da esaminare quali siano le strutture idrogeologiche ottimali per l'impiego in altri sistemi , prima di tutto il Pump & Treat , per migliorarne l'efficienza.

## **2.Completamento di una barriera idraulica**

E' noto che barriere idrauliche di un sistema P&T possono rivelare una non perfetta funzionalità in fase di esercizio, e spesso richiedono interventi migliorativi.

Normalmente le barriere idrauliche, per le quali vengono stabiliti indici di funzionalità in sede progettuale, vengono controllate in modo continuo nel corso del loro funzionamento. Nel corso del monitoraggio, la riduzione dell'efficacia della barriera viene attestata dall'abbassamento di tali indici rivelando l'esistenza di problemi che condizionano l'efficacia dell'intervento.

Si ricorda che un buon indice della funzionalità del pozzo barriera è dato dalla sua capacità di produrre una depressione piezometrica capace di richiamare tutto il fronte inquinante anche durante i periodi di massima piezometria. Occorre quindi trovare un indice di funzionalità che permetta di identificare rapidamente una condizione di crisi , ad esempio prendendo come base i dati piezometrici che normalmente vengono rilevati con notevole continuità.

A tale proposito si può ricordare che l'ampiezza del fronte di richiamo F dell'inquinante è legata con la distanza alla quale a valle dei pozzi si trova il punto di stagnazione  $R_0$  (raggio d'influenza fittizio, pari a  $F = R_0/2\pi T$  , in cui T è la trasmissività) . Si può quindi evidenziare l'esistenza di una situazione di crisi quando in corrispondenza del punto di stagnazione l'abbassamento non raggiunge quello di progetto , ed è diventato quindi insufficiente per creare una depressione piezometrica abbastanza ampia da pareggiare la larghezza del fronte di richiamo indispensabile per contenere l'inquinamento.

Al fine di determinare quale abbassamento  $s$  eserciti il pozzo barriera in corrispondenza del raggio d'influenza fittizio di progetto , è comunque sufficiente tenere presente che per i punti all'intorno del pozzo, posti alla distanza  $x_i$  vale la relazione generale, ricavata da quella di Dupuit (per semplificare si riporta solo quella riferita a un solo pozzo e ad acquiferi in pressione):

$$s_i = Q \ln (x_i/r) / 2\pi T$$

dato che  $Q/2\pi T = R_0$ , si può calcolare nel punto  $R_0$  l'abbassamento, che risulta, applicando la relazione di Schoeller (1965) :

$$s = R_0 \ln (x_i/r)$$

in cui  $R_0$  rappresenta il raggio d'influenza fittizio, H il livello di falda nel pozzo prima della messa in azione del pozzo, h quello dopo l'entrata a regime del pozzo, se l'abbassamento  $s$  così determinato assicura l'efficacia del pozzo barriera, mentre l'abbassamento  $s = H-h$ .

Qualora inconsuete precipitazioni diano luogo a un eccessivo aumento dello spessore dell'acquifero, detta  $T'$  la nuova trasmissività, la depressione registrata si riduce a  $sT/T'$ . Di un'uguale riduzione sono penalizzati fronte di richiamo e raggio d'influenza fittizio. Evidenziata in tal modo l'esistenza di uno stato di crisi, se il nuovo fronte di richiamo  $F'$ , pari a  $FT/T'$ , copre un arco di lunghezza inferiore al fronte di richiamo minimo per contenere tutto l'inquinamento, occorre porre rimedio in tempi ristretti e ben definibili.

E' sostanzialmente necessario conoscere il margine temporale di cui il sistema deve disporre perché un aumento di portata dei pozzi consenta di recuperare l'inquinante che ha superato il perimetro di alimentazione della barriera idraulica, detto tempo di scurezza.

Per determinarlo si consideri che lungo la linea di flusso principale, l'inquinante si muove verso il pozzo solo finché questo è in funzione; dal momento in cui il pompaggio si arresta, il contaminante si sposta verso valle oltrepassando il pozzo di cattura. Tenendo conto del ritardo proprio di ciascun inquinante, questo moto avviene con velocità  $u$  pari al rapporto fra il prodotto  $ki$  e il prodotto del ritardo per la porosità cinematica.

Si osserva che la messa in funzione di pozzi di ricircolo, opportunamente posizionati a valle della barriera dove è prevista la fuga di inquinanti, può assolvere al compito di aumentare con immediatezza la resa del sistema di contenimento quanto basta per impedire la fuga degli inquinanti durante i periodi di crisi.

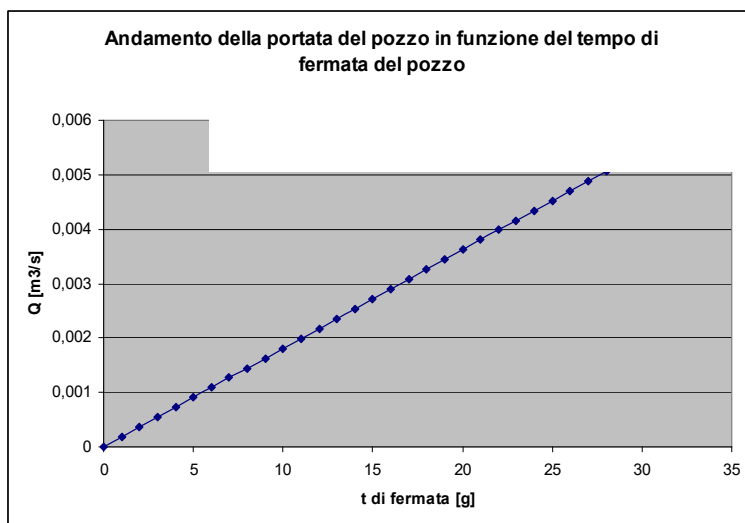


Figura 4 Rapporto lineare fra portata del pozzo necessaria per recuperare l'inquinante e tempo di fermata

La portata necessaria per il recupero del contaminante è data dalla relazione .

$$Q'' = R'' \cdot 2 \cdot \pi \cdot T \cdot i = \left[ R' + \frac{k \cdot t \cdot i}{C \cdot m_e} \right] \cdot 2 \cdot \pi \cdot T \cdot i = Q' + \frac{2 \cdot \pi \cdot T \cdot i^2 \cdot t \cdot k}{C \cdot m_e}$$

$C$  rappresenta il fattore di ritardo dell'inquinante, mentre la portata  $Q''$  è quella da imporre per recuperare il contaminante sfuggito durante la sosta  $t$ . Si nota che questa portata può essere ingente, e spesso non facilmente raggiungibile con i pozzi esistenti, se già non previsti nel progetto per far fronte all'aumento di portata con le caratteristiche di diametro, filtri e pompe idonee a tale scopo. L'inserimento di un pozzo di ricircolo già in fase progettuale consente di intervenire con maggiore rapidità e con maggiori garanzie di

recupero. Particolarmente favorevole all'uso dei pozzi di ricircolo il caso in cui la contaminazione tenda a fuoriuscire dalla barriera nella parte inferiore dell'acquifero, secondo lo schema rappresentato nella figura 5

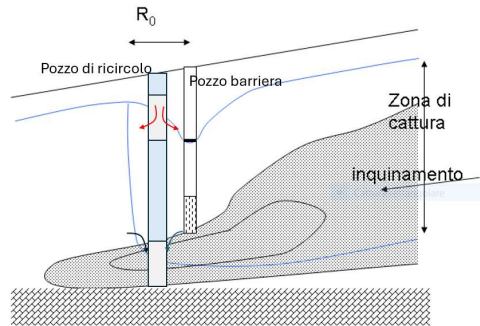


Figura 5: posizionamento ideale di un pozzo di ricircolo destinato a intercettare possibili fughe di inquinanti in profondità

Un altro caso in cui il posizionamento di pozzi di ricircolo è particolarmente idoneo è quello in cui alla contaminazione principale, che può essere contenuta tramite il sistema P&T, si aggiungono gli effetti di più nuclei inquinanti, nei quali la messa in funzione di pozzi di ricircolo può esercitare convenientemente un'azione di recupero per la modesta estensione delle aree contaminate (figura 6).

Questo schema è applicabile anche al caso in cui, invece del P&T, si adotti un metodo di soil flushing o di ossigenazione con immissione di sostanze chimicamente reattive con l'inquinante. I pozzi di ricircolo, posizionati a valle dell'area da decontaminare, impediscono la propagazione di soluti potenzialmente pericolosi derivanti da queste reazioni.

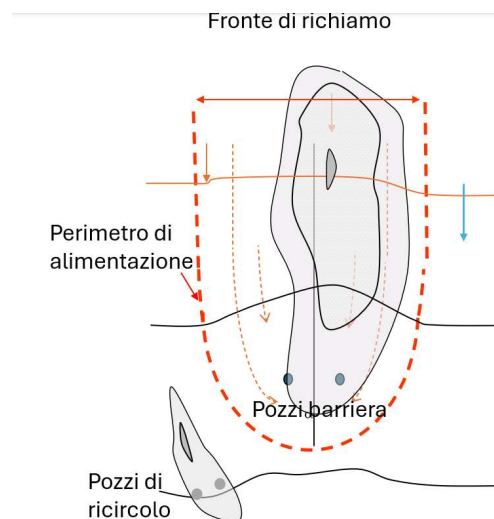


Figura 6: Caso di un inquinamento esterno alla zona di cattura, richiamabile solo con un aumento delle portate. Un pozzo di ricircolo posizionato opportunamente nel settore a valle della barriera può consentire agevolmente il recupero della contaminazione esterna.

### 3. Casi in cui i pozzi di ricircolo trovano difficoltà di applicazione

La letteratura indica alcuni casi in cui i pozzi di ricircolo non hanno avuto successo.

1. Se nel sito considerato la falda più superficiale è subaffiorante, e l'afflusso delle acque provenienti dal processo depurativo non possono creare una sovrappressione sufficiente a produrre una filtrazione verticale di acque depurate attraverso l'aquitard per l'eliminazione dei contaminanti nel setto semipermeabile e nella falda intermedia, sarebbero invece necessari gradienti molto superiori. Si avrebbe quindi difficoltà a sviluppare un'efficace infiltrazione attraverso l'aquitard.

2. L'eliminazione delle sostanze contenute nell'aquitard si rende ovviamente difficile quando le fluttuazioni della piezometria delle due falde sono differenti o sfasate.

2. Se nel sito considerato è presente un solo acquifero, è possibile differenziare le immissioni nella porzione superiore dell'acquifero dall'estrazione nella porzione inferiore (così da creare un flusso dall'alto verso il basso destinato a decontaminare la porzione intermedia) solo se il rapporto fra permeabilità orizzontale e verticale supera l'ordine di grandezza. In caso contrario il flusso di ricarica viene deviato orizzontalmente e si disperde lontano dal pozzo senza penetrare in profondità.

3. Le caratteristiche idrochimiche delle acque possono dare luogo alla precipitazione intorno al pozzo di sostanze (esempio carbonato di calcio), che intasano rapidamente i filtri producendo incrostazioni e deterioramento del pozzo.

4. In presenza di pennacchi estesi si può utilizzare in luogo del Pump&Treat un sistema di contenimento formato da pozzi di ricircolo. Si deve osservare che questo accorgimento può perdere di efficacia nel caso in cui siano presenti aquitard discontinui. In questi casi infatti le acque immesse vengono disperse lateralmente dalla scarsa permeabilità dell'aquitard e penetrano in profondità solo fra le discontinuità dell'aquitard.

5. In generale le eterogeneità della struttura idrogeologica possono pesantemente influire sull'estensione della zona sottoposta a ricircolo. Se l'eterogeneità è marcata, non risulta garantita la funzionalità del sistema, il cui raggiungimento implica quindi dettagliate indagini sulla distribuzione dei parametri idrogeologici. Dal momento che la letteratura (Alesi e al. 2023) sottolinea che l'affidabilità del sistema è legata alla buona rappresentatività e alla completezza delle conoscenze sui parametri idrogeologici del modello di simulazione che ne guida progettazione e operatività.

#### **4. Discussione e conclusioni**

I recenti progressi del metodo lo rendono utilissimo soprattutto per inquinamenti di estensione ridotta, e per acquiferi di non elevata permeabilità. Una soluzione che preveda l'utilizzo di pozzi di ricircolo per l'intercettazione di pennacchi di inquinamento la cui sezione di flusso abbia diverse centinaia di m di larghezza è consigliata per le strutture idrogeologiche in cui l'acquifero abbia permeabilità prossima al m/giorno. Sono comunque pochi i casi in cui questo metodo non può essere impiegato, o dove trova difficile applicazione. Per la sua versatilità vi è infatti la possibilità di adottarlo unitamente ad altri tipi di soluzioni, soprattutto quando ci si voglia cautelare da fughe di inquinanti o da difficoltà insite in alcuni punti della struttura idrogeologica che favoriscono la fuoriuscita di inquinanti in particolari condizioni piezometriche.

Ad esempio, in caso di afflusso insufficiente a uno dei pozzi barriera , si può valutare l'opportunità di inserire un pozzo di ricircolo anziché un pozzo tradizionale, nei punti in cui l'abbassamento determinato con il solo pompaggio da un pozzo barriera risulti insufficiente a richiamare la contaminazione.

Il pozzo di ricircolo permette di ridurre la contaminazione nel settore critico della barriera quanto basta per impedire alla contaminazione di superare la CSC nel punto di conformità prestabilito

Il numero dei pozzi dipende dalla portata estraibile dalla porzione inferiore della falda e dalla distanza alla quale si infila l'acqua immessa nella prima.

Un primo aspetto problematico può essere appresentato dall'entità del flusso di inquinante che viene spazzato nella porzione superiore dell'acquifero prima che le concentrazioni scendano sotto la soglia prescritta dalle normative nei punti di conformità.

Un secondo punto da affrontare nel progetto è il numero dei pozzi da impiegare e la loro distanza, dato che talora vi sono limitazioni nelle portate estraibili dalla porzione inferiore dell'acquifero.

Dal momento che la gestione dei processi di depurazione e di quelli di prelievo e immissione richiede un attento monitoraggio e una gestione capace di correggere gradualmente le insufficienze che si manifestano, è indispensabile una buona conoscenza quantitativa delle modalità di alimentazione e deflusso della struttura idrogeologica interessata. Da questa nota sintetica emerge quindi l'opportunità di un approfondimento delle attuali conoscenze idrogeologiche su questa interessante tecnologia e sui suoi continui sviluppi.

## BIBLIOGRAFIA SINTETICA

Battelle (1997): Technical Protocol for Implementing the Groundwater Circulation Wells Technology for Site Remediation

EPA (1998) Field Applications of In Situ Remediation Technologies:Ground-Water Circulation Wells

Peter Bennett, Chin Man Mok, Deepa Gandhi, Scott Warner,Julia Bussey (2004) :Field Evaluation Of Groundwater Circulation Wells For Amendment Delivery . A.R. Gavaskar and A.S.C. Chen (Eds.), *Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds—2004*.Proceedings of the Fourth International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds(Monterey, CA; May 2004). ISBN 1-57477-145-0, published by Battelle Press, Columbus, OH

Paolo Ciampi Carlo Esposito Ernst Bartsch Eduard J. Alesi Marco Petrangeli Papini (2023): Pump-and-treat (P&T) vs groundwater circulation wells (GCW): Which approach delivers more sustainable and effective groundwater remediation. Environmental Research 234 (2023) 116538

Paolo Ciampi , Carlo Esposito , Marco Petrangeli Papini (2024) :Review on groundwater circulation wells (GCWs) for aquifer remediation: State of the art, challenges, and future prospects. Groundwater for Sustainable Development 101068

