
BIORESTORATION



I TRATTAMENTI BIOLOGICI IN SITO NEL DISINQUINAMENTO DEGLI ACQUIFERI E NELLA BONIFICA DELLE AREE CONTAMINATE

Giovanni Pietro Beretta*

PREMESSA

L'estensione raggiunta dalla contaminazione delle acque sotterranee ha coinvolto numerose zone, determinando problemi di approvvigionamento idropotabile.

Numerosi sono i composti ritrovati nelle acque sotterranee: dai metalli pesanti ai solventi organoclorurati, ai fitofarmaci, ai nitrati, per limitarsi ai più frequenti. Secondo una recente indagine dell'I.R.S.A.-C.N.R. in 267 siti campione le origini dell'inquinamento erano così distribuite: 30% industriale, 24,7% civile, 18,7% agricola, 15,7% zootecnica, 9% discariche e 1,9% sovrasfruttamento della falda (CICIONI, GIULIANO, 1991).

Nell'ambito della tipologia degli interventi adottabili per la salvaguardia dell'ambiente e

della salute umana, ha assunto una crescente importanza l'opera di risanamento, soprattutto nelle aree dichiarate "ad elevato rischio di crisi ambientale" da parte del Ministero dell'Ambiente. Tra di esse rivestono una particolare importanza le aree industriali, soprattutto quelle dismesse in cui è stato registrato un degrado dei terreni e delle acque sotterranee dovuto alla presenza di stoccaggi e discarica di materiali vari. Per il riutilizzo di tali aree è pertanto necessario procedere al risanamento, da realizzare dopo studi ed indagini di varia complessità.

Il primo aspetto da affrontare è relativo alla bonifica, cioè alla rimozione della fonte inquinante. In generale ciò può essere effettuato mediante rimozione e/o trattamento dei terreni contaminati, nonché degli eventuali rifiuti presenti, e nella messa in discarica o nel riutilizzo dei materiali rimossi. In queste operazioni sono note le difficoltà inerenti gli elevati costi

Dipartimento di Sistemi di Trasporto e Movimentazione - Sez.
Geologia - Politecnico di Milano

di intervento e la localizzazione sul territorio di impianti in grado di trattare ed accettare il materiale rimosso.

Il secondo aspetto riguarda la necessità del disinquinamento delle acque sotterranee interessate dalla contaminazione. In questo caso bisogna prelevare le acque e depurarle prima di procedere allo scarico -secondo le norme stabilite dalla legge 319/76 e sue modificazioni- o al riutilizzo. La necessità di installazione di impianti di estrazione e di depurazione delle acque comporta, comunque, costi elevati.

Tra le varie possibilità di intervento sulla bonifica e sul disinquinamento delle acque sotterranee è risultato molto interessante, anche se tuttora poco diffuso in Italia, il trattamento biologico in sito che consiste nell'attivare le reazioni di biodegradazione presenti nel suolo e nel sottosuolo. Si tratta di utilizzare i microrganismi già presenti nel terreno capaci di degradare i composti organici, o di iniettare specie alloctone nel caso quelle autoctone non siano in grado di compiere la decontaminazione. Non si tratta dunque di un semplice trasferimento della contaminazione da una fase all'altra, ma di un effettivo miglioramento delle condizioni sanitarie ed ambientali.

Di seguito saranno considerati alcuni elementi relativi al risanamento degli acquiferi mediante il trattamento biologico in sito, con particolare riferimento agli aspetti idrogeologici, quali:

- le relazioni idrodinamiche e biochimiche di simulazione del processo;
- i metodi utilizzabili per la bonifica e il disinquinamento;
- le condizioni di fattibilità e di applicabilità degli interventi.

MODELLI DI SIMULAZIONE DEL TRATTAMENTO BIOLOGICO IN SITO

Le esperienze di trattamento biologico in sito già realizzate hanno interessato principalmente casi di contaminazione da derivati dell'industria petrolifera, nonostante che essi contengano un gran numero di additivi che possono influire sul grado di biodegradabilità; alcani,

alchil-aromatici ed aromatici sono i composti sui quali esiste il maggior numero di realizzazioni.

Già nel 1972 l'American Institute of Petroleum selezionò alcuni microrganismi, come *Arthrobacter* e *Pseudomonas*, in grado di degradare gli idrocarburi. Alcuni composti -come ad es. naftalene, 2-metilnaftalene, dibenzofurano, fluorene e fenantrene- sono metabolizzabili dai microrganismi in condizioni aerobiche (LEE, WARD, 1985), ma anche in condizioni anaerobiche è stata osservata una trasformazione per benzene, toluene, xilene e altri alchilbenzeni (WILSON, REES, 1985).

E' noto che nel sottosuolo i microrganismi possono trasformare i composti organici distribuiti sulla matrice solida dell'acquifero o contenuti nei pori. Tale fenomeno, che costituisce un aspetto importante del cosiddetto "potere autodepurante" del terreno, viene definito biodegradazione ed è interpretabile con il modello di biofilm (McCARTY et AL., 1981; RITTMANN, McCARTY, 1981).

Le basi teoriche per l'interpretazione del meccanismo di biodegradazione possono essere fornite dalle leggi di Monod per spiegare la rimozione di idrocarburi, della dispersione idrodinamica (BEAR, 1979) relativa alla mobilità degli inquinanti negli acquiferi e del fattore di ritardo (FREEZE, CHERRY, 1979) per spiegare lo scambio di microrganismi tra le matrici solida e liquida. Da tali leggi derivano le tre relazioni alla base dei modelli di simulazione del processo di biodegradazione, utilizzabili nello studio del trattamento biologico in sito:

$$R_i \frac{\delta C_i}{\delta t} = \nabla(D \nabla C_i - u C_i) - \frac{C_i C_o (C_m - K)}{(K_1 + C_i)(K_o + C_o)}$$

$$\frac{\delta C_o}{\delta t} = \nabla(D \nabla C_o - u C_o) - C_m K F \frac{C_i C_o}{(K_1 + C_i)(K_o + C_o)}$$

$$R_m \frac{\delta C_{ms}}{\delta t} = \nabla(D \nabla C_{ms} - u C_{ms}) + \frac{R_m C_s K Y C_i C_o}{(K_1 + C_i)(K_o + C_o)} + K_c Y C_{org} - b C_{ms}$$

in cui C_p , C_o , C_m e C_{m_0} rappresentano rispettivamente la concentrazione di idrocarburi, di ossigeno, di microrganismi e di microrganismi in sospensione; D il coefficiente di dispersione; F l'aliquota di ossigeno consumata dagli idrocarburi; K , K_1 e K_0 rispettivamente la massima aliquota di utilizzo di idrocarburi per unità di massa di microrganismi, la costante di semisaturazione degli idrocarburi e dell'ossigeno; C_{org} la concentrazione di carbonio organico del terreno; R_1 e R_m rispettivamente il fattore di ritardo per gli idrocarburi e per i microrganismi; u la velocità effettiva di filtrazione dell'acqua; t il tempo. Tutti i parametri devono essere espressi in unità di misura congruenti.

Per poter implementare tali modelli è necessario conoscere i valori assunti dai diversi parametri che compaiono nelle relazioni; le indagini da svolgere in sede di progettazione dell'intervento devono pertanto essere mirate alla loro misurazione: ciò comporta, ovviamente, uno studio interdisciplinare che coinvolge l'idrogeologia, la biologia e l'ingegneria.

METODI DI DISINQUINAMENTO BIOLOGICO DEGLI ACQUIFERI

In particolari condizioni alcuni microrganismi utilizzano come fonte di nutrimento gli inquinanti presenti nel sottosuolo, producendo dapprima sostanze organiche semplici e, alla fine del ciclo, anidride carbonica ed acqua.

La materia organica, presente con concentrazioni fino a circa il 10% nel suolo e inferiori a 0,1% nel sottosuolo, svolge un ruolo determinante nel potere autodepurante del terreno. Un suolo agricolo contiene un numero elevato di microrganismi (ad es.: nematodi 500/g, funghi 100.000/g, batteri 100.000.000/g). Alcuni di essi sono stati riconosciuti da tempo responsabili della degradazione di idrocarburi; i composti soggetti a tali trasformazioni sono riportati nella tab. 1. Per la tipologia delle reazioni di degradazione si vedano gli studi di: AA.VV., 1987; ALEXANDER, 1981; BOSSERT, BARTHA, 1984; DRAGUN, 1988.

L'attività di tali batteri (es. *Achromobacter*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Micrococcus*, *Nocardia*,

Tab. 1 - Gruppi funzionali soggetti a trasformazioni da parte di microrganismi (da DRAGUN, 1988)

<i>Frammenti organici molecolari soggetti a trasformazione batterica</i>	
Alcoli	Chetoni
Aldeidi	Lattami
Aliciclici alifatici	Lattoni
Alifatici (saturi e insaturi)	Composti nitrosi
Ammidi	Nitroso-ammine
Ammine	Composti organici di:
Aromatici	Arsenico
Aromatici-eterociclici	Fosforo
Azide	Mercurio
Carbammati	Stagno
Acidi carbossilici	Zolfo
Aromatici condensati	Ossime
Ditiocarbammati	Composti quaternari dell'ammoniaca
Esteri	Solfuri
Eteri	Acidi solfonici
Glicosidi	Tioamidi
Alogenuri	Tiocarbammati
Eterociclici	Tioli
Acidi idrossamminici	Uree
Idrossilammine	

Serratia) e funghi dipende dai seguenti fattori:

- disponibilità di una sorgente energetica, in quanto la maggior parte dei microrganismi è eterotrofa;
- pH compreso tra 6 e 8, con valori ottimali vicini a 7;
- temperatura, che deve essere superiore a quella di solidificazione dell'acqua (poiché le reazioni avvengono in fase liquida) e inferiore a 50 °C (oltre tale soglia -ad eccezione dei batteri termofili- viene inibita l'attività enzimatica);
- umidità: i microrganismi non crescono in condizioni estreme (ad es. in suolo completamente secco);
- presenza di macro e micronutrienti (N, P, K, Na, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu) in opportune concentrazioni.

Trattamento di miglioramento

Agendo sui fattori sopra elencati -ad esem-

pio iniettando ossigeno o un substrato nutritivo adatto (come composti di N e P)- può essere stimolata un'attività dei microrganismi già presenti nel terreno che si rivelasse insufficiente rispetto all'elevato carico inquinante: questa metodologia è denominata "trattamento di miglioramento".

La prima applicazione di una tecnica di biodegradazione riguardava un caso di contaminazione da benzina ad Ambler, Pennsylvania, USA (RAYMOND, 1974). Il sistema, che integrava la normale estrazione dell'inquinante con pompe, prevedeva l'introduzione di ossigeno e di nutrienti nel sottosuolo (ammoniaca, solfati, fosfati di sodio).

Successivamente sono stati proposti diversi metodi sperimentali per incrementare il tenore di ossigeno nel sottosuolo, quali la tecnica del "soil venting" (estrazione d'aria dalla zona non satura contaminata, ad es. con pompa a vuoto, rimuovendo in tal modo la fase volatile degli idrocarburi) o l'uso di ossigeno puro, ozono e

acqua ossigenata, in cui si potevano raggiungere rispettivamente concentrazioni di 8-12 e 40-50 mg/l di ossigeno disciolto. Alcuni limiti di applicabilità derivavano dagli elevati costi, dal rischio di incendi connesso all'uso dell'ossigeno puro e dalla tossicità dell'acqua ossigenata a determinate concentrazioni.

In letteratura sono riportati altri numerosi casi di applicazione del metodo, che ha ormai superato la fase sperimentale. Ad esempio a Waldwick, New Jersey, USA è stato trattato con *Pseudomonas*, *Agrobacterium* e *Arthrobacterium* (rispettivamente 40%, 40% e 20%) un inquinamento da cloruro di metile, n-butil alcool, dimetilnilina e acetone, con riduzione di oltre il 90% della contaminazione.

A North Babylon, Long Island, USA, è stato trattato uno sversamento di idrocarburi al fine di rimuovere l'inquinante adsorbito dal terreno e fonte di continua cessione alle acque sotterranee (PETEREC, 1988). L'intervento (fig. 1), integrativo della tecnica di "soil venting", è

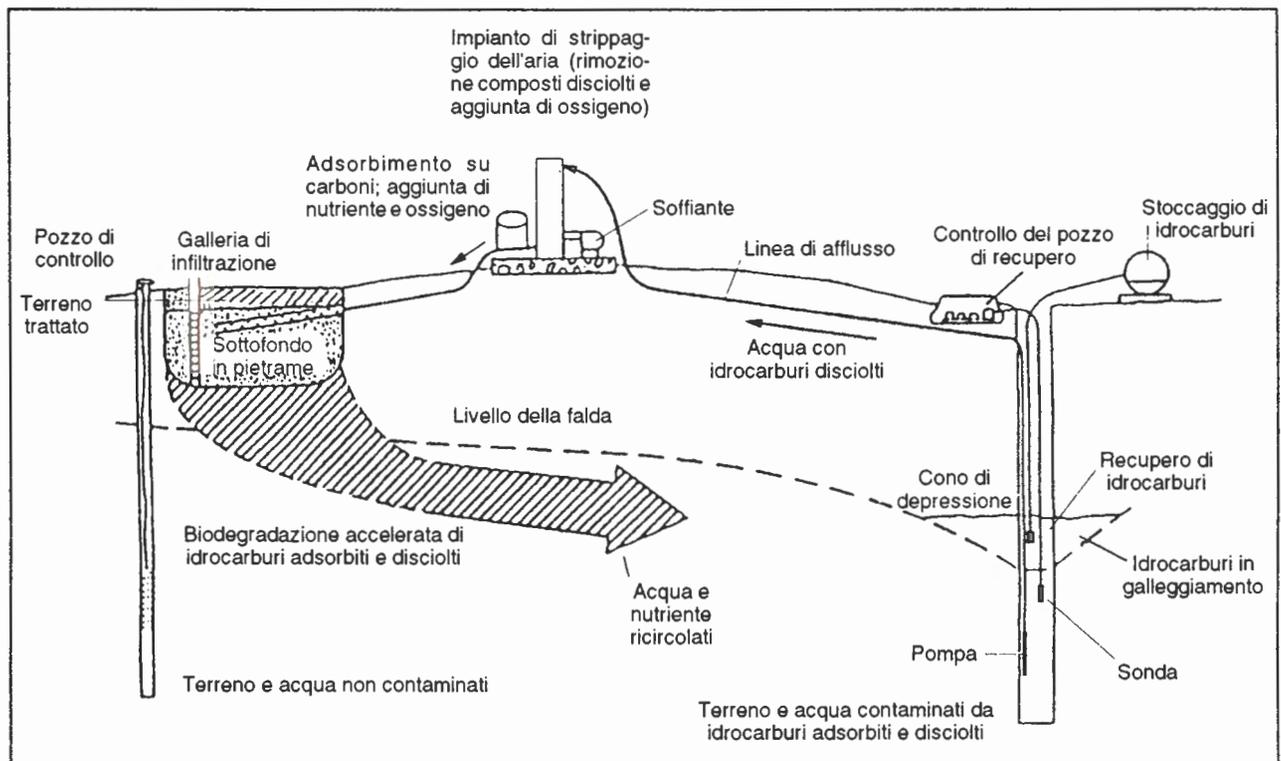


Fig. 1 - Schema del sistema adottato per il disinquinamento dell'acquifero con il metodo di trattamento biologico in sito a North Babylon, Long Island, USA (da PETEREC L.J., 1988)

consistito nella realizzazione di gallerie di infiltrazione alimentate con acqua addizionata di acqua ossigenata e di nutrienti (cloruro d'ammonio e fosfato di sodio). Questi ultimi, in concentrazioni superiori a 0,02%, stimolano la crescita di microrganismi che svolgono la biodegradazione degli idrocarburi nelle acque sotterranee; il dilavamento del terreno favorisce anche il risanamento della matrice solida. Il pennacchio inquinante veniva intercettato da pozzi e gli idrocarburi separati e convogliati in un apposito serbatoio mentre le acque, previo arricchimento in nutrienti e acqua ossigenata, venivano reimmesse nelle gallerie di infiltrazione situate a monte. In tal modo si realizzava una barriera idraulica che impediva la propagazione verso valle del pennacchio inquinante. A conclusione dell'intervento non si sono riscontrate presenze significative di idrocarburi e di nutrienti nelle acque sotterranee.

Altre esperienze sono riportate da: JHAVERI &

MAZZACCA, (1983 E 1986), MORGAN & WATKINSON (1990) e THOMAS et AL. (1990). I vantaggi e gli svantaggi di questa tecnica di trattamento biologico sono riportati nella tab. 2.

Trattamento di acclimatazione

Se il microrganismo necessario per la degradazione di una particolare sostanza inquinante non è presente naturalmente nel sottosuolo, occorre procedere ad immettervelo artificialmente; questa metodologia è denominata "trattamento di acclimatazione".

Quest'ultimo tipo di intervento richiede una fase di studio preliminare più dettagliata; è necessario, infatti, identificare in laboratorio le specie capaci di degradare l'inquinante e produrre una popolazione mediante arricchimento della coltura o manipolarle geneticamente; si procede poi come nel caso precedente. I principali vantaggi e svantaggi del metodo sono riportati nella tab. 3.

Tab. 2 - Trattamento biologico di miglioramento: vantaggi e svantaggi (da CANTER, CNOX, FAIRCHILD, 1987)

<i>Vantaggi</i>	<i>Svantaggi</i>	<i>Fattori che influenzano le prestazioni</i>
1- Utile per rimuovere idrocarburi e altre sostanze organiche in basse concentrazioni difficilmente degradabili con altri sistemi	1- Non applicabile per i metalli pesanti e certe sostanze organiche	1- livello di ossigeno disciolto
2- Buono dal punto di vista ambientale perchè, utilizzando microrganismi indigeni, non crea prodotti di rifiuto e non determina variazioni ecologiche	2- I batteri possono intasare i pori del terreno riducendone la permeabilità	2- pH
3- Veloce, sicuro e in genere economico	3- I nutrienti possono influenzare negativamente le acque superficiali	3- Temperatura
4- Il trattamento si muove insieme al pennacchio della contaminazione	4- I residui possono causare problemi di odore e sapore	4- Potenziale di ossido-riduzione
5- Buono per trattamenti a breve termine di acque sotterranee inquinate	5- Potrebbe risultare costoso se necessita di immissioni di nutrienti per lungo tempo e di un sistema di mantenimento	5- Nutrienti disponibili
	6- Per elevate concentrazioni di inquinanti la biodegradazione è più lenta rispetto ai trattamenti fisici	6- Salinità
	7- Gli effetti a lungo termine non sono conosciuti	7- Concentrazione degli inquinanti
	8- Difficilmente accettata dalle Autorità Sanitarie	8- Numero e tipo di organismi
	9- Non può ridurre concentrazioni dell'ordine del $\mu\text{g/l}$ senza ricorrere a tecnologie complementari	

TRATTAMENTI BIOLOGICI PER LA BONIFICA DELLE AREE CONTAMINATE

Il trattamento biologico può essere realizzato sia mediante iniezione di microrganismi (autoctoni o alloctoni) nel sottosuolo, sia mediante la rimozione del terreno e la sua depurazione in

reattori mobili (AA.VV., 1988; BIO TREATMENT LTD, 1990).

I batteri autoctoni sfruttano i composti presenti nel terreno contaminato come substrato nutritivo; è necessario alimentare le reazioni con apposite sostanze. Nel caso siano presenti

Tab. 3 - Trattamento biologico di acclimatazione: vantaggi e svantaggi (da CANTER, CNOX, FAIRCHILD, 1987)

<i>Vantaggi</i>	<i>Svantaggi</i>	<i>Fattori che influenzano le prestazioni</i>
1- I microrganismi possono essere selezionati in funzione del tipo di inquinante	1- Richiede uno studio preliminare più complesso, tempi più lunghi e costi maggiori rispetto al trattamento biologico di miglioramento	1- livello di ossigeno disciolto
2- I processi di degradazione avvengono più velocemente	2- L'iniezione della coltura può causare fenomeni di intasamento	2- pH
3- La coltura può essere iniettata assieme ai nutrienti	3- La presenza di sostanze tossiche può distruggere la coltura	3- Temperatura
4- Possibilità di sviluppare microrganismi capaci di degradare inquinanti "immuni" alla popolazione indigena	4- La competizione con la popolazione microbica originaria può distruggere la coltura	4- Concentrazione dell'inquinante
	5- Difficilmente accettata dalle Autorità Sanitarie	5- Grado di umidità sufficiente
	6- Non è possibile trattare concentrazioni dell'ordine del $\mu\text{g/l}$ senza ricorrere a tecnologie complementari	

Tab. 4 - Applicabilità di tecnologie di trattamento del terreno in relazione alla tipologia degli inquinanti: A = applicabile; N = non applicabile; P = parzialmente applicabile (da NOELL-KRC GmbH, 1990)

Tecnologia	Contaminanti					
	Metalli pesanti	Cianuri	Idrocarburi oli minerali	Idrocarburi policiclici aromatici	Idrocarburi clorurati volatili	Composti organici alogenati
Aspirazione sostanze tossiche disciolte	N	N	A	N	A	N
Aspirazione dei gas presenti nel suolo	N	N	N	N	A	N
Incenerimento: Alta temperatura con post-combustione	P	A	A	A	A	A
Bassa temperatura con post-combustione	N	A	A	P	A	N
Lavaggio, processi estrattivi	A	A	A	A	A	P
Processi biologici	N	P	A	P	P	N

composti tossici per i microrganismi autoctoni è necessario selezionare nuovi ceppi batterici (alloctoni) capaci di degradare gli inquinanti.

La tab. 4 mostra, comunque, che l'applicazione di processi biologici di trattamento è prevalentemente destinata agli idrocarburi e agli oli minerali; limitazioni d'uso possono essere presenti anche in terreni a granulometria fine (tab. 5).

Oltre al compostaggio, le tecniche che prevedono la rimozione del terreno per sottoporlo a trattamento sono rappresentate, ad esempio, dall'uso di bioreattori e dal "land-farming".

Con il primo sistema, il terreno asportato viene introdotto in reattori in cui agiscono batteri appositamente selezionati. Con il secondo sistema, uno spessore di terreno inferiore a 50 cm viene steso su uno strato sabbioso appoggiato su materiale impermeabile. Il terreno, trattato con batteri e nutrienti, viene periodicamente dissodato; l'acqua di percolazione viene raccolta e ricircolata.

Nonostante il lungo tempo necessario per la riduzione degli inquinanti a livelli accettabili, la necessità di controllare le condizioni fisico-

chimiche ambientali e l'esigenza di sperimentare l'affidabilità dei microrganismi in laboratorio, il trattamento biologico presenta anche i vantaggi di costi contenuti e di produrre alla fine del ciclo un terreno non inerte.

Questo tipo di decontaminazione del terreno è stato prevalentemente sperimentato nell'industria petrolifera (benzina, gasolio, olio combustibile, idrocarburi aromatici, ecc.) mentre sono scarsamente provati gli effetti su altre sostanze.

FATTIBILITA' E APPLICABILITA' DEI METODI DI TRATTAMENTO BIOLOGICO IN SITO

I costi elevati relativi alle attrezzature e ai composti chimici da utilizzare, nonché i problemi operativi da superare, impongono approfondite indagini di campo e di laboratorio per verificare la fattibilità del trattamento biologico in sito con sufficiente efficacia e sicurezza. Tali indagini riguardano le caratteristiche del sito, dell'inquinante e della componente microbologica.

Tab. 5 - Applicabilità di tecnologie di trattamento del terreno in relazione alle caratteristiche litologiche del sito: A = applicabile; N = non applicabile; P = parzialmente applicabile (da NOELL-KRC GmbH, 1990)

Tecnologia	Tipo di terreno				
	Terreni sabbiosi grossolani	Terreni sabbiosi con humus	Limi e argille	Terreni con molta sostanza organica	Terreni molto eterogenei
Aspirazione sostanze tossiche disciolte	A	P	N	P	P
Aspirazione dei gas presenti nel suolo	A	A	N	P	P
Incenerimento: Alta temperatura con post-combustione	A	A	A	P	A
Bassa temperatura con post-combustione	A	A	A	P	A
Lavaggio, processi estrattivi	A	P	N	P	P
Processi biologici	A	A	P	A	A

Caratterizzazione del sito

Il sito dove si intende operare un trattamento biologico di risanamento deve essere studiato in termini di:

- proprietà dell'acquifero, con particolare riguardo a: struttura idrogeologica e sua eterogeneità, spessore, presenza di aquitards e aquicludes, valori di conducibilità idraulica, porosità efficace e frazione argillosa presente;
- modalità di alimentazione e di deflusso della falda: variazioni spaziali e temporali del flusso idrico sotterraneo, soggiacenza della falda, direzione del flusso, aree di ricarica, modalità di alimentazione ed escursioni del livello della falda;
- qualità delle acque sotterranee: per assicurare l'efficacia del trattamento è necessario conoscere la concentrazione dei nutrienti inorganici e dell'ossigeno disciolto; la conoscenza degli equilibri chimici permette, inoltre, di prevedere eventuali reazioni di precipitazione-dissoluzione e di ossido-riduzione indotte dall'introduzione di sostanze dall'esterno;
- ubicazione delle strutture sul territorio di studio: è necessaria una perfetta conoscenza dei luoghi per verificare la possibilità di installare il sistema di trattamento evitando interferenze con l'esistente;
- sistemi di controllo del prelievo di acque: sono necessari punti di misura (piezometri) per controllare il livello della falda in seguito all'emungimento di acque dal sottosuolo, anche in relazione all'eventuale utilizzo delle acque nel sito di indagine;
- valutazione della pericolosità potenziale della contaminazione, in relazione alla presenza di captazioni di acque ad uso potabile o irriguo.

Caratteristiche dell'inquinante

La scelta della tipologia di trattamento e la valutazione della sua applicabilità ed efficacia richiedono la conoscenza delle caratteristiche della contaminazione, in particolare per i seguenti aspetti:

- natura dell'inquinante: sostanze presenti e concentrazione di ciascuna di esse;
- modalità di rilascio dell'inquinante: la previ-

sione dell'evoluzione della massa inquinante richiede la conoscenza della fonte e la determinazione della modalità di rilascio (istantanea, continua, periodica) e della datazione e durata dell'immissione nel suolo o nel sottosuolo;

- distribuzione dell'inquinante nell'acquifero: determinazione della distribuzione orizzontale e verticale e delle aliquote "disciolta", "in galleggiamento", "intrappolata" e "approfondita" all'interno dell'acquifero;
- degradabilità dell'inquinante ed eventuale presenza di sostanze tossiche; devono essere indagati anche gli aspetti di trasformazione degli inquinanti in relazione a meccanismi chimico-fisici.

Caratteristiche microbiologiche

Devono essere considerate le caratteristiche della popolazione microbica indigena e le eventuali trasformazioni che si vogliono introdurre nel sottosuolo al fine del risanamento delle acque sotterranee. In particolare, devono essere indagati i seguenti aspetti:

- popolazione microbica presente (composizione specifica e attività);
- interazioni microrganismi-inquinante: alcuni microrganismi possono essersi già "acclimatati" ai contaminanti e possono pertanto essere studiate le esigenze nutrizionali per favorirne la crescita;
- reazioni di biodegradazione da indurre: alla luce di quanto sopra rilevato è possibile prevedere l'estensione da attribuire alle reazioni di biodegradazione e l'aliquote di trasformazioni da provocare.

Il trattamento biologico in sito -accompagnato da interventi di tipo idrogeologico che prevedono la possibilità di controllare ed eventualmente rimuovere la massa inquinante trattata- è più efficace sui composti organici, in condizioni aerobiche e in terreni di elevata conducibilità idraulica, per le maggiori possibilità di movimento dei microrganismi.

In generale, tra i vantaggi del metodo si hanno: applicabilità soprattutto per idrocarburi ed altri composti organici; conservazione delle

condizioni idrogeologiche; costi relativamente ridotti; applicabilità anche in presenza di un flusso idrico sotterraneo significativo (che sposta la zona contaminata).

Tra gli svantaggi si segnalano invece: possibile intasamento dei pori da parte dei microrganismi; eventuale tossicità per i microrganismi di alcuni inquinanti, anche in tracce; peggioramento qualitativo delle acque conseguente all'aggiunta di elementi nutritivi; eventuali problemi di qualità delle acque legati all'introduzione di specie alloctone.

Quest'ultimo aspetto, unito all'incertezza sulla reale conformazione della zona inquinata e della struttura idrogeologica, nonché la conoscenza parziale degli inquinanti che coesistono con quello da rimuovere e la mancanza di una diffusa casistica in Italia, rendono il metodo di trattamento biologico poco accettabile alle Autorità Sanitarie.

CONCLUSIONI

L'applicazione a casi reali delle metodologie di trattamento biologico in sito prevede una serie di indagini interdisciplinari che coinvolgono l'idrogeologia, la biologia e l'ingegneria. La fattibilità dell'intervento deve essere studiata con indagini di campo e di laboratorio che riguardano le caratteristiche del sito, dell'inquinante e della componente microbiologica.

Il metodo risulta efficiente per la decontaminazione da idrocarburi, sia del terreno che dell'acquifero. Per entrambi i tipi di trattamento biologico in sito (miglioramento e acclimatazione) l'applicazione del metodo comporta vantaggi connessi alla possibilità di ottenere un risanamento definitivo.

Molto spesso, tuttavia, il trattamento risulta integrativo di altri interventi (pompaggio, soil venting, ecc.) -soprattutto se si intendono raggiungere concentrazioni dell'ordine del $\mu\text{g}/\text{l}$ - e può provocare modificazioni dell'acquifero legate a fenomeni di intasamento o di produzione di sostanze tossiche. In generale, per poter applicare il metodo con sufficienti garanzie, è necessario che si verifichino le seguenti condizioni:

- l'inquinante deve essere costituito prevalentemente da idrocarburi;
- non devono essere presenti sostanze tossiche per i microrganismi;
- il trattamento del terreno con idrocarburi sulla matrice solida non è consigliato in presenza di materiali a granulometria fine;
- la contaminazione delle acque deve riguardare una falda con soggiacenza non elevata;
- il pennacchio inquinante deve essere stato delimitato nella sua estensione tridimensionale;
- devono essere noti i valori dei parametri idrogeologici e di quelli microbiologici e chimico-fisici dell'inquinante;
- l'evoluzione del pennacchio inquinante trattato deve essere osservabile con piezometri di controllo e gestibile con pozzi di prelievo;
- deve essere data prevalenza alla possibilità di ricircolare l'acqua di processo (prelievo-ricarica);
- l'area trattata deve essere posta a distanza di sicurezza dalle captazioni, in modo tale che il tempo di residenza sia superiore alla vita dei microrganismi.

Con queste avvertenze possono essere raggiunte maggiori garanzie di salvaguardia ambientale e della salute umana. Rimane comunque aperto, per questo come per altre tipologie di interventi di risanamento, il problema della definizione dei limiti di decontaminazione che è necessario raggiungere per poter considerare conclusi il disinquinamento dell'acquifero e la bonifica dei terreni contaminati.

BIBLIOGRAFIA

- AA. VV. - 1988. Soils Contaminated by Petroleum: Environmental & Public Health Effects. Calabrese E.J., Kostecki P.T. Editors, John Wiley & Sons, New York.
- ALEXANDER M. - 1981. Biodegradation of chemicals of environmental concern. Science, 211.

- AMERICAN INSTITUTE OF PETROLEUM - 1972. The Migration of Petroleum Products in Soil and Groundwater - Principles and Countermeasures.
The Institute, Washington D.C., Publ. N. 4149.
- BERETTA G.P. - 1992. Idrogeologia per il disinquinamento delle acque sotterranee.
Pitagora ed., Bologna.
- BIO TREATMENT LTD - 1990. Decontamination of land (1) - A case study.
- BOSSERT I., BARTHA R. - 1984. The fate of petroleum in soil ecosystems.
In: "Petroleum Microbiology", Atlas R.M. Ed., Macmillan, New York.
- CICIONI G., GIULIANO G. - 1991. Un'indagine sui casi di inquinamento delle acque sotterranee ad uso potabile, primi risultati.
Atti 1° Conv. Naz. sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee, Marano sul Panaro (Modena), 20-22 sett. 1990, vol. 3.
- DRAGUN J. - 1988. Microbial Degradation of Petroleum Products in Soil.
in: "Soils Contaminated by Petroleum: Environmental & Public Health Effects", Calabrese E.J., Kostecki P.T. Editors, John Wiley & Sons, New York.
- FRANZIUS V. - 1987. Nuovi sviluppi delle tecniche di risanamento dei terreni contaminati.
RS-Rifiuti Solidi, vol. 1, n. 3.
- JHAVERI V., MAZZACCA A.J. - 1983. Bio-reclamation of Ground and Groundwater Case History.
Proceedings of the National Conference on Management of Uncontrolled Waste Sites, Hazardous Materials Control Research Institute, Silver Spring.
- JHAVERI V., MAZZACCA A.J. - 1986. Bio-reclamation of Ground and Groundwater by in Situ Biodegradation.
In: "Groundwater Hydrology, Contamination and Remediation". Khanbilvardi R.M., Fillos J. Ed.s, Scientific Publications Co., Washington D.C.
- LEE M.D., WARD C.H. - 1984. Microbial Degradation of Selected Aromatics at Hazardous Waste Site.
Development in Industrial Microbiology, v. 25.
- LEE M.D., WARD C.H. - 1985. Microbial Ecology of a Hazardous Waste Disposal Site: Enhancement and Biodegradation.
Proc. 2nd Int. Conference on Ground Water Quality Research, Durham, March 1984, OSU Printing Service.
- MCCARTY P., REINHARD M., RITTMAN B.E. - 1981. Trace Organics in Groundwater.
Environ. Sci. Technol., vol. 15.
- MORGAN P., WATKINSON R.J. - 1990. Assessment of the potential for in situ biotreatment of hydrocarbon-contaminated soils.
In: "Contaminants in the subsurface environment", McCarty P.L., Roberts P.V. Ed.s, Water Science and Technology, vol. 22, n. 6, I.A.W.P.R.C., Pergamon Press, Oxford.
- NOELL-KRC UMWELTECHNIK GMBH - 1990. Bodensanierung mit System.
- PETEREC L.J. - 1988. A Case Study in Petroleum Contamination: The North Babylon, Long Island Experience.
in: "in: "Soils Contaminated by Petroleum: Environmental & Public Health Effects", Calabrese E.J., Kostecki P.T. Editors, John Wiley & Sons, New York.
- RAYMOND R.L. - 1984. Reclamation of Hydrocarbon Contaminated Ground Water.
U.S. Patent 3, 846, 290, November 5.
- RITTMAN B.E., MCCARTY P.L. - 1981. Evaluation of Steady-State-Biofilm Kinetics.
Biotechnology and Bioengineering.
- TEXAS RESEARCH INSTITUTE, INC. - 1982. Feasibility Studies on the Use of Hydrogen Peroxide to Enhance Microbial Degradation of Gasoline.
American Petroleum Institute, Washington D.C.
- THOMAS J.M., GORDY V.R., FIORENZA S., WARD C.H. - 1990. Biodegradation of BTEX in subsurface materials contaminated with gasoline: Granger, Indiana.
In: "Contaminants in the subsurface environment", McCarty P.L., Roberts P.V. Ed.s, Water Science and Technology, vol. 22, n. 6, I.A.W.P.R.C., Pergamon Press, Oxford.
- WERNER P. - 1989. Experiences in the use of microorganisms in soil and aquifer decontamination.
In: Contaminant Transport in Groundwater", Proceedings of Stuttgart Symposium, 4-6 April, Kobus H.E., Kinzelbach W., Ed.s, A.A. Balkema, Rotterdam.
- WILSON B.H., REES J.F. - 1986. Biotransformation of Gasoline Hydrocarbon in Methanogenic Aquifer Material.
Proc. NWWA/API Conference on "Petroleum Hydrocarbon and Organic Chemicals in Ground Water - Prevention, Detection and Restoration", Houston, Texas, November 1984, National Water Well Association, Worthington, Ohio, 128.