Mauro Majone, Marco Petrangeli Papini
Dipartimento di Chimica,
Università di Roma "La Sapienza"
Enrico Rolle, Vito Cicconi
Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade
Università di Roma "La Sapienza"
Giovanni Pietro Beretta
Dipartimento di Scienze della Terra "Ardito Desio"
Università di Milano
Massimo Maffucci
Dipartimento Ambiente, Cambiamenti Globali e Sviluppo Sostenibile
ENEA
mauro.majone@uniroma1.it

MESSA IN SICUREZZA E BONIFICA DI FALDE CONTAMINATE: APPLICAZIONE DEL D.M. 471/99

Questo lavoro presenta un'analisi critica delle esperienze maturate nella messa in sicurezza e bonifica di falde contaminate, nei circa dieci anni di applicazione della normativa di settore. Si registra una prevalenza di interventi basati su sbarramento idraulico o fisico della falda, trattamento depurativo delle acque emunte o drenate e scarico finale. Progressi recenti si registrano nell'applicazione di tecnologie "in situ", che consentono sia il risanamento dell'acqua sotterranea senza la sua estrazione (favorendo la tutela quantitativa della risorsa potenziale) che l'uso produttivo del sito, verso un approccio di maggior sostenibilità ambientale ed economica.

La bonifica dei siti contaminati in Italia è stata inizialmente regolamentata con il D.M. 471/99, nel cui ambito si è svolta la maggior parte delle esperienze di bonifica finora condotte. La normativa è stata rivista dal D.Lgs. 152/2006 che ha unificato e sostituito tutta la precedente normativa ambientale, ivi inclusa quella sulla tutela delle acque (ex D.Lgs. 152 del 11/5/99) prima completamente separata dalle bonifiche. Nel D.Lgs. 152/06 è stata anche recepita la normativa europea sul "danno ambientale", che rafforza l'aggancio tra bonifica e tutela delle acque come risorsa. Infatti la "riparazione" del danno ambientale alle acque naturali consiste nel riportare le acque allo stato originario, il che per le acque sotterranee corrisponde a tutelarne lo stato sia qualitativo che quantitativo. Con successivo decreto, è stato introdotto l'art. 252bis, che definisce deroghe amministrative e tecniche da applicarsi in siti contaminati di preminente interesse verso la riqualificazione economica e produttiva, in modo che messa in sicurezza (definita "operativa") e bonifica avvengano in modo coordinato e contestuale con i piani di sviluppo del sito da riqualificare.

Il nuovo quadro normativo richiede di procedere sempre più rapidamente verso l'implementazione di tecnologie di bonifica avanzate, ambientalmente ed economicamente sostenibili. Viceversa, lo stato dell'arte registra una netta prevalenza di interventi basati su scavo e smaltimento per i suoli e Pump and Treat (P&T) per le acque, approcci talvolta inevitabili ma non particolarmente efficaci per sostenibilità ambientale ed economica dell'intervento. Infatti, la risorsa contaminata non viene restituita al suo uso originario o potenziale e le aree interessate sono occupate da interventi complessi e protratti nel tempo, che ne ostacolano usi presenti e futuri.

Anche se l'uso di tecnologie più avanzate, quali quelle *in situ* rimane meno diffuso, si registrano progressi incoraggianti soprattutto per tecnologie già largamente utilizzate in altri Paesi, come biorisanamento aerobico e anaerobico, ossidazione chimica e barriere permeabili reattive.

Pertanto, appare utile effettuare un'analisi critica sulle esperienze maturate in questi anni, onde trarne indicazioni e spunti che possano contribuire a migliorare approcci e soluzioni. L'analisi di seguito proposta analizza la messa in sicurezza di falde contaminate, in considerazione della primaria importanza che essa ha assunto come preliminare intervento di emergenza (MISE) nei Siti di Interesse Nazionale (SIN), risultando spesso il primo e più importante elemento di definizione della strategia di approccio alla bonifica dei siti contaminati.

La messa in sicurezza di emergenza (MISE) delle falde contaminate

Nel D.M. 471/99, la MISE era definita come "*ogni intervento necessario ed urgente per rimuovere le fonti inquinanti, contenere la diffusione degli inquinanti e impedire il contatto con le fonti inquinanti presenti nel sito, in attesa degli interventi di bonifica e ripristino ambientale o degli interventi di messa in sicurezza permanente*". Perciò, nell'assunzione che una falda inquinata in movimento possa portare all'allargamento della contaminazione raggiungendo altri bersagli (come corpi idrici superficiali o pozzi agricoli o idropotabili), si sono adottati interventi di MISE in quasi tutti i casi di contaminazione di acque sotterranee.

In realtà, un pennacchio di contaminazione potrebbe essere stazionario o in restringimento, per contaminazioni più "antiche" o se le fonti originarie di contaminazione sono state rimosse. Tuttavia, al momento dell'individuazione della contaminazione non si disponeva di solito di un quadro idrogeologico sufficiente a determinare l'effettiva esistenza del rischio di allargamento della contaminazione. Adottando il principio di precauzione, l'interpretazione prevalente dell'autorità pubblica è stata di prescrivere la MISE delle acque di falda.

Sono state adottate come MISE sia barriere idrauliche che barriere fisiche, in entrambi i casi risultando necessario il trattamento delle acque emunte o drenate. Scarso sviluppo hanno trovato invece i più avanzati sistemi di sbarramento reattivo (barriere permeabili reattive).

Le barriere idrauliche consistono prevalentemente di pozzi di emungimento allineati lungo un asse perpendicolare al moto della falda contaminata (ad esempio nel Petrolchimico di Brindisi). Spaziatura tra i pozzi e portate sono calcolati in modo da garantire l'intercettazione idraulica del fronte di contaminazione, di norma con l'uso di modelli di flusso di larga diffusione, quale MODFLOW o FEFLOW. Tipicamente, l'opera è accompagnata da un monitoraggio piezometrico ed idrochimico ai fini di verificarne l'efficacia. Su tale base, è spesso possibile affinare il modello idrodinamico iniziale e ottimizzare la gestione della barriera, se necessario anche attraverso la realizzazione di nuovi pozzi. In questa flessibilità di gestione risiede la miglior caratteristica delle barriere idrauliche rispetto a quelle fisiche. In zone costiere, la barriera idraulica è a volte completata da una barriera di reimmissione a valle di acqua di idonee caratteristiche, con la duplice funzione di migliorare l'efficacia della barriera a monte e di contrastare il richiamo di acqua marina da valle.

Nel caso di barriere fisiche, i sistemi più utilizzati sono i diaframmi laterali (ovvero posti verticalmente), tipicamente costituiti da:

- palancolate, senza o con giunto poliuretanico (per impedire rilasci lungo le discontinuità);
- diaframmi plastici in cemento bentonite, con o senza inserimento di geomembrana.

Un diaframma fisico laterale è di solito posto a valle del pennacchio di contaminazione da intercettare, ma è talvolta realizzato anche a monte, onde annullare o diminuire l'apporto di acqua non contaminata e di conseguenza la portata da drenare e trattare.

A volte, lo sbarramento fisico è esteso fino a realizzare una cinturazione completa dell'area contaminata, isolando la porzione della falda interna alla cinturazione. Tale scelta drastica va limitata a casi di elevata contaminazione, di solito per presenza di rifiuti in quantità tali da non poter essere rimossi (ad esempio nella zona A1 del sito ex ACNA di Cengio). Essa comporta anche l'impermeabilizzazione superficiale dell'area onde limitare gli apporti meteorici ed il drenaggio e trattamento del "percolato" residuo nell'area cinturata.

In molti casi la costruzione di barriere fisiche è stata preferita rispetto a quelle idrauliche in relazione a timori su inidonee modalità di gestione di quest'ultime e per la difficoltà di controlli da parte degli enti pubblici sulla loro efficacia ed efficienza.

I problemi aperti nella realizzazione e gestione di MISE

La MISE mediante sbarramento della falda è spesso risultata una scelta appropriata, in particolare quando le condizioni al contorno ne hanno consentito una rapida realizzazione e messa in esercizio. Ciò è avvenuto quando la situazione idrogeologica era semplice e nota, la portata della falda e le dimensioni del pennacchio erano contenute e/o esistevano in loco impianti di trattamento adeguati. In situazioni meno favorevoli, la realizzazione della MISE ha richiesto un grande impegno tecnico, economico e temporale, in particolare nel caso di sbarramenti fisici, a dispetto della natura di "emergenza" dell'opera (ovvero realizzabilità ed operatività a breve termine).

Spesso, alla progettazione dell'opera non si disponeva di una conoscenza sufficiente del quadro idrogeologico. Nel caso di sbarramenti idraulici, i principali problemi riscontrati nel calcolo delle portate da prelevare sono stati:

- la possibile stratificazione verticale della contaminazione;
- la presenza di interazioni con le falde sottostanti e/o con acque salate;
- l'interazione con captazioni ad altri scopi e con altri interventi di MISE in corso di attivazione.

Nel caso di sbarramenti fisici, la progettazione richiede poi maggiori informazioni circa le caratteristiche del sottosuolo (permeabilità primaria e secondaria) e la tenuta del substrato di immorsamento dell'opera. Un altro elemento critico è stata l'eventuale necessità di raggiungere profondità notevoli (diverse decine di metri dal piano campagna) o in alternativa di prevedere barriere "sospese", la cui efficacia è di più difficile valutazione.

Un problema comune ad entrambi i tipi di intervento è stato l'assenza di chiari criteri per la valutazione dell'efficacia dell'intervento stesso. Se ad ogni MISE è stato associato un piano di monitoraggio piezometrico e/o idrochimico (spesso impegnativo e costoso), raramente esso è stato basato su una simulazione preventiva di quali dovessero essere i tempi e le aliquote di riduzione delle concentrazioni di contaminanti a valle. Ciò ha comportato a volte aspettative eccessive da parte delle amministrazioni pubbliche e richieste di interventi "a cascata" (ad esempio, sbarramento fisico successivo alla realizzazione di quello idraulico), con frequenti contenziosi con i soggetti privati.

Inoltre, la normativa non prevede una specifica procedura di valutazione e approvazione della MISE da parte dell'autorità pubblica. Ciò ha richiesto di seguire per ogni MISE le ordinarie procedure di gestione degli scarichi idrici e dei rifiuti. In particolare, si è affermata un'interpretazione giurisprudenziale per cui l'acqua contaminata emunta è un rifiuto liquido, rendendo più complessa l'autorizzazione per il trattamento depurativo. In siti industriali produttivi, ciò ha talvolta provocato un ritardo nella possibilità di utilizzare impianti già esistenti di depurazione di scarichi di stabilimento.

L'esperienza acquisita dovrebbe in futuro consentire una miglior valutazione circa il peso da attribuire alla MISE, tenendo in conto soprattutto la possibilità o meno di eseguire interventi flessibili, rapidi e reversibili. Ove un intervento di sbarramento idraulico o fisico risulti effettivamente necessario, esso andrebbe progettato comunque in modo da minimizzare l'acqua da prelevare, in un giusto compromesso tra sbarramento della contaminazione e conservazione quantitativa della risorsa, nella cornice generale della tutela delle acque.

Trattamento e destinazione delle acque emunte o drenate

La destinazione ideale di un'acqua emunta e trattata (quindi "bonificata") dovrebbe essere la restituzione al corpo idrico sotterraneo da cui proviene, soluzione che garantisce la conservazione dello stato quantitativo della risorsa e la restituisce ai suoi usi potenziali. Tuttavia, essa è stata applicata di rado (ad esempio quando consentiva di contrastare l'ingresso di acque marine), pur essendo specificamente prevista già all'All. 3 del D.M. 471/99 "*…prelievo di acque sotterranee per sottoporle a trattamenti di disinquinamento, che possono comportare o meno la reimmissione in falda*". Un aspetto problematico è stato l'intersecarsi della normativa delle bonifiche con quella sul controllo degli scarichi, che vieta gli scarichi nel sottosuolo, nonché della citata attribuzione della qualifica di "rifiuto liquido" alle acque emunte. Queste considerazioni vengono in parte superate dal D.Lgs. 152/2006 che prevede appunto la deroga al divieto di scarico nel sottosuolo per la reimmissione di acque emunte e trattate (art. 243, comma 2). È ovvio che la reimmissione nel sottosuolo richiede il pieno recupero di condizioni di "non contaminazione" (valori limite inferiori a quanto previsto dall'All. 5, parte IV del D.Lgs. 152/2006).

Più eterogenei sono risultati gli approcci per lo scarico in acque superficiali, oscillando dall'adozione dei limiti suddetti (forse eccessivamente cautelativa) a quelli degli scarichi industriali (comma 1, art. 243 del D.Lgs. 152/2006). L'art. 243 consente lo scarico diretto delle acque, anche senza nessun trattamento depurativo, purché nel rispetto dei limiti della acque reflue industriali. Ad avviso degli autori, ciò può risultare poco cautelativo, vista la notevole differenza dei valori limite di concentrazione tra acque sotterranee contaminate e scarichi industriali (All. 5, parte III, D.Lgs. 152/2006): il prelievo di acqua di falda contaminata con reimmissione diretta in un corpo idrico superficiale potrebbe tradursi nel semplice trasferimento della contaminazione da una matrice all'altra. Per contaminanti persistenti o bioaccumulabili, la mancata riduzione della massa di contaminante potrebbe anzi tradursi in un accumulo in altra matrice sensibile (per esempio sedimenti).

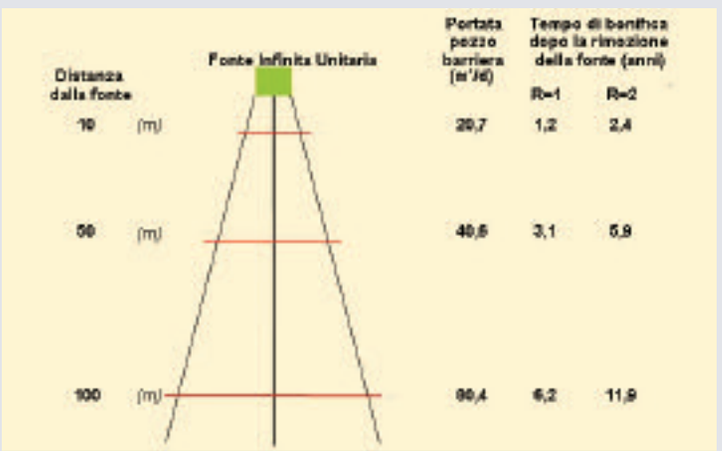

Fig. 1 - Schema di pennacchio di contaminazione originato da sorgente puntuale, portata da prelevare rispetto alla distanza dei punti di captazione e tempi di bonifica previsti (dopo la rimozione della sorgente) in relazione alla mobilità dei contaminanti (R= fattore di ritardo)

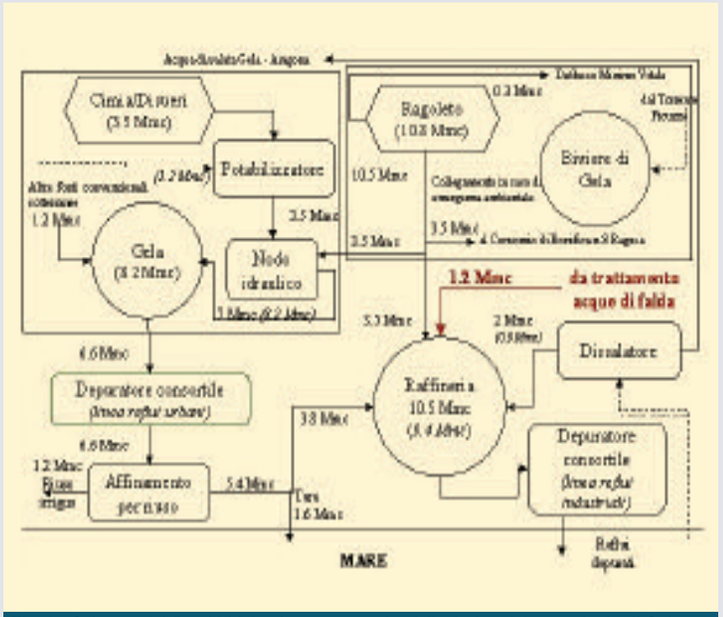

Fig. 2 - Schema dei flussi idrici nel comprensorio civile, industriale e agricolo di Gela

La Fig. 1 presenta l'effetto della distanza dello sbarramento di acqua contaminata rispetto ad una sorgente attiva (in stato stazionario): all'aumentare della distanza aumenta la quantità di acqua da prelevare e quindi diminuisce la concentrazione di contaminante.

Il caso simulato si riferisce ad una sorgente di 1 m^3, concentrazione iniziale 1.000 mg/l, spessore dell'acquifero 15 m, conducibilità idraulica 10^{-4} m/s, gradiente idraulico 0,003, porosità 0,20, velocità effettiva 0,2 m/giorno, dispersività longitudinale, trasversale e verticale rispettivamente di 9,6, 1,0 e 0,70 m. Dal punto di vista ambientale, è evidente come convenga effettuare lo sbarramento il più vicino possibile alla fonte, per minimizzare la portata da prelevare e trattare il contaminante a partire da una concentrazione maggiore (il che aumenta l'efficienza del trattamento). Come caso paradossale e peggiore, potrebbe invece risultare economicamente conveniente un maggior prelievo di acqua (con spreco della risorsa potenziale) purché utile ad evitare il trattamento (nessuna diminuzione della massa di contaminante trasferita). Inoltre, ove rimossa la sorgente contaminante, una maggior distanza della barriera prolunga il tempo di gestione necessario prima dell'arrivo di un fronte non contaminato alla barriera, in particolare per contaminanti che si spostano con un fattore di ritardo rispetto alla falda.

Il rispetto dei limiti per scarichi industriali in acque superficiali di cui al citato art. 243 va perciò interpretato in senso proprio, ovvero con riferimento al procedimento complessivo di autorizzazione degli scarichi. La disciplina generale sugli scarichi (Capo III, Titolo III, Parte III) prevede infatti che limiti differenziati possano essere fissati caso per caso, in funzione del raggiungimento degli obiettivi di qualità dello specifico corpo recettore (art. 101) e anche scarico per scarico in caso di presenza di sostanze pericolose (art. 108). Tenendo conto che quello derivante dalla MISE o bonifica è comunque un carico addizionale di contaminanti sul corpo recettore, il risultato della MISE o bonifica non dovrebbe mai corrispondere ad un peggioramento significativo della qualità dello stesso.

Infine, occorre privilegiare ovunque possibile l'utilizzo dell'acqua emunta in cicli produttivi, anche con l'incentivo dei limiti meno restrittivi allo scarico successivo. Ad esempio, la Fig. 2 riporta lo schema di riorganizzazione dei flussi idrici della zona di Gela, inclusivo della città di Gela, della raffineria e delle aree agricole limitrofe. Lo schema è volto ad ottimizzare il ciclo dell'acqua nell'ambito di un'intesa programmatica sottoscritta tra il Ministero dell'Ambiente e tutte le amministrazioni locali coinvolte. In particolare, il progetto prevede che circa 1,2 milioni m^3 di acque emunte nell'ambito delle opere di MISE e bonifica siano trattate e riutilizzate nella raffineria.

Dalla MISE alla bonifica delle falde

Di fatto, la bonifica è stata spesso condizionata dalla precedente MISE, anche quando la MISE era stata necessariamente realizzata senza disporre delle conoscenze ricavabili dai successivi stadi di progettazione della bonifica. Infatti, in presenza di uno sbarramento fisico o idraulico, l'approccio ovvio alla bonifica è risultato la prosecuzione del sistema di Pump and Treat (P&T) già avviato. Tuttavia, il risanamento dell'acqua sotterranea a monte di uno sbarramento non viene più a dipendere esclusivamente dall'efficacia dello sbarramento stesso, mentre risulta determinante l'afflusso da monte di acque pulite. La progettazione della bonifica dovrebbe quindi comportare una nuova ottimizzazione dello sbarramento sulla base del desiderato rinnovo della falda o quanto meno il calcolo del tempo necessario di tale rinnovo nelle condizioni usuali di esercizio.

Un problema specifico è legato alla presenza di sorgenti attive di contaminazione secondaria, che rilasciano lentamente il contaminante nella fase liquida. È il caso di contaminanti poco solubili e/o fortemente adsorbiti sulla fase solida (ad esempio metalli pesanti e idrocarburi) oppure di contaminanti in fase separata (ad esempio solventi clorurati in fase densa separata, DNAPL). In questi casi, le quantità di acqua da estrarre possono essere molto grandi, mentre le rese di contaminante estratto sono basse, in quanto controllate dalla lenta cinetica di desorbimento o dissoluzione alla sorgente. Ne deriva che il trattamento deve restare in funzione per tempi molto lunghi prima dell'esaurimento della sorgente e del pennacchio (tipicamente almeno 10-20 anni), con un forte impatto degli elevati costi operativi (energia e reattivi).

Perciò, occorre sempre valutare interventi più localizzati a supporto degli interventi di P&T, che possano accorciarne i tempi di esercizio e/o evitare che la bonifica comporti un incremento delle portate prelevate. In questi anni, si è spesso fatto uso di tecnologie fisiche *in situ* (ad esempio desorbimento di composti volatili mediante insufflazione o aspirazione d'aria), di solito applicate nelle zone a maggior contaminazione (cosiddetti "hot spot"), spesso in combinazione con interventi di bonifica sull'orizzonte insaturo. Un pozzo di estrazione di composti volatili posto in prossimità della sorgente (concentrazioni elevate) può essere molto più produttivo (massa di contaminante estratta al giorno) di un pozzo di emungimento posto a valle per lo sbarramento dell'intero pennacchio. Altre tecnologie *in situ* che vanno lentamente applicandosi in Italia sono trattate nei paragrafi seguenti.

Un approccio alternativo di MISE/bonifica: la barriere permeabili reattive

Tra le tecnologie *in situ* che possono essere applicate sia nel contesto delle MISE che della successiva bonifica, appare particolarmente promettente la tecnologia delle Barriere Permeabili Reattive (PRB). Infatti le PRB:

- hanno strutture prevalentemente nel sottosuolo, favorendo l'uso della proprietà e l'aggancio tra MISE, bonifica e valorizzazione economica del sito;
- consentono MISE e bonifica senza l'estrazione, conservando così la risorsa potenziale sotterranea e semplificando l'iter autorizzativo;
- sfruttano il deflusso naturale della falda con minimizzazione dei consumi energetici;
- sono adatte a processi di lungo termine, calibrati sulla cinetica lenta dei processi naturali di rilascio dei contaminanti.

Negli Stati Uniti ed in alcuni Paesi europei la tecnologia delle PRB è stata prima oggetto di importanti progetti di studio (si veda il progetto SAFIRA in Germania) ed ha ormai trovato rapida applicazione nella bonifica di falde contaminate (ad oggi circa 200 installazioni nel mondo). Viceversa, a nostra miglior conoscenza, in Italia esiste un solo esempio in piena scala, nonostante le PRB siano compatibili sia direttamente come MISE/bonifica che idealmente come modifica successiva di altri interventi di MISE. Infatti, nella sua configurazione più semplice e diffusa (Fig. 3), una PRB consiste di una trincea (spessore 0,5-1,0 m, profondità fino a 15-20 m, larghezza anche di centinaia di metri), che viene realizzata all'interno di una falda contaminata, possibilmente poggiando su uno strato inferiore impermeabile.

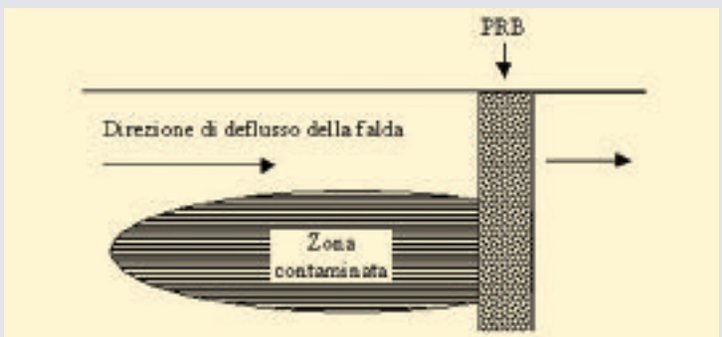

Fig. 3 - Tipica configurazione di PRB

La trincea viene riempita con il materiale reattivo; il riempimento è realizzato in modo da essere più permeabile del materiale dell'acquifero e quindi il passaggio dell'acqua è assicurato dal deflusso naturale della falda. La reazione tra il riempimento reattivo ed i contaminanti assicura la bonifica della falda, alla sua portata naturale. Le PRB si sono soprattutto affermate nella rimozione dei solventi clorurati (la tipologia di contaminazione più diffusa anche in Italia) mediante l'utilizzo di ferro zerovalente come riempimento reattivo. Infatti, la reazione tra ferro-zerovalente e solventi clorurati è ben studiata e non presenta particolari problemi di sottoprodotti. Esistono anche altre applicazioni con altri materiali reattivi e per altri contaminanti (ad esempio materiali adsorbenti).

In alcuni casi, invece di una trincea continua, viene realizzata una trincea impermeabile che convoglia l'acqua verso una zona reattiva di minore larghezza (configurazione "funnel and gate"). Tale configurazione può prestarsi molto bene ad una riconversione di interventi di messa in sicurezza di emergenza, inizialmente basati su diaframmi impermeabili, eliminando così il trattamento delle acque drenate in impianto di depurazione esterno.

Le "barriere" per lo sviluppo ed applicazione delle tecnologie *in situ*

Oltre alle tecnologie *in situ* già citate nei due paragrafi precedenti, cominciano ad essere avviati, o almeno approvati come progetto definitivo, esempi di applicazione dell'ossidazione chimica *in situ* (ISCO), dei sistemi geo-elettrochimici e del biorisanamento, sia in condizioni aerobiche (con composti a lento rilascio di ossigeno) che anaerobiche (declorazione riduttiva dei solventi clorurati).

Il principale ostacolo alla diffusione di tali tecniche è stato il fatto che un intervento *in situ* deve essere preceduto da una caratterizzazione accurata e dedicata nonché da test in scala di laboratorio e da verifiche su campo in scala pilota. Tale procedura "sito-specifica" risulta spesso più lunga e costosa nella fase di progettazione, anche per una certa carenza di metodologie di progetto standardizzate. Ciò ha comportato una frequente riluttanza del soggetto privato ad affrontarne gli oneri, anche a fronte di potenziali vantaggi economici nelle successive fasi di realizzazione e gestione, anche perché dall'altra parte, nell'amministrazione pubblica, si registrava una certa diffidenza nell'adozione di tali tecnologie, considerate di minore affidabilità e più difficile controllo.

Un'ulteriore "barriera" risiede nel fatto che alcune di esse (es. ISCO e alcuni tipi di biorisanamento) richiedono "iniezione" di sostanze chimiche in acqua di falda, con preoccupazioni circa la possibile formazione di composti indesiderati e/o sconosciuti. In effetti, la direttiva 2000/60/CE stabilisce in modo specifico all'art. 11 che gli Stati membri possono autorizzare a determinate condizioni "...gli scarichi di piccoli quantitativi di sostanze finalizzate alla marcatura, alla protezione o al risanamento del corpo idrico, limitati al quantitativo strettamente necessario per le finalità in questione". Pertanto, le citate tecnologie *in situ* hanno finora trovato applicazione prevalente in presenza comunque di uno sbarramento a valle.

Da questo punto di vista è importante che il procedere delle conoscenze scientifiche e tecnologiche sia accompagnato dallo sviluppo di procedure di progetto e gestione, che consentano una più affidabile valutazione dell'applicazione di tecnologie avanzate nelle diverse condizioni "sito-specifiche" e una più facile accettazione da parte dell'autorità pubblica. Come esempio, la Fig. 4 riporta uno schema di "protocollo operativo" per la valutazione di fattibilità e progettazione di un intervento di biorisanamento anaerobico di falde contaminate da solventi clorurati, elaborato nell'ambito di uno studio dell'Università "La Sapienza" di Roma con il CNR (Istituto di Ricerca sulle Acque) [1].

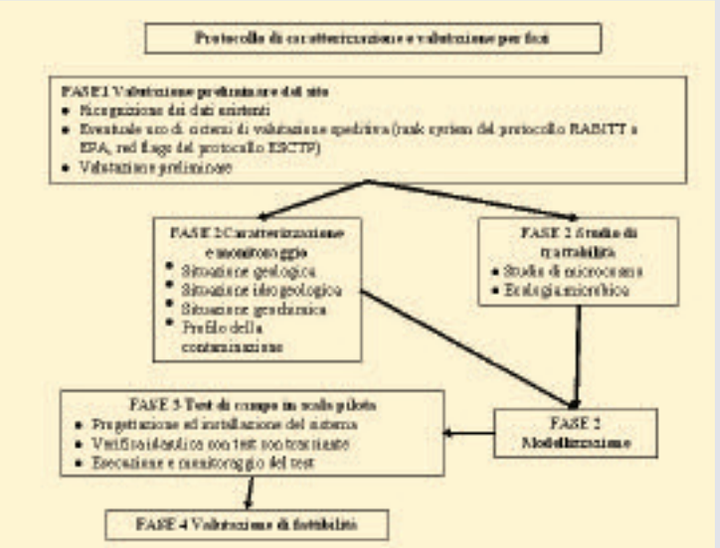

Fig. 4 - Schema di protocollo operativo per il biorisanamento anaerobico *in situ* di falde contaminate da solventi clorurati

È auspicabile che lo sviluppo di tali procedure di progettazione e controllo e la loro validazione nelle applicazioni in piena scala, che si stanno avviando a partire dai siti in cui esiste un preliminare sistema di MISE, possa infine portare alla piena implementazione di tali tecnologie sul territorio italiano verso un approccio pienamente sostenibile alle bonifiche, sia dal punto di vista ambientale. che economico.

Bibliografia e note

[1] M. Majone, M. Petrangeli Papini, F. Aulenta, P. Viotti, M. Leccese, V. Tandoi, S. Rossetti, C. Cupo, "Biorisanamento anaerobico *in situ* di falde contaminate da solventi clorurati. Proposta di protocollo di indagine per la valutazione di fattibilità", elaborato con il supporto finanziario del Ministero dell'Ambiente e del CNR (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Rischi Chimico-Industriali ed Ecologici – GNDRCIE). Lo studio completo è disponibile all'indirizzo: www.provincia.milano.it/ambiente/bonifiche/doc/atti_2006_protocollo_biorisanamento_uniroma.pdf

[2] Alcune parti del presente articolo sono inoltre tratte, rielaborate e aggiornate da: a) M. Majone *et al.*, Lo stato dell'arte della bonifica di siti contaminati, presentato ad Ecomondo 2006; b) M. Majone *et al.*, Criteri tecnici per la stesura dei progetti di bonifica: una riflessione critica a partire dalle esperienze di applicazione del DM 471/99, Convegno Internazionale e Progetto TRANS-IT - La bonifica dei siti contaminati, Milano, 23-24/11/06.

ABSTRACT

An Italian Survey on Technologies for Containment and Remediation of Contaminated Groundwater, Starting From the First National Rule (D.M. 471/99)

After the first national rule has been implemented about 10 years ago, a critical survey on experience in Italy for containment and remediation of contaminated groundwater is presented. In most cases an emergency containment of the contaminated groundwater has been adopted based on hydraulic or physical barriers, which also requires that extracted groundwater is treated and discharged. Only recently, some advancement is observed towards the implementation of in situ technologies that make it possible groundwater remediation without extraction. The in situ approach makes easier to save groundwater for potential uses and the above-ground use of the site for its economic redevelopment, that result in more environmentally and economically sound approach for groundwater remediation.