



POLITECNICO DI MILANO  
DIPARTIMENTO DI  
INGEGNERIA IDRAULICA  
AMBIENTALE E DEL RILEVAMENTO

ANDIS ASSOCIAZIONE NAZIONALE DI  
INGEGNERIA SANITARIA-AMBIENTALE  
DELEGAZIONE DI MILANO

# TRATTAMENTO E RECUPERO DEI TERRENI CONTAMINATI

*A cura di: Eugenio de Fraja Frangipane e Renato Vismara*

XXXIX Corso di Aggiornamento in Ingegneria Sanitaria  
MILANO, 29 GIUGNO-2 LUGLIO 1992

NELL'AMBITO DEL PROGRAMMA DI ISTRUZIONE PERMANENTE  
DELLA FACOLTÀ DI INGEGNERIA DEL POLITECNICO DI MILANO



POLITECNICO DI MILANO  
DIPARTIMENTO DI  
INGEGNERIA IDRAULICA  
AMBIENTALE E DEL RILEVAMENTO

**ANDIS** ASSOCIAZIONE NAZIONALE DI  
INGEGNERIA SANITARIA-AMBIENTALE  
DELEGAZIONE DI MILANO

# TRATTAMENTO E RECUPERO DEI TERRENI CONTAMINATI

XVIII/A - BONIFICA INTEGRATA DI SUOLI ED ACQUE SOTTERRANEE CONTAMINATE DA  
IDROCARBURI .- PARTE PRIMA: GENERALITA'

M. Samaja (\*)

---

(\*) Dott. Mario SAMAJA - Idrogeologo, Project Manager; Groundwater Technology  
Italia, S.r.l. - Viale Madonna 6/E; 22063 Cantù CO - tel. 031/711786-711841

## I N D I C E

- I - **NORMATIVA IN MATERIA DI BONIFICHE: SITUAZIONE ATTUALE E TENDENZE IN ITALIA E NEI MAGGIORI PAESI INDUSTRIALIZZATI**  
A. Capria
- II - **DANNO AMBIENTALE, RESPONSABILITA' PUBBLICA E PRIVATA, CIVILE E PENALE**  
A. De Cesaris
- III -
- IV - **PIANI REGIONALI DI BONIFICA: ASPETTI TECNICI E NORMATIVI**  
A. Milani
- V - **CRITERI PER LA DEFINIZIONE DI STANDARD DI QUALITA' PER I SUOLI**  
C. Acaia, G. Andreottola
- VI - **NATURA E COMPORTAMENTO DEGLI INQUINANTI INORGANICI NEL TERRENO**  
G. Petruzzelli, S. Cervelli
- VII - **NATURA E COMPORTAMENTO DEGLI INQUINANTI ORGANICI NEL TERRENO**  
G. Petruzzelli, S. Cervelli
- VIII - **PROPAGAZIONE DEI CONTAMINANTI NELLE ACQUE SOTTERRANEE**  
G. P. Boretta
- IX/A - **TECNICHE DI INDAGINE DEI SITI CONTAMINATI - PARTE PRIMA**  
G. Pezzetti
- IX/B - **TECNICHE DI INDAGINE DEI SITI CONTAMINATI METODI GEOFISICI  
PARTE SECONDA**  
A. T. Gruszka
- X - **POTENZIALITA' DEL TELERILEVAMENTO NELLE INDAGINI PRELIMINARI DI IDENTIFICAZIONE DEI SITI CONTAMINATI**  
P. A. Brivio, E. Zilioli
- XI - **STUDIO CONOSCITIVO DELLE VECCHIE DISCARICHE MEDIANTE INDAGINI IN SITU**  
R. Cossu, G. Ranieri, G.M. Motzo
- XII/A - **VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI PERICOLOSITA' DERIVANTE DA TERRENI CONTAMINATI - PRIMA PARTE**  
R. Vismara, C. Scalvini
- XII/B - **METODOLOGIE DI ANALISI DEI RISCHI PER LE AREE CONTAMINATE  
PARTE SECONDA**  
S. Cernuschi
- XIII - **TECNICHE DI ISOLAMENTO MEDIANTE BARRIERE DI CONTENIMENTO**  
M. Manassero
- XIV - **STUDI IDROGEOLOGICI PER IL CONTENIMENTO DEGLI INQUINAMENTI**  
V. Francani

- XV - ESPERIENZE DI ISOLAMENTO MEDIANTE DIAFRAMMI  
B. De Paoli, P. Marcellino
- XVI - TRATTAMENTO MICROBIOLOGICO IN-SITU DEI TERRENI CONTAMINATI  
R. Vismara, L. Longhi, P. Butelli
- XVII/A - TRATTAMENTI BIOLOGICI ON-SITE\OFF-SITE DEI TERRENI CONTAMINATI:  
PRINCIPI, CAMPO DI APPLICAZIONE E RISULTATI APPLICATIVI  
PRIMA PARTE  
G. Andreottola, A. Vadstrup
- XVII/B - TRATTAMENTI BIOLOGICI ON-SITE\OFF-SITE DEI TERRENI CONTAMINATI:  
CASI DI SPECIE - SECONDA PARTE  
A. W. Bourquin
- XVIII/A - BONIFICA INTEGRATA DI SUOLI ED ACQUE SOTTERRANEE CONTAMINATE DA  
IDROCARBURI - PARTE PRIMA : GENERALITA'  
M. Samaja
- XVIII/B - BONIFICA INTEGRATA DI SUOLI ED ACQUE SOTTERRANEE CONTAMINATE DA  
IDROCARBURI - PARTE SECONDA: CASI DI SPECIE  
I. Bonfà, A. Campione, S. Di Nauta, M. Samaja
- XIX - TRATTAMENTO TERMICO DEI TERRENI CONTAMINATI  
U. Ghezzi
- XX - INCENERIMENTO CON IMPIANTI MOBILI  
M. Zagaroli, L. Zocchi
- XXI - TECNICHE DI INERTIZZAZIONE DEI TERRENI CONTAMINATI  
P. Berbenni, F. Nobili
- XXII - PROCESSI ON-SITE\OFF-SITE DI LAVAGGIO DEI TERRENI CONTAMINATI  
G. Andreottola, A. Piepoli
- XXIII - POSSIBILITA' DI RIUTILIZZO DEI TERRENI DECONTAMINATI TERMICAMENTE  
G. Giovannini, G. Petruzzelli
- XXIV - RISANAMENTO DELLA DISCARICA DI GERENZANO: INTERVENTO SULLA FALDA  
CONTAMINATA DA PERCOLATO  
F. Andretta, P. Comolli

**BONIFICA INTEGRATA DI SUOLI ED ACQUE SOTTERRANEE CONTAMINATE  
DA IDROCARBURI. PARTE PRIMA: GENERALITA'**

**M. Samaja \***

I n d i c e

1. INTRODUZIONE
2. DEFINIZIONE DEL PROBLEMA
  - 2.1 Caratteristiche idrogeologiche del sito
  - 2.2 Caratteristiche della contaminazione
3. METODI DI BONIFICA
  - 3.1 Recupero delle fasi separate
  - 3.2 Pompaggio e trattamento dell'acqua di falda
  - 3.3 Ventilazione del suolo
  - 3.4 Air Sparging
  - 3.5 Biodegradazione naturale stimolata
  - 3.6 La scelta del metodo
4. BONIFICA INTEGRATA
5. BIBLIOGRAFIA

---

\* Dott. Mario SAMAJA; Idrogeologo, Project Manager.  
Groundwater Technology Italia, S.r.l. (Cantù, CO)

## 1. INTRODUZIONE

L'inquinamento del suolo e delle acque sotterranee a seguito di perdite accidentali di idrocarburi od altri prodotti chimici è oggigiorno un evento frequente.

Nei Paesi industrializzati, la densità sul territorio delle potenziali fonti di contaminazione è assai elevata. Raffinerie, depositi di olii e combustibili, oleodotti, stazioni di servizio ed ogni altra attività commerciale od industriale che comporti la produzione, il trattamento, il trasporto, lo stoccaggio o lo smaltimento di prodotti petroliferi possono dar luogo a perdite accidentali, con conseguente contaminazione del sottosuolo e/o delle acque sotterranee. Analoghe considerazioni si possono facilmente estendere dai prodotti petroliferi ad una vasta gamma di prodotti chimici di altro genere.

La crescente sensibilità dell'opinione pubblica e delle autorità alle problematiche della tutela ambientale in generale, ed alla protezione delle risorse idriche in particolare, hanno condotto nel corso degli ultimi 10 o 15 anni allo sviluppo di varie tecnologie di indagine e di bonifica dei siti contaminati.

Nonostante alcuni dei metodi qui brevemente descritti siano stati già ampiamente sperimentati con successo in alcuni Paesi (tra i quali gli U.S.A., l'Olanda, la Germania, e recentemente anche l'Italia), la complessità tecnica dei problemi da affrontare, congiuntamente al progredire continuo di leggi e regolamenti via via più restrittivi fanno sì che le metodologie di indagine e di bonifica siano in continua e rapida evoluzione.

Nei paragrafi che seguono si descrive sinteticamente l'approccio operativo ai problemi di inquinamento del sottosuolo da idrocarburi e si presentano alcuni metodi di bonifica, con particolare riguardo ai metodi di bonifica *in situ*.

## 2. DEFINIZIONE DEL PROBLEMA

I fenomeni di contaminazione del sottosuolo e delle acque sotterranee sono in generale assai complessi. Le variabili che condizionano il movimento dei diversi fluidi (acque, idrocarburi liquidi, vapori, etc.) nel sottosuolo, e che regolano la loro interazione reciproca e con il suolo stesso sono molte, e generalmente di difficile quantificazione.

Alcuni di questi fattori condizionanti presentano un campo di variabilità esteso su diversi ordini di grandezza. La permeabilità dei vari litotipi, ad esempio, può presentare valori che abbracciano oltre 10 ordini di grandezza.

Le innumerevoli combinazioni di questi e di altri parametri rendono i fenomeni di contaminazione del sottosuolo molto complessi, non consentendo di elaborare metodi di bonifica universalmente applicabili. Ogni sito contaminato presenta caratteristiche peculiari ed uniche, da valutare caso

per caso ai fini della progettazione di un efficace sistema di bonifica.

La scelta del (o dei) metodi di bonifica *in situ* da adottare in ogni caso specifico presuppone sempre un'articolata e dettagliata indagine preventiva. Qualsiasi sistema di bonifica richiede inoltre un monitoraggio continuo, spesso con interventi di taratura durante lo svolgimento della bonifica stessa.

Lo scopo delle indagini preventive è la definizione dettagliata, caso per caso, del problema specifico su cui si deve intervenire: in questa fase si deve ottenere (compatibilmente con ovvie esigenze di economicità e di attuazione pratica degli interventi di indagine) il maggior numero di dati possibile riguardo a:

- caratteristiche idrogeologiche del sito
- caratteristiche della contaminazione

## 2.1 Caratteristiche idrogeologiche del sito

Le caratteristiche idrogeologiche di ciascun sito contaminato ricoprono un ruolo fondamentale nel determinare il movimento e la distribuzione di un inquinante nel sottosuolo.

La corretta comprensione di tali caratteristiche è di primaria importanza nello studio di un sito contaminato, e nella scelta e progettazione dei sistemi di bonifica più adatti ad ogni caso specifico.

Tra le caratteristiche idrogeologiche naturali andranno in generale determinate: le caratteristiche litologiche ed idrauliche (granulometria, permeabilità, etc.) del terreno non saturo, il suo spessore, il suo comportamento riguardo al contaminante di interesse (permeabilità, capacità di ritenzione, etc.); le caratteristiche geometriche (profondità, spessore, limiti laterali, etc.), litologiche ed idrauliche (permeabilità, trasmissività, direzione di flusso naturale, gradiente, etc.) dell'acquifero più superficiale ed eventualmente di acquiferi più profondi; le variazioni periodiche del livello della superficie freatica; i rapporti dell'acquifero contaminato con altri acquiferi (più profondi, o comunque distinti); la presenza di corpi idrici superficiali ed i loro rapporti con l'acquifero (o gli acquiferi) di interesse; le modalità e l'entità approssimativa della ricarica degli acquiferi, e qualunque altro parametro possa rivelarsi di interesse relativamente al caso specifico.

Si deve accertare la presenza di elementi artificiali che influenzino l'idrogeologia a scala locale, quali pozzi, dreni od altri manufatti interrati che possano in qualsiasi modo condizionare il moto dei fluidi nel sottosuolo.

In presenza di contaminanti volatili, si deve valutare con particolare attenzione la permeabilità del sottosuolo non saturo ai vapori e l'esistenza di vie di flusso preferenziali per i vapori stessi.

## 2.2 Caratteristiche della contaminazione

La conoscenza delle caratteristiche del fenomeno di contaminazione in atto è indispensabile ai fini di progettare un adeguato sistema di bonifica.

La massa di contaminante accidentalmente immesso nel sottosuolo, il tipo di prodotto e le sue caratteristiche chimico-fisiche determinano, congiuntamente alle caratteristiche idrogeologiche del sito, le modalità di movimento, di trasporto e di distribuzione del contaminante stesso nel sottosuolo.

### 2.2.1 Le quattro fasi\* di impatto

Gli idrocarburi accidentalmente rilasciati possono trovarsi nel sottosuolo in quattro diverse fasi:

- fase separata: prodotto liquido, libero, mobile
- fase adsorbita (idrocarburi residuali): prodotto liquido, adsorbito ai granuli del terreno, immobile
- fase dissolta: idrocarburi in soluzione nelle acque sotterranee, mobili
- fase di vapore: idrocarburi volatili o semivolatili in stato aeriforme, mobili

La distribuzione degli idrocarburi tra le diverse fasi è il risultato dei processi di moto e di trasporto nel sottosuolo, e dipende dalle loro caratteristiche chimiche e fisiche e dalle caratteristiche idrogeologiche del sito. La presenza di percentuali diverse di prodotto in ciascuna delle fasi descritte è condizionata (oltre che dalla massa totale di prodotto disperso) da caratteristiche proprie del prodotto, quali viscosità, solubilità e tensione di vapore, e da caratteristiche idrogeologiche del sito, quali permeabilità e spessore della zona non satura, permeabilità della zona satura, velocità di flusso della falda ed altre.

Nell'approccio pratico ad un caso di contaminazione del sottosuolo da idrocarburi, avente come fine la bonifica del sito, la distribuzione del contaminante nelle diverse fasi va considerata sotto due distinti punti di vista:

- in termini di estensione areale della zona contaminata, o di volume di sottosuolo interessato da ciascuna fase della contaminazione
- in termini di severità della contaminazione imputabile a ciascuna fase, o di distribuzione di massa del contaminante tra le varie fasi

---

\* NOTA: Il termine "fase" viene qui impiegato come traduzione letterale dell'equivalente inglese "phase", ampiamente utilizzato nella letteratura scientifica americana (o comunque di lingua inglese) per descrivere la condizione di un contaminante nel sottosuolo.

La tabella seguente riporta, a titolo esemplificativo, la distribuzione del contaminante tra le varie fasi, in occasione di una perdita di benzina in terreni sabbiosi e ghiaiosi [2].

Tab. 1: Distribuzione di contaminanti tra le varie fasi

	Estensione della contaminazione		Distribuzione di massa del contaminante		
	Vol. di suolo interessato m <sup>3</sup>	% sul totale	massa kg	% sul totale	conc. ppm
FASE					
Separata	600	5,3	12155*	69,3	10 <sup>6</sup>
Adsorbita	2040	18,3	5200	29,7	2000
Dissolta	8500	76,3	180	1,0	15

\* Prodotto effettivamente recuperato

Questi dati, relativi ad un caso reale, permettono alcune considerazioni. In primo luogo, il flusso delle acque sotterranee appare essere il principale meccanismo di trasporto e diffusione areale della contaminazione, non appena il livello di idrocarburo in fase separata ha raggiunto un equilibrio: perciò, l'estensione areale della contaminazione in fase dissolta è generalmente molto maggiore rispetto a quella delle altre fasi.

La massa di contaminante contenuta in soluzione nelle acque di falda è funzione di diversi fattori, tra i quali il principale risulta essere la natura del prodotto disperso. Il suolo con idrocarburi residuali (fase adsorbita) costituisce perciò, se non bonificato, una continua fonte di contaminazione delle acque di falda, dato che può contenere una considerevole massa di inquinante, che in particolari condizioni viene rilasciato o dilavato, raggiunge la falda e vi passa in soluzione.

### 2.2.2 Ubicazione del contaminante nel sottosuolo

Oltre a definire la distribuzione del contaminante tra le varie fasi ed i volumi di suolo o di acque di falda interessati da ciascuna fase, è di primaria importanza conoscere l'ubicazione del contaminante nel sottosuolo.

Idrocarburi in fase adsorbita possono trovarsi sia nella zona non satura che in falda; alcuni contaminanti in fase dissolta possono, in determinate condizioni idrogeologiche, interessare soltanto la porzione più superficiale dell'acquifero, mentre in altri casi si ha una maggiore diffusione su tutto lo spessore dell'acquifero; prodotto in fase separata può formare livelli di forma lenticolare in galleggiamento sulla falda, nel caso di prodotti a densità minore rispetto a quella dell'acqua, mentre nel caso di

prodotti a densità maggiore si avranno accumuli in fase separata alla base dell'acquifero, al contatto con un livello impermeabile di base.

Ognuna di queste diverse situazioni richiede tecnologie di bonifica diverse, ed è perciò fondamentale conoscere l'ubicazione del contaminante nel sottosuolo.

### 3. METODI DI BONIFICA

#### 3.1 Recupero degli idrocarburi in fase separata

Il recupero degli idrocarburi liquidi in fase separata avviene generalmente con tecniche riconducibili ad una delle due tipologie seguenti:

- trincee e dreni
- pozzi di recupero

Il recupero del prodotto può avvenire:

- in condizioni statiche, cioè senza emungere acqua dalla trincea e recuperando unicamente il prodotto che vi affluisse spontaneamente
- in condizioni dinamiche, pompando acqua dalla trincea al fine di esercitare un controllo idraulico sulla porzione di acquifero prossima alla trincea stessa, incrementando l'afflusso di prodotto in fase separata.

Per il recupero di prodotti in fase separata da trincee o dreni (tanto in condizioni statiche che dinamiche) si utilizzano sistemi di pompaggio analoghi a quelli descritti poco oltre per i pozzi di recupero.

I pozzi di recupero costituiscono una seconda alternativa per il recupero di contaminanti in fase separata. Come per le trincee, il recupero può avvenire tanto in condizioni statiche che in condizioni dinamiche, cioè senza oppure con pompaggio di acque di falda.

In condizioni statiche si utilizzano recuperatori in grado di rimuovere e pompare in superficie soltanto gli idrocarburi in fase separata, sia che si trovino in galleggiamento sulla falda, sia che si trovino accumulati alla base di un acquifero (prodotti a densità maggiore rispetto all'acqua).

In condizioni dinamiche si possono utilizzare:

- sistemi ad una sola pompa, con estrazione congiunta di acqua ed idrocarburi (tale metodo, denominato "total fluid", comporta costi elevati per il trattamento dei fluidi estratti)
- sistemi a due pompe, con estrazione separata di acqua ed idrocarburi; il pompaggio dell'acqua può influire sulla fase dissolta oppure sull'acqua non contaminata, a seconda degli scopi del progetto. Tale metodo comporta il contenimento o l'annullamento dei costi di trattamento.

Operando in condizioni dinamiche è necessario contenere al massimo le oscillazioni della superficie freatica, al fine di minimizzare i movimenti verticali del livello di prodotto

in fase separata che sarebbero causa di contaminazione di maggiori volumi di suolo e di una diminuzione dell'efficacia del recupero.

### 3.2 Pompaggio e trattamento delle acque di falda

Il pompaggio dell'acqua di falda con successivo trattamento in superficie è stato ed è tuttora un metodo comunemente impiegato nella bonifica dei siti contaminati.

Se non applicata contemporaneamente ad altri sistemi, tale tecnica presenta alcune limitazioni, soprattutto in siti contaminati da idrocarburi o da altri contaminanti organici di caratteristiche simili.

Il pompaggio dell'acqua di falda consente infatti di recuperare soltanto i contaminanti in fase dissolta; la fase dissolta rappresenta però generalmente una percentuale esigua della massa totale del contaminante, sebbene interessi volumi di sottosuolo maggiori rispetto alle altre fasi di contaminazione (cfr. par. 2.2.1).

Dal punto di vista della bonifica *sensu strictu*, intesa come rimozione della sostanza inquinante dal sottosuolo, il solo pompaggio e trattamento dell'acqua di falda non consente il raggiungimento di risultati apprezzabili, se non viene integrato con altri metodi mirati alla bonifica delle fasi adsorbite, ed alla rimozione del prodotto in fase separata (se presente).

La massa di contaminante rimossa per unità di tempo con il solo pompaggio dell'acqua di falda è generalmente molto ridotta rispetto alla massa totale del contaminante presente.

Il terreno non saturo al di sopra della superficie di falda, che in genere contiene in fase adsorbita una percentuale notevole della massa totale di contaminante, se non bonificato continuerà a costituire una fonte di inquinamento per la falda stessa, per tempi anche molto lunghi.

I tempi di esercizio di un sistema di pompaggio e trattamento, non integrato da altre tecniche, risultano nella maggior parte dei casi indefiniti; il metodo risulta perciò in genere troppo lento e costoso (sul lungo periodo) come metodo di bonifica.

Il pompaggio dell'acqua di falda è invece un efficace metodo di contenimento e controllo della migrazione delle fasi dissolte, utilizzato per limitare l'espandersi dell'areale interessato dalla contaminazione.

Inoltre esso costituisce spesso un elemento indispensabile nei programmi di bonifica integrata, con applicazione contemporanea di diversi metodi.

### 3.3 Ventilazione del suolo

La ventilazione del suolo ("Soil Venting" o "Soil Vapor Extraction") è un metodo efficace per rimuovere contaminanti organici volatili dal suolo. In particolare, permette di

rimuovere idrocarburi od altri contaminanti organici volatili presenti in fase adsorbita nella zona non satura del sottosuolo.

Il metodo, pur presentando qualche rischio se non viene perfettamente calibrato, si rivela generalmente piuttosto rapido, efficace e dai costi relativamente contenuti. Gli unici due fattori che possono rendere la ventilazione del suolo del tutto inefficace sono la presenza di terreni a bassa permeabilità e la presenza di contaminanti non volatili.

I sistemi di ventilazione del suolo, se correttamente impiegati, costituiscono in molti casi una delle alternative più efficienti ed economicamente accettabili per la bonifica della zona non satura.

In linea di principio, i fenomeni fisici che stanno alla base di questa tecnica di bonifica sono piuttosto semplici: attraverso uno (o più) punti di estrazione vapori si induce un flusso d'aria nel terreno non saturo. In questo modo si incrementa il tasso naturale di volatilizzazione dei contaminanti adsorbiti ai granuli di terreno. I composti più volatili vengono rimossi per primi, mentre il prodotto residuale si arricchisce progressivamente in composti meno volatili. In risposta a questa differenziazione, le concentrazioni di contaminanti nell'aria estratta e la massa di prodotto rimosso nell'unità di tempo decrescono rapidamente durante la ventilazione. Tale diminuzione è resa più marcata dal fatto che in condizioni statiche (prima di iniziare l'estrazione vapori) l'aria contenuta nei pori del terreno è pressochè satura di vapori del contaminante, il che non avviene in condizioni dinamiche (in presenza di un flusso d'aria artificialmente indotto).

Un sistema di trattamento dei vapori si rende necessario in molte situazioni, in considerazione delle elevate concentrazioni di vapori estratte.

L'installazione di un sistema di ventilazione richiede accurate prove preliminari in sito, per determinare l'applicabilità del metodo ad ogni caso specifico, e per determinare alcuni parametri progettuali quali il numero, la localizzazione, la spaziatura e la tipologia costruttiva dei pozzi di ventilazione, le concentrazioni estraibili, il sistema di trattamento vapori più indicato.

I fattori principali che determinano l'efficacia di un sistema di estrazione vapori sono:

- la composizione del contaminante
- la portata estraibile
- il percorso del flusso d'aria rispetto alla zona contaminata

Sistemi correttamente installati permettono, ad esempio, di estrarre le benzine in percentuali prossime al 100%, mentre per i gasoli si raggiunge al massimo il 30% circa. In condizioni favorevoli, un sistema di ventilazione efficiente permette l'estrazione di una massa di contaminante che può andare da alcune decine di kg/giorno ad alcune centinaia di kg/giorno.

### 3.4 Air Sparging

Il metodo dell' Air Sparging consiste nell'immettere in falda aria in pressione. In questo modo si rimuovono contaminanti volatili presenti in fase dissolta e/o in fase adsorbita in zona satura; si trattano così, sia l'acqua di falda che il terreno saturo.

L'aria immessa in falda attraverso punti di iniezione si sposta lateralmente e verso l'alto nella zona satura; i composti volatili a contatto con l'aria volatilizzano e vengono trasportati dal flusso fino alla zona non satura, da dove possono raggiungere la superficie del suolo (ove ciò non costituisca un pericolo), oppure, più frequentemente, possono venire rimossi con sistemi di ventilazione (cfr. par. 3.3).

Un importante effetto secondario dell' Air Sparging è il mantenimento di elevate concentrazioni di ossigeno disciolto nell'acqua di falda, con conseguente incremento della degradazione biologica dei contaminanti presenti, anche se non volatili (cfr. par. 3.5).

L' Air Sparging è un metodo di recente introduzione, non ancora sufficientemente collaudato e non privo di rischi (a causa della crezione di potenziali miscele esplosive e per la difficoltà di controllare i percorsi di migrazione dei fluidi gassosi nel sottosuolo); per tali motivi esso viene applicato in casi particolari e con grandi cautele, e generalmente abbinato ad un sistema di ventilazione per recuperare i vapori mobilizzati.

### 3.5 Biodegradazione naturale stimolata in situ

La biodegradazione naturale stimolata *in situ* sfrutta la capacità dei microorganismi presenti nel sottosuolo di degradare sostanze organiche contaminanti. Il metodo viene applicato con successo da una quindicina d'anni per la bonifica *in situ* di terreni contaminati da idrocarburi, e più recentemente per un'ampia gamma di prodotti chimici diversi (solventi clorurati, PCB, pesticidi ed altri).

Gli idrocarburi accidentalmente immessi nel terreno vengono degradati da una parte dei microorganismi naturalmente presenti nel sottosuolo: i prodotti finali del processo di biodegradazione aerobica sono idealmente CO<sub>2</sub> e acqua, con diversi stadi intermedi.

In condizioni naturali la biodegradazione di contaminanti organici avviene però in modo estremamente lento. Le limitazioni al processo sono dovute principalmente ai seguenti fattori:

- condizioni ambientali nel sottosuolo
- tipo di contaminante
- fisiologia dei microorganismi presenti

Tra questi fattori, soltanto le condizioni ambientali possono essere modificate *in situ* con una certa efficacia. Per poter proliferare, i microorganismi necessitano di un ambiente adatto dal punto di vista fisico-chimico (temperatura, pH, salinità, etc.).

Nel caso della biodegradazione stimolata, le limitazioni poste dalle caratteristiche fisico-chimiche dell'ambiente sotterraneo si pongono in misura minore rispetto a quanto accade nel caso della bioaddizione. La biodegradazione naturale stimolata si basa infatti sull'attività di ceppi batterici indigeni, naturalmente presenti nel suolo e quindi già adattati alle condizioni specifiche del sito, mentre nel caso della bioaddizione i ceppi batterici selezionati ed immessi nel terreno da trattare devono adattarsi all'ambiente oltre che al contaminante.

Per ottimizzare il processo di degradazione biologica, i microorganismi devono disporre di alcuni elementi, indispensabili al loro sviluppo (principalmente C, H, O, N, P). Alcuni di questi elementi vengono resi disponibili dai contaminanti stessi; si rende quindi necessario fornire gli elementi mancanti, in modo da "bilanciare la dieta" dei ceppi batterici che utilizzano gli idrocarburi. Le analisi preliminari permettono di individuare le miscele di nutrienti più adatte per i microorganismi utilizzatori di idrocarburi presenti in ciascun sito.

Il fattore limitante più critico è generalmente la carenza di ossigeno disponibile. Non appena l'idrocarburo viene introdotto in un ambiente sotterraneo aerobico, ha inizio il processo di biodegradazione, con utilizzazione dell'ossigeno presente nell'ambiente. La biodegradazione degli idrocarburi porta perciò rapidamente a condizioni anaerobiche.

Per favorire la crescita batterica, e quindi la biodegradazione in condizioni aerobiche, l'ossigeno disponibile per i microorganismi diventa un fattore di grande importanza. La Tabella II (da Brown, 1987; modificata) mostra la dipendenza della crescita batterica dall'ossigeno disponibile.

Tabella II: Dipendenza della crescita batterica dall'ossigeno disponibile

Ossigeno disponibile	Batteri totali	Batteri utilizzatori di benzina
ppm	CFU/gr ( $\times 10^6$ )	CFU/gr ( $\times 10^6$ )
8	0,05	0,0001
40	5,5	0,7
112	75,0	27,0
200	207,0	31,0

CFU/gr = Colony Forming Units / grammo di suolo

L'ossigeno necessario a stimolare la crescita batterica e quindi la biodegradazione in condizioni aerobiche viene immesso nel sottosuolo artificialmente

La biodegradazione naturale stimolata presenta alcuni aspetti favorevoli rispetto ad altri metodi di bonifica. Essa consente di trattare *in situ* volumi considerevoli di suolo e di acque di falda, bonificando le fasi adsorbite (sia in falda

che in zona non satura) e la fase dissolta. Il contaminante viene convertito in composti meno dannosi dal punto di vista ambientale, e non semplicemente rimosso e trasferito altrove (come spesso avviene con i metodi di ventilazione o di pompaggio e trattamento delle acque, con i quali si trasferisce l'inquinante dal sottosuolo all'atmosfera o ai carboni attivi che devono a loro volta essere smaltiti o rigenerati). La biodegradazione naturale stimolata non introduce ceppi batterici estranei all'ambiente, ed al termine del processo di bonifica la situazione nel sottosuolo ritorna in tempi brevi a condizioni non dissimili dallo status pre-inquinamento. Infine, la degradazione naturale stimolata in situ presenta in molti casi costi ridotti rispetto ad altri metodi (quale ad esempio l'escavazione e smaltimento in discarica).

### 3.6 Biodegradazione naturale stimolata in situ ("On Site")

I principi della biodegradazione naturale stimolata esposti nel par. 3.5 possono essere applicati anche a suoli contaminati rimossi e stoccati in sito per il tempo necessario alla bonifica.

Con il suolo da bonificare si costituiscono delle pile di trattamento, alle quali si forniscono nutrienti ed ossigeno come nel caso della biobonifica stimolata in situ.

L'utilizzo di questa tecnologia è particolarmente indicato quando si debba procedere comunque all'escavazione del terreno contaminato (ad esempio, nella posa delle fondazioni per opere civili od altro), oppure nei casi in cui la rimozione del terreno sia tecnicamente agevole ed economicamente fattibile (ad esempio, nel caso di contaminazioni che interessino gli spessori più superficiali del suolo).

### 3.7 Scelta del metodo di bonifica

La scelta del (o dei) metodi di bonifica dipende da fattori diversi, di carattere tecnico, economico, giuridico ed altri. Tra di essi ricordiamo:

- fattibilità tecnica
- fattibilità economica
- congruenza del metodo con gli obiettivi prefissati
- prescrizioni ed obblighi di legge

L'influenza dei primi due fattori (fattibilità tecnica ed economica) appare evidente. Anche la congruenza del metodo con gli obiettivi prefissati riveste un ruolo primario nel determinare la scelta del (o dei) metodi da adottare.

Qualora ci si prefiggano obiettivi parziali, si interverrà con metodologie differenti rispetto ai casi in cui si tende alla bonifica completa di un sito. Un obiettivo parziale potrebbe consistere nel limitare l'areale contaminato, impedendo la migrazione delle sostanze

inquinanti: in questo caso potrebbero rivelarsi sufficienti sistemi di solo contenimento, e non di bonifica.

Un altro obiettivo parziale può consistere nel limitare l'afflusso di vapori di idrocarburi a locali interrati di edifici o ad altri manufatti sotterranei, nel qual caso si interverrà con sistemi di estrazione dei vapori nell'edificio interessato, o dal sottosuolo nelle sue immediate vicinanze, senza però bonificare l'intera area contaminata.

Va sottolineato come la scelta di un metodo adatto a perseguire un obiettivo specifico e parziale non consenta la bonifica completa di un sito, ma soltanto il raggiungimento dell'obiettivo in funzione del quale il metodo è stato scelto. La bonifica completa di un sito richiede interventi di tipo integrato, con utilizzo di diverse metodologie di disinquinamento, come descritto nel successivo cap. 4.

In molti casi, la scelta del metodo di bonifica viene condizionata non poco dalla necessità di ottemperare a specifiche normative, ove queste esistano.

#### 4. BONIFICA INTEGRATA

La complessità dei fenomeni di contaminazione del sottosuolo e delle acque sotterranee, e la distribuzione dei contaminanti organici nelle diverse fasi di impatto (cfr. par. 2.2) richiedono interventi di bonifica integrati, ossia interventi che prevedano l'impiego combinato di diverse metodologie al fine di ottenere la bonifica completa di un sito contaminato.

Salvo casi del tutto particolari infatti, ben difficilmente un intervento basato su di un unico metodo di bonifica potrà consentire di eliminare tutte le diverse fasi di contaminazione, sia in falda che in zona non satura.

La ventilazione del suolo non saturo, ad esempio, avrà un'influenza minima sul contaminante presente in falda (sia in fase dissolta che adsorbita), mentre il solo pompaggio dell'acqua di falda non consente di bonificare il terreno non saturo né di controllare i vapori. La stessa biodegradazione naturale stimolata, che appare il metodo singolo più completo oggi disponibile, può richiedere sistemi di controllo dei vapori o sistemi temporanei di contenimento del contaminante dissolto.

Le modalità per l'utilizzo congiunto dei vari metodi descritti e di ogni altra tecnologia che risultasse utile non possono essere codificate secondo criteri universalmente applicabili, ma vanno valutate caso per caso, in risposta alle caratteristiche peculiari di ciascun sito.

Il sistema di bonifica integrata adottato dovrà permettere di ridurre le varie fasi della contaminazione sino a livelli accettabili, o comunque a livelli precedentemente fissati come obiettivi, prendendo in considerazione la massa totale di contaminante presente, la sua distribuzione in ciascuna fase, l'ubicazione del contaminante nel sottosuolo e le caratteristiche idrogeologiche specifiche del sito.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Brenoel M., Brown R.A. (1985) Remediation of a leaking underground storage tank with enhanced bioreclamation. In: N.W.W.A. 5th symposium & exposition on aquifer restoration & ground water treatment.
- [2] Brown R.A. (1989) Oxygen sources for biotechnological applications. Biotechnology Work Group; Monterey, California.
- [3] Brown R.A., Hoag G.E., Norris R.D. (1987) The remediation game: pump, dig or treat. In: Water Pollution Control Federation Conference.
- [4] Brown R.A., Tribe R. (1990) Bioreclamation of spills. In: Hazardous Materials Management Magazine; June 1990
- [5] Fournier L. B. (1988) An effective treatment for contaminated sites. In: Hydrocarbon Technology International, Sterling Publ. Ltd.
- [6] Jamison V.W., Raymond R.L., Hudson J.O. Jr. (1975) Biodegradation of high-octane gasoline in ground water. Development in industrial microbiology, Vol. 16
- [7] Wilson J.B.; Brown R.A. (1989) In situ bioreclamation: a cost effective technology to remediate subsurface organic contamination. Ground Water Monitoring Review, Winter 1989
- [8] Yaniga P.M.; Smith W. (1985) Aquifer restoration: in situ treatment and removal of organic and inorganic compounds. In: Ground Water Contamination and Reclamation, A.W.R.A.
- [9] Yaniga P. (1988) Aquifer restoration: comprehensive address to organic chemical contamination. Proceedings of Agricultural Impacts on Ground Water Conference.
- [10] Yaniga P.; Harper C. (1989) Contaminant Hydrogeology. Chapter for the CHMM Examination Study Guide, Institute of Hazardous Materials Management.