

## RASSEGNA TECNOLOGIE DI BONIFICA

### Tecnologie per la bonifica dei terreni insaturi

#### **Soil Vapor Extraction e Bioventing**

Il **Soil Vapor Extraction** (SVE) è indicato per il trattamento della zona insatura e della porzione superficiale dell'acquifero in formazioni a permeabilità medio-alta, contaminate da composti organici volatili e semivolatili.

L'estrazione dei vapori di idrocarburi è effettuata producendo una depressione forzata su pozzi/trincee di aspirazione; il vuoto applicato permette l'aspirazione e la cattura sino in superficie dei vapori interstiziali per il loro successivo invio al sistema di trattamento.

La depressione che si crea in corrispondenza del pozzo e nell'area d'influenza dello stesso favorisce la mobilizzazione dei vapori interstiziali e la volatilizzazione dei composti volatili e semivolatili contaminanti i quali, migrando sino al pozzo di aspirazione, vengono convogliati in superficie.

Il sistema SVE è costituito generalmente dalle seguenti principali componenti:

- una rete di aspirazione costituita da piezometri/trincee opportunamente fessurati nella zona insatura;
- separatori di condensa;
- pompe (soffianti/aspiratori) in grado di sviluppare depressioni significative e di veicolare al sistema di trattamento in superficie i vapori interstiziali;
- filtri a carboni attivi per il trattamento della fase vapore (o altri sistemi di trattamento gas quali l'ossidatore catalitico);
- teste pozzo a tenuta ermetica complete di strumentazione di controllo (manometri/vacuometri) e valvolame;
- linee per il collegamento delle teste-pozzo di tutti i punti di SVE con l'impianto di estrazione;
- quadro elettrico di controllo.

Il funzionamento può essere così sintetizzato:

- il vuoto applicato alla testa di ogni pozzo determina un cono di depressione nella zona insatura che esercita ad una certa distanza (raggio di influenza) la rimozione e la cattura dei vapori che verranno poi trattati in superficie mediante l'utilizzo di sistemi di trattamento, generalmente a carboni attivi;
- il separatore di condensa posto in superficie separa i vapori dalla miscela di idrocarburi e vapore acqueo. I vapori vengono inviati ad un impianto di trattamento delle emissioni gassose (p.e. filtro a carboni attivi) e quindi scaricati in atmosfera in ottemperanza ai limiti di legge; le acque di condensa vengono temporaneamente accumulate in un serbatoio di stoccaggio, dotato di sensori di allarme e blocco del troppo pieno, e successivamente convogliate mediante pompa di rilancio dedicata ad un sistema di trattamento acque (qualora presente) o smaltite nel rispetto della normativa vigente in materia di rifiuti.

Il sistema SVE ha quindi come obiettivo primario la volatilizzazione dei contaminanti, secondariamente incide comunque sull'attività biodegradativa favorendo, a mezzo di un'ossigenazione del suolo, i processi naturalmente presenti ad opera di batteri autoctoni nei terreni contaminati da idrocarburi.

Esistono differenti configurazioni dei sistemi di SVE, alcuni prevedono la sola estrazione dell'aria, altri includono sia punti di immissione che di estrazione. Tale ultima configurazione è utilizzata al fine di ridurre i fenomeni legati alle cosiddette zone morte "*dead zones*" ovvero quei fenomeni legati alla presenza di aree/volumi della

zona insatura con bassa velocità di movimento dell'aria perché poste in mezzo a due differenti punti di estrazione e quindi con un gradiente di pressione ridotto o quasi nullo.

Le prestazioni del processo di SVE dipendono da diversi fattori:

- permeabilità all'aria della zona insatura;
- presenza di lenti poco permeabili o eterogeneità del suolo;
- caratteristiche chimico-fisiche del contaminante;
- umidità del suolo;
- profondità e fluttuabilità della falda.

In generale, nei casi relativi ai composti idrocarburici tipici della distribuzione dei carburanti per autotrazione, il sistema è efficace in suoli da mediamente a molto permeabili con assenza di stratificazioni o percorsi preferenziali (antropici e non) e con una soggiacenza della falda idrica sotterranea superiore ad 1,5 metri.

L'applicazione delle tecnologie esposte prevede l'esecuzione di prove pilota in campo ed eventualmente di prove di laboratorio preliminari. Principalmente nell'ambito della tecnologia di SVE devono essere eseguite delle prove di ventilazione per valutare:

- la curva del sistema suolo (portate/depressioni indotte);
- la permeabilità all'aria del terreno;
- raggio di influenza dei sistemi (Radium of influence – ROI);
- portata ottimale del sistema che genera il maggior recupero di volatili ottimizzando l'influenza nello spazio;
- il bilancio di massa dell'inquinante dal flusso estratto.

---

Il **Bioventing** consiste nell'abbattimento di tutti quei composti biologicamente degradabili, presenti all'interno del terreno insaturo, con l'ausilio di microrganismi presenti nel suolo e mediante la fornitura di ossigeno. In contrapposizione con la tecnica SVE, il bioventing impiega dei flussi di aria significativamente più ridotti, sufficienti a fornire l'ossigenazione necessaria all'attività microbica limitando l'azione di strippaggio/volatilizzazione dei contaminanti. Anche in questo caso, come per lo SVE, gli impianti funzionali alla bonifica sono costituiti da pozzi/trincee di iniezione per l'introduzione dell'aria necessaria ad alimentare la biodegradazione.

La permeabilità e la cinetica di degradazione in situ di un suolo influenzano l'efficacia della tecnologia del bioventing. Parametri fondamentali da considerare per il dimensionamento degli interventi sono tutti quelli già elencati nell'ambito dei sistemi di SVE, principalmente la granulometria del terreno e l'umidità che influenzano in modo determinante la permeabilità all'aria. Le combinazioni di alta umidità e granulometria fine della matrice sono sfavorevoli alla buona riuscita della bonifica con questa tecnica. Parametri specifici del bioventing, al di là delle caratteristiche tessiturali del suolo e chimiche del contaminante, sono quelli che influenzano specificatamente le condizioni di biodegradazione del sistema suolo e quindi potenzialmente limitanti l'applicazione della tecnologia.

Di seguito un elenco dei fattori specifici suddetti:

- presenza di accettori di elettroni (ossigeno in concentrazione non limitante)
- condizioni di pH del suolo (ottimali per l'attività microbica nel range 5÷9);
- contenuto di umidità (valori troppo bassi possono limitare la biodegradazione e l'efficienza del processo);
- temperatura (valori troppo bassi possono rallentare la cinetica di biodegradazione e quindi l'efficienza del sistema, dilatando i tempi di bonifica);

- concentrazione del contaminante (valori troppo elevati possono limitare la crescita batterica e ridurre l'azione biodegradativa);
- presenza di altri fattori limitanti la biodegradazione, quali inibitori tossici;
- concentrazioni necessarie di nutrienti nel suolo, principalmente azoto e fosforo (rapporto ottimale di biomassa:N :P pari a 100:10:1).

Nell'ambito dell'applicazione dei sistemi di BV devono essere eseguite le medesime prove previste per i sistemi di SVE: prove di ventilazione con l'obiettivo di definire la portata ottimale di ossigenazione del terreno in relazione alla distanza di influenza (generalmente superiore rispetto ai sistemi di SVE). In aggiunta è richiesta la realizzazione di specifiche prove di campo costituite da test respirometrici che hanno lo scopo di valutare preliminarmente l'attività biodegradativa naturalmente presente in sito nei terreni, definendo il tasso di biodegradazione del contaminante e quindi le tempistiche di funzionamento dei sistemi per l'abbattimento delle concentrazioni di contaminanti. Possono essere previsti, per casi di studio particolari, test di laboratorio per la valutazione preliminare delle condizioni di biodegradabilità del sito in rapporto all'interazione contaminate/soilo; nell'ambito dei nostri studi, esistendo una casistica ben nota e consolidata in termini di efficienza/efficacia di tali sistemi, tali prove non sono generalmente previste.

Ultimo aspetto importante nella gestione e conduzione dei sistemi di BV è data dalla necessità di ripetere nel tempo tali test respirometrici, durante la fase d'avanzamento della bonifica; le condizioni di biodegradazione sono, infatti, funzione delle concentrazioni presenti nel suolo, che nel tempo andranno generalmente a decrescere.

---

### **Scavo e smaltimento/trattamento in impianto autorizzato**

La tecnologia di bonifica consiste nella rimozione fisica del terreno contaminato asportato da scavi realizzati, nel deposito temporaneo in sito, nella sua classificazione per definirne lo stato di qualità finale e la destinazione finale e quindi nel conferimento ad idoneo impianto autorizzato di smaltimento/recupero.

Questa soluzione rappresenta un'alternativa valida nei casi di difficile trattabilità dei terreni in situ anche legata a situazioni di difficoltà operative e gestionali degli impianti di bonifica per mancanza di spazi o interferenze non sostenibili nello svolgimento dell'attività presente sul sito.

Questa soluzione non rappresenta sicuramente la scelta ottimale con riferimento ai principi di minimo impatto e maggiore sostenibilità ambientale che la norma di riferimento indica da perseguire; nei casi obbligati sarà importante privilegiare, laddove possibile ed in accordo alle norme vigenti in materia di rifiuto, le operazioni di trattamento e recupero dei terreni asportati piuttosto che le attività di smaltimento della totalità dei volumi in discarica.

### **Attenuazione naturale controllata**

I processi di attenuazione naturale includono una grande varietà di processi chimici, fisici e biologici che in condizioni favorevoli permettono la riduzione della massa, della tossicità, della mobilità, del volume e della concentrazione dei contaminanti nei suoli o in falda. I processi che contribuiscono alla riduzione della sola concentrazione, detti processi non distruttivi, includono la dispersione idrodinamica, l'adsorbimento, la diluizione e la volatilizzazione; altri che agiscono sulla riduzione della massa, detti processi distruttivi, includono i processi biologici o biodegradativi e processi di degradazione abiotica (ad esempio processi di idrolisi). Nell'ambito di interesse il processo di attenuazione principale è legato alla biodegradazione naturale dei composti idrocarburici ad opera dei microrganismi autoctoni presenti nei suoli ed in

falda. Il processo iniziale di biodegradazione è sicuramente di tipo aerobico, successivamente grazie alla velocità con cui l'ossigeno viene consumato da tali microrganismi, in condizione di scarsità, si instaurano dei processi di tipo anaerobico che divengono generalmente il motore principale di tutto il processo di attenuazione.

L'implementazione di soluzioni non strutturali come l'attenuazione naturale controllata può essere utilizzata come la sola alternativa economica per la bonifica di suoli e falde contaminate. Una scelta di questo tipo pone comunque la necessità di sviluppare un progetto ben strutturato, quale un piano d'azione, che preveda principalmente:

- pieno controllo della sorgente del plume;
- caratterizzazione del sito esaustiva e ben definita;
- valutazione dei tempi di bonifica in relazione agli obiettivi definiti;
- piano di monitoraggio a lungo termine per la verifica dell'efficacia del processo;
- piano delle azioni correttive o di emergenza in relazione ai dati rilevati nei monitoraggi.

L'attenuazione naturale controllata, secondo la definizione EPA (Environmental Protection Agency), consiste fondamentalmente in un approccio di gestione del plume che implica un suo monitoraggio a lungo termine.

L'attenuazione naturale è certamente più lenta di altri processi indotti e quindi è sostenibile oltre un certo periodo di tempo ed è ritenuta fattibile per siti molto vasti con una bassa concentrazione di inquinanti, ovvero assenza di fase surnatante, e in combinazione con altre tecnologie nella fase conclusiva nel recupero di un sito.

Tra i vantaggi risulta sicuramente meno onerosa delle tecnologie invasive, provoca un impatto minimo sulle attività svolte in sito ed in generale nel bilancio ambientale risulta più sostenibile. Un limite comunque importante è quello legato al mantenimento delle condizioni di sicurezza relativamente alla presenza di recettori sensibili a valle idrogeologica del plume di contaminazione.

### **Tecnologie per la bonifica congiunta di suolo/falda**

Il trattamento in situ delle matrici ambientali contaminate afferenti ai due distinti comparti "suolo insaturo" e "falda sotterranea" è ottenuto generalmente attraverso l'applicazione congiunta di diverse tecnologie come nel caso già discusso relativo all'applicazione del Soil Vapour Extraction – Air Sparging che agiscono rispettivamente sul suolo insaturo e sulla falda o come avviene con l'utilizzo congiunto dei sistemi di Soil Flushing e Pump and Treat e così via. Esistono comunque recenti soluzioni tecnologiche che affrontano con un unico sistema impiantistico il trattamento e la bonifica di entrambi i comparti ambientali. Nel seguito verrà descritto uno dei sistemi più comunemente utilizzato allo scopo nell'ambito di applicazione dei siti di nostro interesse.

#### **Sistemi di estrazione multifase "MPE"**

I sistemi di estrazione multifase sono sistemi di bonifica in situ, noti nella letteratura scientifica di riferimento come MPE (Multi Phase Extraction); essi contengono al loro interno diverse configurazioni impiantistiche che implicano l'utilizzo di uno o più sistemi di sollevamento/aspirazione (pompe).

Tali sistemi permettono appunto l'estrazione congiunta/contemporanea di più fasi:

- Fase liquida separata (surnatante);
- Fase disciolta contaminata;
- Fase gas/vapore.

Rappresentano dunque una soluzione innovativa per quei siti in cui si ha la presenza contemporanea di contaminazione sia nel suolo insaturo che in frangia capillare ovvero in falda.

L'applicazione più nota dei sistemi MPE interessa l'utilizzo della tecnologia con sistemi ad alto grado di vuoto a mezzo di una specifica tipologia di pompe (ad esempio: ad anello liquido o a lobi rotanti) che permettono la creazione di un vuoto spinto nei vari punti di estrazione esercitando l'azione di cattura dei gas dalle porzioni di suolo insaturo e contemporaneamente della fase liquida, eventuale surnatante o acque di falda contaminate, dalla frangia capillare o dal corpo più superficiale dell'acquifero.

L'applicazione che prevede l'utilizzo di questi sistemi ad alto grado di vuoto viene definita nella letteratura scientifica di riferimento come TPE (Two Phase Extraction): attraverso un'unica tubazione inserita in ciascun punto attrezzato (piezometro fessurato ad hoc) è possibile estrarre tutte le fasi presenti. Nel caso di estrazione di aria dal suolo insaturo si ha inoltre l'incentivazione della biodegradazione naturalmente presente a causa dell'ossigenazione del suolo, come avviene per i sistemi di SVE (configurazione TPE nota come Bioslurping).

Nella configurazione tipo suddetta il sistema è generalmente costituito dalle seguenti principali componenti:

- una rete di estrazione costituita da piezometri opportunamente fessurati nella zona insatura e satura;
- separatori acqua/olio nel caso di presenza di surnatante;
- separatorio acqua/gas del flusso multifase;
- pompe ad alto grado di vuoto (depressioni di targa alla pompa pari quasi al vuoto assoluto);
- filtri a carboni attivi per il trattamento della fase vapore (o altri sistemi di trattamento gas quali l'ossidatore catalitico);
- filtri a carbone attivo (con la presenza a monte di un eventuale air stripper) per il trattamento delle acque di falda contaminate;
- teste pozzo a tenuta ermetica complete di strumentazione di controllo (manometri/vacuometri) e valvolame;
- lancia di aspirazione del flusso multifase (slurp tube) collegate alla testa pozzo in modo ermetico e generalmente regolabili in altezza (in manuale o automatico);
- linee per il collegamento delle teste-pozzo di tutti i punti di MPE con l'impianto di estrazione;
- quadro elettrico di controllo.

I sistemi di estrazione multifase possono essere applicati con maggiore efficacia rispetto ai sistemi tradizionali (SVE, Pump and Treat) nei casi di permeabilità medio-basse; in tali situazioni l'azione del vuoto applicato, durante l'estrazione del flusso d'aria e di acqua/surnatante, esercita un maggiore richiamo in termini spaziali (maggiore raggio di influenza) e di produttività specifica (maggiori valori di portata di aria/acqua) in quanto si somma l'azione del vuoto alla depressione piezometrica indotta dalla differenza di livello idrico imposto (sovrapposizione degli effetti).

Gli obiettivi dei sistemi MPE possono essere molteplici, di seguito i principali:

- recupero del prodotto surnatante;
- desaturazione della frangia capillare e dell'acquifero superficiale per aumentare l'azione del sistema quale ventilazione del suolo (azione rafforzata di SVE/BV);
- aumentare/ottimizzare i volumi di pompaggio delle acque di falda rispetto ad un sistema tradizionale di Pump and Treat.

L'applicabilità del sistema è funzione dei diversi parametri già analizzati nell'ambito dei sistemi di ventilazione (SVE/BV) e dei sistemi di depressione della falda, ovvero

fondamentalmente delle proprietà fisiche del suolo saturo/insaturo, delle proprietà chimico-fisiche del contaminante, dei fattori che influenzano la biodegradazione in situ. Aspetti specifici che possono interferire con la massima efficacia/applicabilità del sistema sono infine la soggiacenza della tavola d'acqua e le relative variazioni stagionali; esiste un limite fisico di applicabilità all'estrazione dell'acqua attraverso il vuoto (circa 10 metri), oltre questa profondità il sistema è comunque in grado di sollevare l'acqua in un flusso multifase attraverso l'effetto di risalita/trascinamento (lift) legato alla velocità dell'aria nella tubazione di pescaggio (slurp tube) che deve mantenersi al di sopra di un certo valore.

L'implementazione di questa tipologia di sistemi, caratterizzati da maggiori costi capitali rispetto ai sistemi tradizionali, è preceduta dall'esecuzione di specifiche prove pilota in campo che vanno tarate in relazione all'obiettivo del sistema così come definito in precedenza. La prova può essere simile a quella di ventilazione vista per i sistemi SVE-BV per quanto riguarda il comparto insaturo ed invece, per la falda, si potranno eseguire prove simili a prove idrauliche di pompaggio, volte però, più che alla determinazione dei parametri idrogeologici dell'acquifero (individuabili con le prove standard di pompaggio), all'analisi dell'influenza del sistema nello spazio (analisi depressioni piezometriche vs. distanza dal punto d'estrazione).

La prova pilota per un sistema MPE, non facilmente schedabile per quanto precedentemente detto, è generalmente eseguita al fine di valutare principalmente i seguenti aspetti:

- depressioni indotte nell'insaturo (ROI nel suolo insaturo) al variare della depressione del sistema di pompaggio ed in relazione alla variazione del rapporto aria/acqua del flusso multifase;
- analisi andamento COV nell'insaturo, dai diversi punti d'estrazione e di monitoraggio, in relazione alla variazione delle depressioni indotte di cui sopra;
- analisi andamento parametri chimico-fisici dei gas interstiziali per la valutazione degli effetti di biodegradazione indotti dal sistema;
- depressioni piezometriche indotte nell'acquifero (ROI in falda) al variare della depressione del sistema di pompaggio, dell'altezza del tubo di pescaggio ovvero in relazione al rapporto aria/acqua;
- analisi del recupero dell'eventuale surnatante in relazione alla depressione ed all'altezza del tubo di pescaggio;
- verifica della capacità di desaturazione del sistema della frangia capillare;
- analisi dei bilanci di massa dell'inquinante nelle diverse fasi estratte.

## **Tecnologie per la bonifica della falda**

### **Pump&Treat**

La tecnica ***Pump&Treat*** (P&T) consiste nell'esercitare una depressione della superficie piezometrica per mezzo di un sistema di emungimento delle acque sotterranee e nel successivo trattamento dei volumi emunti con opportuni impianti, generalmente filtri di adsorbimento con carboni attivi.

La depressione esercitata genera un cono d'influenza attorno al punto di emungimento richiamando le acque sotterranee circostanti a mezzo di un locale gradiente idraulico imposto.

L'applicazione della tecnologia consiste generalmente delle seguenti parti:

- sistema di emungimento con pompa/e di tipo elettrosommersa o esterna autoadescante per il prelievo dell'acqua contaminata dai pozzi/trincee

idrauliche di estrazione; il numero di sistemi di pompaggio sarà funzione del flusso idrico da intercettare ovvero delle caratteristiche idrogeologiche del sistema acquifero, dell'estensione del plume e del tipo di sorgente contaminante;

- sistema di collettamento (piping, valvole ecc..) per l'invio del flusso all'impianto di trattamento;
- sezione di trattamento dell'acqua emunta ed eventuale sistema di re immissione della stessa nella falda o scarico in pubblica fognatura/acque superficiali.

Il sistema di P&T è generalmente utilizzato per il raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- esercitare un'azione di cattura delle acque impedendo una potenziale migrazione della contaminazione all'esterno del sito verso potenziali recettori sensibili nell'ambito di un'attività di messa in sicurezza (d'urgenza o operativa);
- ridurre la concentrazione dei contaminati presenti in falda e successiva rimozione degli stessi in superficie grazie agli impianti di trattamento.

Ai fini del raggiungimento degli obiettivi di bonifica, il P&T risulta particolarmente efficace per la rimozione di composti caratterizzati da una buona solubilità intervenendo esclusivamente sulla frazione disciolta della contaminazione.

Risente fortemente delle caratteristiche dei terreni costituenti l'acquifero ovvero dei meccanismi di ritardo del rilascio dei contaminati in falda dalla fase adsorbita; in terreni fini e con elevato contenuto organico, dove il fenomeno anzidetto risulta accentuato, l'applicazione della tecnologia è piuttosto limitata in relazione a tempi di bonifica necessari molto lunghi, e con fenomeni tipici di ricomparsa della contaminazione (effetto "*rebound*") successivi allo spegnimento di questi sistemi.

Al fine di incrementare l'efficacia del sistema, sono state sviluppate configurazioni di P&T più articolate, quali sistemi di *Dual-pump*, allineamenti di iniezione/estrazione e pozzi a ricircolo.

## **Air Sparging e Biosparging**

L'**Air Sparging** (AS) è una tecnica di bonifica che consiste nell'iniezione in falda di aria in pressione attraverso pozzi appositamente fenestrati nella zona satura.

Tale tecnica è utilizzata principalmente per il trattamento dei composti organici volatili e semivolatili, che vengono eliminati dalla fase disciolta e dal mezzo saturo per strippaggio (effetto primario). L'iniezione di aria provoca inoltre un aumento della concentrazione di ossigeno disciolto nell'acqua stimolando l'azione di biodegradazione aerobica dei contaminanti (effetto secondario).

Il sistema AS è generalmente costituito dalle seguenti componenti principali:

- una rete di iniezione costituita da pozzi verticali o trincee orizzontali opportunamente fessurati nella porzione satura;
- compressore in grado di insufflare l'aria in falda con la pressione e la portata di progetto;
- linee per il collegamento dall'impianto di immissione di aria alle teste-pozzo di cui saranno dotati tutti i punti di AS;
- strumentazione di regolazione e controllo dei sistemi;
- quadro elettrico di controllo.

Il sistema deve essere affiancato da un impianto di estrazione vapori allo scopo di recuperare i contaminanti volatilizzati nella zona vadosa, ponendo particolare

attenzione alla presenza di bersagli sensibili ed alla presenza di vie preferenziali di migrazione dei gas nel mezzo insaturo.

Il **Biosparging** è un processo analogo all'*Air Sparging*, in cui, a differenza di quest'ultimo, l'insufflazione di aria non è finalizzata allo strippaggio/volatilizzazione dei contaminanti d'interesse, ma all'ossigenazione della falda e del mezzo saturo favorendo la biodegradazione naturalmente presente. Oltre al diverso obiettivo anzidetto, la caratteristica peculiare che distingue questa configurazione dalla precedente interessa la portata di aria immessa, questa è significativamente inferiore rispetto all'*Air Sparging* (valutabile indicativamente in  $1/3 \div 1/5$  della portata dell'AS).

Il *Biosparging* è una tecnologia di bonifica in sito per il trattamento delle acque di falda e dell'acquifero che sfrutta l'attività di microrganismi autoctoni per biodegradare composti organici nella zona satura. In particolare, esso prevede sempre l'insufflaggio di aria contenente ossigeno, arricchita in alcuni casi con nutrienti (qualora necessari in relazione allo stato geochimico dei terreni) per incrementare l'attività biologica dei microrganismi. Si applica per ridurre le concentrazioni di contaminanti sia disciolti in acqua, sia adsorbiti nel terreno saturo o nella frangia capillare.

Questa tecnologia è stata sviluppata alla fine degli anni '80 per la stimolazione della biodegradazione dei contaminanti organici mediante il controllo dei livelli di ossigeno, umidità e nutrienti. Risulta perciò efficace su quei contaminanti che possiedono un buon grado di biodegradazione.

L'iniezione viene realizzata con le stesse modalità previste per l'*Air Sparging* ed è costituita dalle medesime parti d'impianto. La differenza sostanziale con i sistemi di AS è che generalmente non è necessario affiancare un sistema di ventilazione dell'insaturo per il recupero dei composti volatili in quanto il sistema dovrebbe essere regolato per minimizzare il più possibile la frazione volatilizzata rispetto a quella biodegradata.

I pozzi di insufflaggio, siano essi di AS o BS, vengono posti ad adeguata distanza e disposti generalmente con maglie regolari, tali da coprire uniformemente la superficie interessata dalla contaminazione, l'interasse tra gli stessi è funzione fondamentalmente delle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero.

### **Bioremediation accelerata/incentivata con utilizzo di reagenti: composti a rilascio di ossigeno (ORC<sup>®</sup>, Oxygen Release Compound)**

L'utilizzo di tecniche di biodegradazione naturale per la bonifica di matrici contaminate da idrocarburi, quando le condizioni sono favorevoli, è in piena sintonia con le linee guida della vigente normativa, che prescrive di limitare al massimo la generazione di rifiuti.

Di contro, il principale svantaggio pratico che limita tuttora l'utilizzo estensivo di tali tecniche è rappresentato, oltre che dalle competenze richieste per un accurato progetto dell'intervento, dall'elevato tempo necessario al raggiungimento degli obiettivi di bonifica, generalmente superiore rispetto a tecniche più invasive.

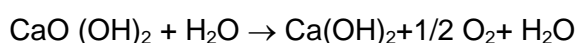
Questo problema può essere affrontato con le tecniche della enhanced bioremediation, incentrate sull'obiettivo di accelerare per quanto possibile i processi di biodegradazione naturali, rifornendo il sistema degli elementi necessari che risultano di caso in caso limitati. Questi possono essere rappresentati dalla scarsità di nutrienti, dalla presenza dei ceppi batterici non ancora adattati o non abbastanza numerosi, dalla mancanza di adeguate quantità di accettori di elettroni. Risultando spesso l'ultimo di questi fattori il più critico, va considerato che, nel caso di contaminazione da



idrocarburi la tipologia di degradazione di gran lunga più efficace e veloce è quella aerobica, quindi è necessaria la disponibilità di sufficienti quantità di ossigeno.

Una soluzione competitiva, che ha il grande vantaggio di non richiedere impianti attivi sul sito, è l'immissione localizzata e diretta di un composto in grado di rilasciare ossigeno in maniera prolungata e costante a contatto con le acque sotterranee della frangia capillare, dando luogo a prodotti secondari innocui. Uno dei possibili prodotti esistenti sul mercato, che risponde a questi requisiti è stato introdotto da qualche anno ad opera dell'americana Regenes Inc. con il nome di ORC<sup>®</sup> (Oxygen Release Compound).

L'ORC<sup>®</sup> è un composto di formulazione proprietaria, a base di calcio ossidrossido che, dopo l'idratazione, libera ossigeno e forma un semplice idrossido di calcio e acqua grazie alla seguente reazione:



La tecnologia brevettata di rilascio controllato (CRT<sup>®</sup>) permette un rilascio di ossigeno a lungo termine, fino a 12 mesi e fornisce le condizioni ottimali per la biodegradazione aerobica ininterrotta.

Il processo CRT<sup>®</sup> coinvolge l'inclusione dei fosfati nella struttura delle molecole di perossido solido; questa caratteristica brevettata rallenta la cinetica della reazione che produce ossigeno, dando così la possibilità di mantenere attiva l'ossigenazione per periodi lunghi.

Il prodotto si presenta in forma di una polvere fine, che può essere messa a contatto con le acque sotterranee secondo tre metodologie distinte:

- iniezione diretta mediante pompaggio a pressione anche elevate (fino a 30 atm) di una miscela acquosa con contenuto di solido variabile usualmente tra il 25% e il 50% ("slurry"), realizzabile mediante l'impiego di un sistema di aste cave. Le due tecniche principali prevedono un sistema di iniezione *bottom-up* con punta a perdere, nel quale le aste vengono ritratte liberando un tratto opportuno per poi immettere la miscela e attendere che questa si distribuisca nella porzione di acquifero circostante, oppure un sistema di iniezione che prevede l'utilizzo di una *pressure-activated injection probe* in fondo alla batteria di aste che inietta in maniera localizzata la miscela mentre si procede con la perforazione. Questa tecnica risulta essere la più utilizzata per economia e flessibilità di intervento;
- immissione di una miscela acquosa ad elevata densità, all'interno di perforazioni esistenti di diametro contenuto (max 4"), o a mezzo di calze filtranti contenenti il prodotto in forma solida pura "*filter socks*";
- distribuzione diretta di polvere o miscela acquosa di qualsiasi densità in scavi aperti.

Sono possibili due differenti approcci e metodologie:

- l'applicazione del prodotto in corrispondenza della zona sorgente e nella porzione idrogeologicamente a monte della stessa favorisce la riduzione dei contaminanti;
- l'applicazione a valle dell'area contaminata come barriera alla diffusione dei contaminanti e al fine dell'attenuazione del pennacchio di contaminanti residui e disciolti in acqua.

Differentemente dalle applicazioni standard di ossidazione chimica in situ, che prevedono l'utilizzo di prodotti fortemente ossidanti, l'intervento con questa tipologia di reagente risulta efficace su concentrazioni relativamente basse, presenti in falda, e quindi per il trattamento di contaminazioni residuali comunque fuori dai limiti di riferimento; nel caso di applicazione con obiettivo la riduzione della massa di inquinante in tempi rapidi e in aree "sorgente" il quantitativo da utilizzare risulterebbe troppo elevato con un disavanzo evidente costi-benefici.

## Ossidazione chimica in situ

I trattamenti di **ossidazione chimica in situ** consistono nell'iniezione nella matrice contaminata di una miscela reagente contenente un opportuno agente ossidante che consente la completa trasformazione del contaminante in anidride carbonica ed acqua o la sua trasformazione parziale in sostanze a struttura molecolare più semplice e più facilmente degradabile. Si tratta di una tecnologia aggressiva, adatta al trattamento delle zone sorgente, caratterizzate da elevate concentrazioni di contaminanti.

L'utilizzo di composti con potere fortemente ossidante permette l'ossidazione di composti organici recalcitranti all'ossidazione biologica (biodegradazione). I composti ossidanti più comuni sono il perossido di idrogeno (in condizioni di reazione tipo "Fenton" o "Fenton-like"), l'ozono, il permanganato di potassio e sodio, a cui si aggiungono altri ossidanti (per solfato di sodio, acido peracetico, ipocloriti). Essi sono introdotti direttamente in falda mediante pozzi di iniezione, con o senza l'utilizzo di pressione.

I trattamenti di ossidazione chimica possono essere impiegati da soli o in abbinamento con altri metodi, quali la biodegradazione o trattamenti fisici.

Gli ossidanti che sono commercialmente disponibili e più frequentemente utilizzati sono il reagente di Fenton (perossido di idrogeno e ferro), permanganato di potassio e ozono (anche permanganato di sodio e per solfato).

Nella figura 10-1 sono riportati gli ossidanti più utilizzati, e viene fatto un confronto tra le loro diverse caratteristiche quali il potenziale di ossidazione, i sottoprodotti, i tempi di reazione, la capacità di migliorare la biodegradazione, e i costi qualitativi.

	Fenton's Reagent	Permanganate	Ozone
Physical State	Liquid	Liquid	Gas
Molecular Composition	$\text{OH}^\bullet$	$\text{MnO}_4^-$	$\text{O}_3$
Oxidation Potential	2,80 V (OH <sup>-</sup> )	1,70 V	2,07 V
Reaction Times	Very Fast	Slow	Fast
By-Products	Ferric iron, oxygen, and water.	Dissolved manganese, manganese dioxide, and potential heavy metals.	Oxygen
Potential to Enhance Bioremediation	Yes, if applied under neutral conditions.	Unlikely	Yes
Capital Costs	Low	Low	High

Figura 1: Confronto tra le tipologie di ossidante più utilizzate

L'ossidazione chimica dei contaminanti è efficace in presenza di una litologia omogenea e sufficientemente permeabile: qualora queste condizioni non siano

verificate, è possibile che gli ossidanti introdotti non riescano ad entrare in contatto in modo efficace con i contaminanti, e che pertanto le zone a minore permeabilità non siano interessate dal trattamento.

In formazioni omogenee e discretamente permeabili, l'ossidazione chimica potrebbe consentire la riduzione delle concentrazioni di vari ordini di grandezza relativamente a VOC ed SVOC, ed in misura minore dei composti a maggior numero di atomi di carbonio. In generale, tale trattamento è seguito da una *bioremediation* in quanto difficilmente è in grado di riportare le concentrazioni al di sotto delle CSC di riferimento. Tipicamente, l'ossidazione chimica trova applicazione nella riduzione delle concentrazioni in fase disciolta dopo la rimozione di una fase libera e prima di un trattamento di biorisanamento.

L'impiego di forti ossidanti provoca in generale una – almeno parziale – distruzione dei microrganismi presenti in falda. Ciò deve essere attentamente valutato qualora si intenda far seguire all'ossidazione chimica un trattamento di biodegradazione microbico-ecologica (ossia senza l'inoculo di microrganismi esterni).

Nel caso dell'ossidazione di numerosi contaminanti, inoltre, non sono definiti con precisione quali siano i sottoprodotti generati a seguito dell'ossidazione, con il rischio di formare specie più mobili o più tossiche rispetto a quelle di partenza.

Una volta che l'ossidante appropriato e il meccanismo di rilascio sono stati selezionati per un determinato contaminante, per un'efficace ossidazione è necessario garantire il contatto tra l'ossidante e il contaminante nel sottosuolo. Per questo è determinante la conoscenza delle condizioni del sottosuolo. Infatti questa tecnologia è efficace solo se l'ossidante viene rilasciato nelle aree realmente interessate dalla contaminazione ed è garantito il contatto con le specie da ossidare.

---

Le eterogeneità del sottosuolo, la presenza di zone a bassa permeabilità, ed una concentrazione elevata di materia organica che reagisce con gli ossidanti possono comprometterne l'efficacia, e richiederne l'iniezione di quantitativi eccessivi di reagenti, tali da rendere il trattamento non conveniente in base ad un bilancio costi-benefici.

I fattori che potrebbero limitare l'applicabilità del processo ossidativo sono quindi riassunti:

- efficienza ridotta con alcuni contaminanti;
- possibilità di consumo improduttivo di ossidante per la presenza naturale di composti ossidabili nel suolo;
- possibilità di costi elevati in caso di alte concentrazioni di contaminante, a causa delle grandi quantità di ossidanti che dovrebbero essere introdotte nel sottosuolo;
- possibilità di reazioni non controllate e sotto-prodotti di parziale ossidazione non desiderati;
- condizioni idrogeologiche che non consentono un agevole contatto fra ossidante e contaminanti.

Per i fattori su elencati vanno condotte sempre prove di laboratorio preliminari ed accurati test in campo.

### **Soil flushing**

Il soil flushing è una tecnica in situ (soil washing se eseguito ex situ) e consiste nell'estrazione dei contaminanti dal terreno saturo ed insaturo per dissoluzione in un fluido acquoso, il quale viene immesso in una serie di pozzi/trincee ubicati a monte dell'area contaminata ed estratto a valle di essa (tramite pozzi/trincee di captazione), per essere poi depurato ed eventualmente riciclato agendo tramite il meccanismo di dilavamento o dissoluzione.

Il sistema, nel caso del trattamento di un acquifero non confinato, è in grado di intervenire sui terreni contaminati sia sopra che sotto falda; esso è generalmente costituito dalle seguenti parti:

- sistema di iniezione dell'acqua/soluzione, iniettata in pressione o a gravità, da: pozzi verticali o trincee orizzontali, trincee o bacini disperdenti nel non saturo, gallerie di infiltrazione;
- sistema di recupero dell'acqua di lavaggio contaminata costituito da pozzi, trincee, dreni sotterranei;
- sistema di trattamento delle acque contaminate prima dello scarico/riuso nel ciclo di lavaggio.

Come fluido estraente, viene utilizzata nella maggior parte dei casi: acqua, eventualmente ricorrendo a seconda dei casi all'aggiunta delle seguenti famiglie di composti, allo scopo di migliorare l'efficacia del trattamento:

- detergenti o emulsionanti: in genere per la rimozione di composti idrocarburici o idrofobici con scarsa solubilità;
- composti acidi o basici: in genere per la rimozione di composti inorganici,
- agenti complessanti, selettivi per la rimozione di metalli pesanti,
- cosolventi, selettivi per la rimozione di composti organici poco solubili in acqua.

Il fluido estraente e le acque sotterranee vengono poi trattate, usando i tradizionali metodi di trattamento delle acque di scarico.

Il sistema oltre alla rimozione del contaminante per processo di solubilizzazione, formazione di emulsioni e reazioni chimiche, incide sulla cinetica, ovvero sulla velocità di diverse reazioni chimico-fisiche quali adsorbimento/desorbimento, acido/base, ossidazione/riduzione, soluzione/precipitazione, complessazione e biodegradazione.

I contaminanti che possono essere rimossi con maggiore facilità sono quelli più solubili in acqua, es.: composti aromatici a basso PM, composti volatili (VOC) e semivolatili (SVOC), composti organo-clorurati leggeri (alifatici clorurati), sali solubili di metalli.

L'acqua è usata soprattutto per rimuovere sali organici idrofilici e sali solubili di metalli. Sostanze organiche idrofobiche a bassa solubilità, esempi di tali composti includono, PCB, composti semivolatili, solventi aromatici, possono essere rimosse con adatti surfattanti.

L'uso di tamponi alcalini nella soluzione di lavaggio viene applicato per la rimozione di composti inorganici (es. cianuri) legati alla frazione organica del suolo (humus); mentre soluzioni debolmente acide possono aumentare la solubilità di certi metalli pesanti.

Infine, agenti chelanti, come l'EDTA, possono rimuovere certi composti metallici insolubili.

Spesso, acidi, agenti chelanti o riducenti vengono usati in sequenza per migliorare l'efficienza di rimozione dei metalli.

Le prestazioni del processo di flushing in situ dipendono da diversi fattori:

- tempo di contatto tra la soluzione lavante e la zona contaminata,
- coefficiente di adsorbimento al suolo dei contaminanti,
- permeabilità e caratteristiche sedimentologiche, i risultati migliori sono ottenibili con suoli altamente permeabili,
- contenuto organico del suolo, maggiore è il contenuto di carbonio organico nel suolo più difficile risulta la rimozione dei contaminanti.

In linea generale il soil flushing è maggiormente efficace su terreni con permeabilità media-alta ed omogenei, risentendo della presenza di un'elevata frazione fine e di percorsi di drenaggio/circolazione idrica preferenziali quali ad esempio la presenza di fratturazione. Tale sistema è generalmente associato ad un sistema di *Pump and Treat* dovendo garantire a valle il recupero delle acque contaminate all'interno di un processo sicuro operato in un ciclo chiuso, talvolta risulta inoltre associato a sistemi di

barrieramento fisico (diaframmi plastici, jetgrouting etc..) realizzati anche su porzioni parziali del sito oggetto del trattamento.

Questo tipo di sistemi possono essere implementati a valle dell'esecuzione di numerose prove di campo per la verifica delle permeabilità della zona insatura e di quella satura (prove di immissione in foro, prove Lefranc, prove di pompaggio in falda etc..), ed anche di prove di laboratorio per la trattabilità delle matrici ambientali interessate (terreno e falda) valutando l'efficacia dei diversi composti utilizzabili nel caso specifico.

### **In situ sorption and biodegradation**

La tecnologia prevede l'iniezione di un carbone attivo colloidale di dimensioni microscopiche all'interno dell'acquifero e prevede a duplice funzione: da un lato, quella di adsorbire i contaminanti rimuovendoli velocemente dalla fase disciolta e, dall'altro, quella di fornire una matrice ad elevata superficie che favorisce la colonizzazione e la crescita microbica. In questo modo si riduce la massa contaminante presente in falda e quindi il rischio sanitario-ambientale associato alla presenza di contaminazione in falda e, contemporaneamente, si favorisce l'accelerazione dei processi biodegradativi.

Per tale tecnologia sono utilizzabili i prodotti Plume Stop e Petro Fix distribuiti dalla società Regenesis.

In particolare il Petro Fix è costituito da una miscela a base di acqua altamente concentrata in elettroni accettori (ammendanti a base di solfati e nitrati a rilascio immediato) e carbone attivo di dimensioni micrometriche (1-2  $\mu\text{m}$ ). Rispetto ad analoghi prodotti (es. Plume Stop), il Petro Fix contiene a parità di volume iniettato una percentuale maggiore di carbone attivo che garantisce quindi una maggiore efficacia di trattamento.

Petro Fix ha la duplice funzione di rimuovere rapidamente la fase disciolta adsorbendola sul carbone mentre gli accettori di elettroni aggiunti stimolano la biodegradazione dei contaminanti presenti. Il prodotto può essere applicato con facilità utilizzando apparecchiature prontamente disponibili associate alla tecnologia *direct push*.