



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA

CORSO DI LAUREA IN TOSSICOLOGIA DELL'AMBIENTE E DEGLI
ALIMENTI

Calì, Giliberto, Grasso, Napoli,
Spada, Vighetto, Vitale

TECNICHE DI BONIFICA DEI SITI CONTAMINATI

—————
Tesina di Legislazione Sanitaria e Ambientale
—————

Prof. Pignatello Rosario

ANNO 2014/2015

Sommario

INTRODUZIONE	1
QUADRO NORMATIVO VIGENTE	3
<i>Ecotossicologia</i>	5
DEFINIZIONE DI “SITO CONTAMINATO”	7
<i>Linee guida per l’Analisi del Rischio (AdR)</i>	11
INTERVENTI DI BONIFICA E DI MESSA IN SICUREZZA	12
<i>Messa in sicurezza d’emergenza</i>	13
<i>Messa in sicurezza operativa</i>	13
<i>Messa in sicurezza permanente</i>	14
<i>Bonifica</i>	14
TECNICHE DI BONIFICA	17
<i>TRATTAMENTI CHIMICO-FISICI</i>	17
<i>PUMP AND TREAT</i>).....	17
<i>SOIL VAPOR EXTRACTION</i>	20
<i>AIR SPARGING</i>	22
<i>SOIL-FLUSHING</i>	26
<i>TRATTAMENTI BIOLOGICI</i>	29
<i>BIOPILE E LANDFARMING</i>	30
<i>Progetto per il trattamento in biopile</i>	34
<i>Progetto per il trattamento con landfarming</i>	35
<i>Monitoraggio per il trattamento in biopile</i>	38
<i>Monitoraggio per il trattamento con landfarming</i>	39
<i>Chiusura dell’intervento: Biopile</i>	39
<i>Chiusura dell’intervento: Landfarming</i>	40
<i>PHYTOREMEDIATION</i>	40
<i>Fitoestrazione</i>	47
<i>TRATTAMENTI FISICI</i>	51
<i>VETRIFICAZIONE</i>	51
<i>Impianti e processi di vetrificazione</i>	55
CONCLUSIONE	59
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	61

INTRODUZIONE

L'inquinamento può essere definito come "l'immissione o il prelievo nell'ambiente di materia e/o di energia tali da provocare un'alterazione persistente e talvolta irreversibile delle caratteristiche chimiche, fisiche e biologiche dell'ecosistema" (Della Croce et al., 1997).

In base alle modalità di input di contaminanti al suolo e nelle acque, è possibile distinguere la contaminazione in inquinamento diretto e indiretto.

L'inquinamento diretto di origine antropica, nelle zone urbane e industriali, si verifica in conseguenza dello smaltimento di reflui scarsamente depurati, o non depurati affatto, o a causa dell'accumulo di materiali di scarto contenenti prodotti chimici. Le sostanze riversate in questi ambienti possono essere di natura organica (es. solventi, idrocarburi, pesticidi) ed inorganica (es. metalli pesanti fertilizzanti inorganici e fitofarmaci) o ancora all'uso di reflui zootecnici, di fanghi di depurazione e di compost (decomposizione e umificazione di materie organiche da parte di macro e microrganismi), e possono produrre effetti più o meno gravi in funzione della loro concentrazione, attività chimica e capacità di interazione con le funzioni biologiche degli organismi.

L'inquinamento indiretto di origine naturale è provocato principalmente dai contaminanti derivanti dagli apporti atmosferici. La continua deposizione umida (alluvioni) o secca (particelle, polveri, eruzioni vulcaniche) rappresenta un'importante via attraverso la quale gli inquinanti atmosferici raggiungono il sistema suolo/acqua e ne modificano le caratteristiche chimiche, fisiche e biologiche.

L'inquinamento del suolo può causare una serie di alterazioni che possono ripercuotersi non solo sulla composizione chimica, ma anche sull'attitudine ad ospitare piante ed altri organismi (Keogh e Whitehead, 1975). Tra i principali contaminanti chimici del suolo vi sono i metalli pesanti, tuttavia, gli effetti di tale

contaminazione sulla salute umana e sulla vitalità degli ecosistemi sono stati, purtroppo, per lungo tempo trascurati. Per molti anni, infatti, si è ritenuto che il suolo possedesse la capacità di trattenerli in forme chimiche innocue per gli ecosistemi. Tale capacità del suolo è nota come capacità tampone ed è il risultato di delicati equilibri che s'instaurano tra gli inquinanti e le componenti del suolo: gas, soluzioni, minerali e sostanza organica. Le ricerche condotte negli ultimi anni hanno evidenziato come la capacità tampone del suolo possa essere rapidamente ridotta a causa dei cambiamenti ambientali che, come le piogge acide o le pratiche agricole, determinano rapide variazioni delle proprietà chimiche e fisiche del suolo.

Il degrado qualitativo e quantitativo delle acque costituisce una seria problematica ambientale laddove l'approvvigionamento per usi civili, agricoli ed industriali, deve tener conto delle attività produttive ed ai loro impatti (scarico incontrollato di reflui di varia origine, apporto di sostanze chimiche per trattamenti antiparassitari e concimazioni, sovrasfruttamento delle acque sotterranee, fenomeni d'intrusione di acqua marina, etc.) che possono produrre un degrado quali-quantitativo di questa risorsa, rendendola inadatta ai vari usi ed in particolare a quelli più pregiati (idropotabili ed ambientali). In tal senso il degrado delle risorse idriche sotterranee (RIS) di un territorio, influenzando negativamente sugli ambienti naturali e sulla crescita socio-economica dell'area, costituisce un fondamentale indicatore dei processi di desertificazione, intesi nell'accezione più generale di degrado del territorio derivante da diversi fattori, comprese le variazioni climatiche e l'impatto antropico (Ghiglieri et al. 2006; 2008).

QUADRO NORMATIVO VIGENTE

In seguito al costante sviluppo industriale che ha comportato un aumentato utilizzo ed inquinamento delle risorse idriche e del suolo, si è ritenuto necessario emanare una serie di leggi per la difesa del suolo e lotta alla tutela di un bene tanto prezioso come l'acqua. Le disposizioni sono volte ad assicurare la tutela ed il risanamento del suolo e del sottosuolo, il risanamento idrogeologico del territorio tramite la prevenzione dei fenomeni di dissesto, la messa in sicurezza delle situazioni a rischio. Attualmente la tutela dell'ambiente è affidata al D.Lgs. n. 152 del 3 aprile 2006 (pubblicato nella *Gazzetta Ufficiale* n. 88 del 14 aprile 2006), Testo Unico Ambientale, e dalle successive modifiche, ultima delle quali apportata dal D.Lgs n. 165 del 11 novembre 2014 ed è suddiviso in VI parti.

La parte III del decreto indica le norme in materia di difesa del suolo e lotta alla desertificazione, di tutela delle acque dall'inquinamento e di gestione delle risorse idriche.

La parte IV del decreto disciplina la gestione dei rifiuti e la bonifica dei siti inquinati. È suddiviso in VI titoli:

- **TITOLO I:** Gestione Dei Rifiuti;
- **TITOLO II:** Gestione Degli Imballaggi;
- **TITOLO III:** Gestione Di Particolari Categorie Di Rifiuti;
- **TITOLO IV:** Tariffa Per La Gestione Dei Rifiuti Urbani;
- **TITOLO V:** Bonifica Di Siti Contaminati;
- **TITOLO VI:** Sistema Sanzionatorio E Disposizioni Transitorie E Finali.

Il titolo V regola, attraverso una serie di leggi e di allegati, gli interventi di bonifica e ripristino ambientale dei siti contaminati e definisce le procedure, i criteri e le modalità per lo svolgimento delle operazioni necessarie per l'eliminazione delle sorgenti dell'inquinamento e comunque per la riduzione delle



concentrazioni di sostanze inquinanti, in armonia con i principi e le norme comunitari, con particolare riferimento al principio "chi inquina paga".

- **ALLEGATO 1:** Criteri generali per l'analisi di rischio sanitario ambientale sito-specifica;
- **ALLEGATO 2:** Criteri generali per la caratterizzazione dei siti contaminati;
- **ALLEGATO 3:** Criteri generali per la selezione e l'esecuzione degli interventi di bonifica e ripristino ambientale, di messa in sicurezza (d'urgenza, operativa o permanente), nonché per l'individuazione delle migliori tecniche d'intervento a costi sopportabili;
- **ALLEGATO 4:** Criteri generali per l'applicazione di procedure semplificate;
- **ALLEGATO 5:** Concentrazione soglia di contaminazione nel suolo, nel sottosuolo e nelle acque sotterranee in relazione alla specifica destinazione d'uso dei siti.

Nel concetto generale di bonifica rientrano tutte le attività che vanno dalla rimozione di una fonte inquinante al contenimento della diffusione dell'inquinamento. Gli interventi presentano finalità specifiche. La normativa definisce le seguenti fasi:

- Messa In Sicurezza d'Emergenza;
- Messa In Sicurezza Operativa;
- Messa In Sicurezza Permanente;
- Bonifica;
- Ripristino Ambientale.



Ecotossicologia

Ai fini dell'analisi e/o del monitoraggio nel tempo dello stato di qualità e/o del grado di inquinamento degli ecosistemi terrestri, è ormai ampiamente riconosciuto che la semplice valutazione del contenuto del contaminante in un suolo non consente di esprimere, da sola, valutazioni attendibili sugli effetti che il contaminante può esercitare sugli organismi che vivono nel suolo. Pertanto, questa consapevolezza ha portato alla necessità di integrare il dato chimico con quello derivabile da indagini biologiche ed ecotossicologiche.

L'ecotossicologia studia gli effetti tossici degli agenti chimici e fisici su popolazioni o comunità all'interno di un ecosistema definito, individuando i diversi tipi di trasporto di questi agenti e la loro interazione con l'ambiente. Pertanto, l'ecotossicologia studia il meccanismo d'azione degli inquinanti, valuta il danno biologico su una o più specie, ma in aggiunta valuta la tossicità a livello ecosistemico. Inoltre, l'indagine ecotossicologica tiene conto anche delle interazioni fra composti, che possono dare origine a fenomeni di sinergia (amplificazione non aritmetica dell'effetto dovuta alla combinazione di più stressori) oppure di antagonismo (diminuzione non aritmetica dello stesso), e, infine, tiene conto anche di tutte le sostanze che non sono caratterizzate come tossiche per definizione, ma possono produrre squilibri trofici (come i nutrienti e la materia organica) e quindi alterare la composizione degli ecosistemi in modo più o meno permanente (APAT, 2006).

Le analisi ecotossicologiche sono effettuate attraverso l'impiego di saggi ecotossicologici.

Un saggio ecotossicologico è una prova, spesso di laboratorio, che utilizza un sistema biologico su cui si valutano gli effetti tossici indotti dall'esposizione, per un determinato tempo, alla sostanza tossica o alla matrice ambientale in esame, intendendo per effetti tossici l'alterazione o la compromissione di una o più

funzioni come sopravvivenza, crescita, riproduzione, motilità, fotosintesi, comportamento. Un test di tossicità si fonda sul principio secondo il quale, esponendo un organismo vivente ad un agente tossico, la risposta risulta essere funzione diretta della dose assunta e indiretta del livello di esposizione. La tossicità di un agente (o miscela) è generalmente evidente, in un primo momento, a livello biochimico e molecolare (cambiamento nelle attività enzimatiche, alterazioni del DNA, etc.) e solo successivamente a livello degli organuli cellulari, del tessuto, e infine dalla popolazione biologiche. Il tipo di effetto che viene misurato nel saggio tossicologico è in genere indicato come “endpoint”. I saggi ecotossicologici possono essere classificati in base al periodo di esposizione e alla durata del ciclo vitale dell'organismo (Wright e Welbourn, 2002):

- Test acuti. Di breve durata, rilevano effetti avversi che si manifestano in un breve arco temporale successivo alla somministrazione di una dose singola di sostanza.
- Test sub-cronici. Evidenziano effetti dovuti all'esposizione ad una sostanza per un periodo inferiore o uguale ad un decimo della vita dell'organismo.

Test cronici. Stimano gli effetti che si manifestano in seguito ad esposizioni per un tempo superiore, che spesso coincide con più della metà della durata della vita dell'organismo test.

DEFINIZIONE DI “SITO CONTAMINATO”

In base al D.Lgs. n. 152/2006 art.240:

- Sono “*Siti Potenzialmente Contaminati*” i siti nei quali uno o più dei valori di concentrazione degli inquinanti risulti superiore ai valori i limiti dell’allegato 5 denominati “concentrazioni soglia di contaminazione – CSC” (art. 240, comma 1, lett. d);
- Sono “*Siti contaminati*” i siti nei quali risultino superati i (diversi) livelli di contaminazione, denominati “concentrazioni soglia di rischio – CSR”, da determinare caso per caso tramite l’analisi di rischio (art. 240, comma 1, lett.e).

L’inizio della procedura di bonifica sussiste nel caso in cui il sito risulta contaminato oltre le CSR, o “al verificarsi di un evento che sia potenzialmente in grado di contaminare il sito” (art. 242, comma 1) per verificare se siano state superate le CSC e, in caso positivo, se siano state superate (anche) le CSR.

Avvio delle procedure:

- **Il soggetto responsabile della potenziale contaminazione:** l’articolo 242 “*Procedure operative ed amministrative*”, dispone al comma 1: “*Al verificarsi di un evento che sia potenzialmente in grado di contaminare il sito, il responsabile dell’inquinamento mette in opera entro ventiquattro ore le misure necessarie di prevenzione e ne dà immediata comunicazione ai sensi e con le modalità di cui all’articolo 304, comma 2. La medesima procedura si applica all’atto di individuazione di contaminazioni storiche che possano ancora comportare rischi di aggravamento della situazione di contaminazione*”
- **Il soggetto responsabile della potenziale contaminazione individuato dalla Provincia a seguito di comunicazione di organi di controllo:** l’art.244 prevede che “*Le pubbliche amministrazioni che nell’esercizio*



delle proprie funzioni individuano siti nei quali accertino che i livelli di contaminazione sono superiori ai valori di concentrazione soglia di contaminazione, ne danno comunicazione alla regione, alla provincia e al comune competenti.” La provincia, dopo aver svolto le opportune indagini volte ad identificare il responsabile dell'evento di superamento e sentito il comune, diffida con ordinanza motivata il responsabile della potenziale contaminazione a provvedere. Se il responsabile non sia individuabile o non provveda e non provveda il proprietario del sito né altro soggetto interessato, gli interventi necessari sono adottati d'ufficio dal comune e, ove questo non provveda, dalla regione.

- **I soggetti non responsabili della potenziale contaminazione:** l'art.245 *“Obblighi di intervento e di notifica da parte dei soggetti non responsabili della potenziale contaminazione”* al comma 2 dispone che il proprietario o il gestore dell'area che rilevi il superamento o il pericolo concreto e attuale del superamento della concentrazione soglia di contaminazione (CSC) deve darne comunicazione alla regione, alla provincia ed al comune territorialmente competenti e attuare le misure di prevenzione. Sarà poi compito della provincia, sentito il comune, provvedere all'identificazione del soggetto responsabile al fine di dar corso agli interventi di bonifica.



Attivazione da parte del soggetto responsabile della potenziale contaminazione o in caso di individuazione di contaminazioni storiche.

Soggetto Responsabile	Autorità Competente
1. Dà immediata comunicazione a Regione, Provincia, Comune, Prefetto con le modalità di cui all'articolo 304, comma 2 D.lgs. 152/06	Regione
2. Entro 24 ore mette in atto le necessarie le misure di prevenzione e di messa in sicurezza.	
3. Attuate le misure di sicurezza esegue un'indagine preliminare sui parametri oggetto dell'inquinamento ed entro 48 ore dalla comunicazione comunica gli esiti a Comune e Provincia.	

In base ai parametri ottenuti dall'indagine preliminare, potranno verificarsi due casi identificati di seguito con ipotesi A e ipotesi B

Ipotesi A: NON Superamento C.S.C.

Soggetto Responsabile	Autorità Competente
Provvede al ripristino della zona contaminata, dandone notizia, con apposita autocertificazione, al Comune ed alla Provincia competenti per territorio entro 48 ore dalla comunicazione. L'autocertificazione conclude il procedimento di notifica.	Provincia: Verifica e controllo da effettuarsi nei successivi 15 gg.

Ipotesi B: Superamento C.S.C.

Soggetto Responsabile	Autorità Competente
Nei successivi 30 gg presenta a Comune, Provincia e Regione il Piano di Caratterizzazione con i requisiti di cui all'Allegato 2 alla parte quarta del D.lgs. 152/2006.	Regione: Entro 30 gg. dal ricevimento del Piano di Caratterizzazione convoca la C.d.S. e autorizza, con eventuali prescrizioni, il Piano di Caratterizzazione. Provincia, ARPAC, Soggetto Responsabile: Istruttoria in contraddittorio (<i>comma 12 art. 242 D.lgs. 152/2006: Le indagini ed attività istruttorie sono svolte dalla provincia, che si avvale della competenza tecnica dell'Agenzia regionale per la protezione dell'ambiente e si coordina con le altre amministrazioni</i>)
Entro 6 mesi dall'approvazione del Piano di Caratterizzazione, presenta Analisi di Rischio Specifica (AdR) per la determinazione delle Concentrazioni Soglia di Rischio (CSR) e lo invia ai componenti della C.d.S. almeno 20 gg. prima della sua convocazione.	Regione: Dopo aver svolto l'istruttoria in contraddittorio e comunque entro 60 gg. dal ricevimento dell'Analisi di Rischio convoca la C.d.S. per l'approvazione di tale documento.

Ipotesi B1: Superamento C.S.C.

L'AdR dimostra che la Concentrazione dei contaminanti è < C.S.R.

Soggetto Responsabile	Autorità Competente
Entro 60 gg. dall'approvazione dell'AdR presenta l'eventuale programma di monitoraggio contenente l'B B B B: 5 indicazione dei parametri da sottoporre a controllo, la frequenza e la durata del monitoraggio.	La C.d.S, con l'approvazione del documento dell'analisi del rischio, dichiara concluso positivamente il procedimento. La C.d.S. può prescrivere lo svolgimento di un programma di monitoraggio sul sito circa la stabilizzazione della situazione riscontrata in relazione agli esiti dell'analisi di rischio e alla destinazione d'uso del sito.
Alla fine del periodo di monitoraggio dà comunicazione alla Regione ed alla Provincia, inviando una relazione tecnica riassuntiva degli esiti del monitoraggio svolto.	Regione: approva il piano di monitoraggio entro 30 gg. dal ricevimento, sentita la Provincia
Ipotesi B1/a: Monitoraggio NON rileva superamento di C.S.R. Ipotesi B1/b: Monitoraggio rileva superamento di C.S.R.	Regione: Nell'ipotesi B1/a: Chiusura Procedimento. Regione: Nell'ipotesi B1/b: Impone la presentazione del Progetto Operativo di cui al comma 7 dell'art.242

Ipotesi **B2: Superamento C.S.C.**

L'AdR dimostra che la Concentrazione dei contaminanti è > **C.S.R.** (art.242 – comma7)

Soggetto Responsabile	Autorità Competente
Sottopone alla Regione, entro 6 mesi dall'approvazione del documento di AdR, il Progetto Operativo degli interventi di bonifica o di messa in sicurezza, operativa o permanente, e, ove necessario, le ulteriori misure di riparazione e di ripristino ambientale, al fine di minimizzare e ricondurre ad accettabilità il rischio derivante dallo stato di contaminazione presente nel sito.	Regione: entro 60 gg. dal ricevimento del Progetto Operativo convoca da C.d.S. per la sua approvazione con eventuali prescrizioni. Provincia e ARPAC: controlli sulla conformità degli interventi ai progetti approvati.
Trasmette alla Provincia e all' ARPAC, competenti ai fini dell'effettuazione dei controlli sulla conformità degli interventi ai progetti approvati, la documentazione relativa al piano della caratterizzazione del sito e al progetto operativo, comprensiva delle misure di riparazione, dei monitoraggi da effettuare, delle limitazioni d'uso e delle prescrizioni eventualmente dettate.	Provincia (sulla base di una relazione tecnica predisposta dall'ARPAC): certifica il completamento degli interventi di bonifica, di messa in sicurezza permanente e di messa in sicurezza operativa, nonché la conformità degli stessi al progetto approvato. La certificazione costituisce titolo per lo svincolo delle garanzie finanziarie.

Linee guida per l'Analisi del Rischio (AdR)

L'analisi del rischio è una metodologia scientifica e sistematica per valutare lo stato di contaminazione delle matrici ambientali in termini di quantificazione dei rischi attuali e/o potenziali per l'uomo e per l'ambiente ed è attualmente lo strumento più avanzato di supporto alle decisioni nella gestione dei siti contaminati. Nel processo di analisi del rischio vengono utilizzate competenze multidisciplinari: chimica, biologia, geologia, tossicologia, epidemiologia per tutte le attività di analisi di laboratorio e studi sul campo; chimica, biologia, medicina, statistica, scienza politica ecc. nella fase di valutazione del rischio; economia, politica, diritto, etica nella fase di controllo del rischio.

L'analisi del rischio presenta problemi molto complessi. In primo luogo perché il concetto di rischio è un concetto estremamente difficile da definire con precisione.



Esistono infatti diverse “teorie” del rischio, ed in diversi campi disciplinari, sociologia, politica, etica, economia, scienze cognitive. Anche le metodologie statistiche utilizzate per la definizione e la stima di “indicatori” del rischio, possono far riferimento ad una grande varietà di ipotesi metodologiche. Considerazione preliminare all’esecuzione di qualsiasi calcolo o elaborazione è, per il sito in esame, la ricostruzione del modello concettuale dello stesso, individuando oltre alla fonte di contaminazione, tutti i possibili elementi e cause influenti su di essa e sui composti presenti che possono determinare situazioni di rischio. Nelle norme dell’emanazione delle disposizioni applicative previste in materia dal D. Lgs. 5 febbraio 1997, n. 22, i modelli concettuali e la metodologia devono essere proposti e certificati, caso per caso, dai professionisti responsabili incaricati della progettazione delle attività di bonifica o di messa in sicurezza, previo esame congiunto con gli Enti di autorizzazione e controllo.

INTERVENTI DI BONIFICA E DI MESSA IN SICUREZZA

Gli interventi di messa in sicurezza sono interventi che non eliminano o riducono necessariamente lo stato di contaminazione di un sito inquinato, ma sono mirati a rendere accettabile, mediante l’isolamento del sito medesimo o la riduzione della mobilità degli inquinanti, attraverso l’adozione di tecniche di ingegneria ambientale, il movimento e la diffusione dei contaminanti dal sito all’ambiente esterno, al fine di consentire l’utilizzo del sito secondo le destinazioni indicate dagli strumenti urbanistici, previa valutazione del rischio residuo a seguito dell’adozione degli interventi previsti in sede progettuale.

Gli interventi di messa in sicurezza sono stati già definiti come:

12

- d’Emergenza;

- Operativa;
- Permanente;

Messa in sicurezza d'emergenza

La messa in sicurezza per problemi di emergenza viene realizzata quando, sia per eventi accidentali che per situazioni di inquinamento palese, si riscontri un immediato rischio di diffusione dell'inquinamento e di impatto sulla salute umana o su altre componenti ambientali esistenti nell'intorno del sito interessato dal fenomeno. Tale tipologia di intervento deve essere attuata in tempi rapidi, attraverso sistemi di asportazione di materiali pericolosi e/o contenimento dinamico o statico, a seconda delle presumibili vie di migrazione degli inquinanti ed in relazione alla probabilità di determinare rischi aggiuntivi di incidenti.

Gli interventi di messa in sicurezza di emergenza devono in ogni caso essere integrati con sistemi di monitoraggio e controllo che consentano di seguire costantemente l'andamento del fenomeno e l'efficacia delle misure assunte in termini di abbattimento o annullamento della migrazione di inquinanti verso zone esterne al sito di interesse.

Messa in sicurezza operativa

La messa in sicurezza provvisoria viene eseguita quando, pur non sussistendo immediati rischi per la salute umana o altre componenti ambientali, si debbano prevenire diffusioni o migrazioni di contaminanti da siti inquinati durante interventi di bonifica che richiedano periodi di applicazione significativi (più di 12 mesi) o quando si ritenga necessario eseguire un monitoraggio prolungato per valutare lo stato qualitativo del sito di interesse e le sue interferenze con l'ambiente circostante.

Generalmente per tale tipologia di interventi si adottano sistemi di contenimento dinamico (barriere idrauliche di pozzi, trincee drenanti).

Messa in sicurezza permanente

Si adotta in caso di impossibilità tecnico/economica di applicazione di interventi di bonifica e viene realizzata mediante sistemi di contenimento statico (confinamento) o di inertizzazione/stabilizzazione, integrati da interventi di ingegneria ambientale idonei a garantire la possibilità di utilizzo dell'area secondo le destinazioni urbanistiche della stessa. E' sempre accompagnata da sistemi di monitoraggio e controllo per la verifica dell'efficienza e dell'efficacia dell'intervento nonché da limitazioni temporanee o permanenti all'utilizzo dell'area rispetto alla destinazione d'uso prevista qualora bonificata.

Bonifica

La bonifica di un sito inquinato è finalizzata ad eliminare l'inquinamento delle matrici ambientali o a ricondurre le concentrazioni delle sostanze inquinanti, entro i valori soglia di contaminazione (CSC) stabiliti per la destinazione d'uso prevista o ai valori di concentrazione soglia di rischio (CSR) definiti in base ad una metodologia di Analisi di Rischio condotta per il sito specifico. Gli interventi di messa in sicurezza sono finalizzati alla rimozione e all'isolamento delle fonti inquinanti, e al contenimento della diffusione degli inquinanti per impedirne il contatto con l'uomo e con i ricettori ambientali circostanti. È opportuno progettare tali interventi dopo aver eseguito la caratterizzazione ambientale del sito.

Per la caratterizzazione di aree potenzialmente inquinate, per la corretta interpretazione dei dati relativi alla contaminazione e per poter definire il grado e l'estensione della contaminazione del sistema suolo/sottosuolo e degli acquiferi, occorre procedere all'acquisizione delle conoscenze sull'ambiente fisico in cui il sito in esame si inserisce ed in particolare approfondire gli aspetti relativi alla costituzione e geometria del sottosuolo, descritti dalla geologia, nonché alla dinamica della circolazione delle acque sotterranee, descritta dalla idrogeologia ,

definire una serie di caratteristiche fisiche del materiale solido costituente il sito e le proprietà chimico-fisiche e la configurazione molecolare dei contaminanti responsabili della ripartizione delle sostanze tra le fasi solida, liquida e di vapore e di conseguenza influenzano le forme con cui queste si distribuiscono tra le diverse matrici ambientali.

Devono pertanto essere acquisite sufficienti informazioni sulla contaminazione presente, sulle caratteristiche degli acquiferi sottostanti e delle altre possibili vie di migrazione degli inquinanti, sui possibili punti di esposizione e sui probabili bersagli ambientali ed umani.

Le tecniche di bonifica si distinguono in biologiche, chimiche, fisiche e termiche in funzione delle metodologie utilizzate. Inoltre esse possono essere ulteriormente suddivise in base al luogo dove viene effettuato l'intervento.

- Interventi *in situ*;
- Interventi *ex situ*.

Le categorie delle tecnologie di bonifica sono sintetizzate in Tabella 1 (Bertelle e Beretta, 2009). La scelta del tipo di intervento varia in funzione del tipo di inquinante, dell'estensione dell'inquinamento e della natura del mezzo contaminato.

Tabella 1 – Categorie delle Tecnologie di Bonifica (da Bertelle e Beretta, 2009).

Tecnica	Localizzazione	Metodologia Utilizzata	Intervento	Matrice Ambientale
<i>Separazione</i> (L'inquinante è separato dal mezzo inquinato e trattato)	In Situ	Chimico-Fisica	Soil Flushing; Soil Vapor Extraction; Dual Phase Extraction; Air Sparging; Vagliatura; Pump & Treat	Suolo; Suolo-Acque; Sottosuolo; Acque Sotterranee
		Termica	Desorbimento; Thermal Enhanced (TEVES)	Suolo
		Biologica	Soil Washing	Suolo
	Ex Situ	Chimico-Fisica	Soil Washing; Soil-Flushing	Suolo
		Termica	Desorbimento	Suolo
<i>Trasformazione</i> (L'inquinante è trasformato in sostanze meno pericolose o innocue)	In Situ	Biologica	Bioventing; Biosparging; Natural Attenuation; Barriere Biologiche; Phytoremediation	Suolo; Suolo-Acque; Sottosuolo; Acque Sotterranee
		Chimico-Fisica	Barriere Permeabili Reattive	Acque Sotterranee
	Ex Situ	Biologica	Landfarming; Biopile; Bioslurry; Inertizzazione; Phytoremediation	Suolo
		Chimico-Fisica	Trattamenti Chimici; Inertizzazione	Suolo
		Termica	Incenerimento; Pirolisi	Suolo
	<i>Immobilizzazione</i> (L'inquinante viene immobilizzato o in una matrice o tramite trasformazione in sostanze meno mobili)	In Situ	Chimico-Fisica	Solidificazione; Contenimento
Termica			Vetrificazione	Suolo
Ex Situ		Chimico-Fisica	Solidificazione	Suolo
		Termica	Vetrificazione	Suolo

TECNICHE DI BONIFICA

In genere le tecniche di bonifica possono essere classificate in funzione del principio operativo in:

- Trattamenti chimico-fisici;
- Trattamenti biologici;
- Trattamenti fisici.

TRATTAMENTI CHIMICO-FISICI

I trattamenti chimici riguardano la trasformazione dello stato chimico degli inquinanti, finalizzato alla produzione di sostanze caratterizzate da minore tossicità o da una ridotta/incrementata mobilità

PUMP AND TREAT

Il Pump and Treat è un metodo comune di risanamento delle acque sotterranee contaminate da sostanze chimiche o solventi industriali. Le acque di falda inquinate vengono pompate in superficie dove qui, verranno successivamente trattate.

Il pump and treat può essere definito come:

- Una tecnologia di messa in sicurezza (d'emergenza o permanente)
- Una tecnologia di bonifica

Il principio è quello di creare una depressione piezometrica per cercare di interrompere il flusso delle acque sotterranee.

Lo scopo è quello di interrompere lo spostamento a valle del plume inquinante e prelevare le sostanze contaminanti che dovranno essere sottoposte ad un trattamento prima dello scarico. L'acqua contaminata, portata in superficie, viene sottoposta ad un sistema di trattamento o mandata ad un serbatoio delle acqua fino

a quando il trattamento non abbia inizio. Il sistema di trattamento consiste in un metodo di depurazione che utilizza filtri a carboni attivi attraverso il processo di adsorbimento (componente solido viene usato per la rimozione ed il trattenimento di una sostanza disciolta in acqua). Tuttavia, se gli inquinanti sono diversi o ad alte concentrazioni, è necessario utilizzare vari metodi di depurazione delle acque inquinate. Una volta che l'acqua viene trattata, può essere immessa nuovamente nel sottosuolo o per l'irrigazione di terreni.

Questo tipo di intervento è costituito dalla creazione di una barriera idraulica mediante pozzi, trincee o dreni.

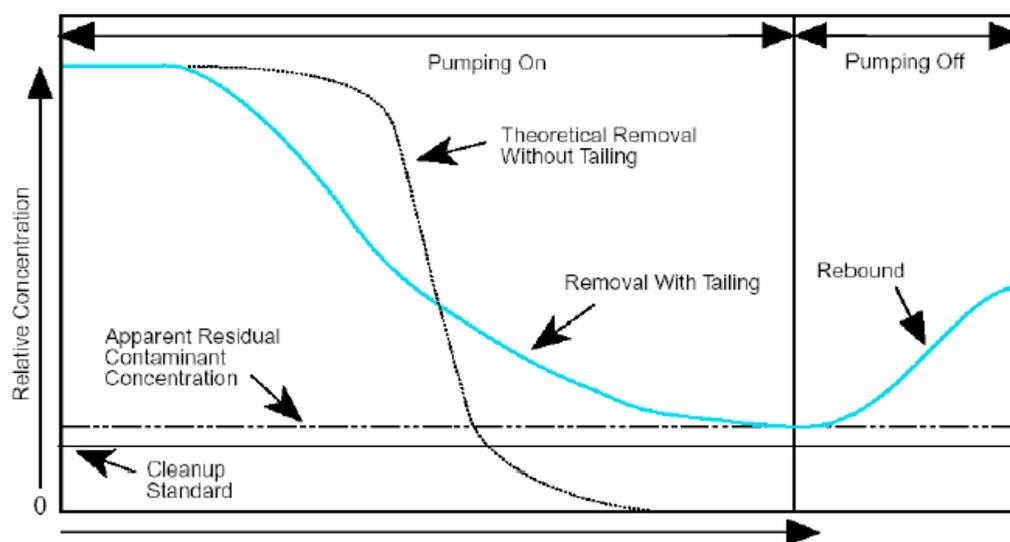
- **Trincea:** viene realizzata in caso di bassa soggiacenza della falda. Si usa per intercettare la fase separata di LNAPL (FASE LIQUIDA LEGGERA NON ACQUOSA) e viene abbinata ad una barriera impermeabile. Il flusso viene indirizzato verso la trincea dalla produzione di una depressione piezometrica provocata da un pozzo. Deve essere presente un sistema di sollevamento delle acque, se non si ha un naturale deflusso verso il serbatoio di accumulo.
- **Dreno sotterraneo:** viene realizzato in presenza di insediamenti ed infrastrutture che possano impedire la realizzazione di altri sistemi di drenaggio.
- **Pozzo:** la sua costruzione richiede uno spazio limitato, e si ha la possibilità di moderare la portata delle acque dal sottosuolo. Attraverso questo sistema di intervento, si crea una depressione piezometrica in grado di catturare i flussi idrici inquinanti. Perciò, è necessario che la depressione coinvolga tutta l'area inquinata.

I limiti e le condizioni di applicazione derivano da:

- **Tailing:** ovvero nel momento del pumping on, si ha una progressiva diminuzione delle sostanze inquinanti in quanto queste sono mobilizzate solo quando sono solubilizzate dal DNAPL (sostanze organiche liquide più

dense dell'acqua che, in caso di contatto accidentale con acque di falda, per percolazione, tendono a giungere sul fondo di essa generando in questo modo inquinamento dell'acquifero. Esempi di DNAPL sono i solventi clorurati e tutti gli idrocarburi alogenati) o desorbite dal suolo. Quando la concentrazione in fase adsorbita scende sotto un certo limite, la velocità di desorbimento è così bassa da rendere praticamente inutile il trattamento, in quanto si finisce per estrarre acqua quasi pulita.

- **Rebound:** ovvero si denota un aumento della concentrazione dell'inquinante a seguito dell'interruzione delle operazioni di estrazione. Questo può avvenire perché quando si riduce la velocità della falda, che torna al suo valore naturale, la concentrazione degli inquinanti aumenta in quanto il desorbimento è aumentato rispetto alla velocità della falda. Oppure perché esistono zone a bassa permeabilità nelle quali si accumula il contaminante e dal quale questo si adsorbe, che non sono state opportunamente trattate.



I principali aspetti da tenere in considerazione nel realizzare un impianto di tipo pump and treat sono:

- La portata totale del pompaggio dei pozzi
- Il numero e l'ubicazione dei pozzi impiegati

- Il tempo previsto per realizzare la bonifica dell'area
- Il sistema di monitoraggio che si intende utilizzare

Il pump and treat è una tecnica che ha costi elevati e tempi di risanamento lunghi che posso variare da alcuni anni a decenni. Inoltre, è adatto per la bonifica di aree contaminate da inquinanti miscibili con l'acqua, è invece poco efficace nel caso siano presenti composti organici immiscibili DNAPL.

La tecnica di P&T presenta i vantaggi e svantaggi mostrati in Tabella 2

Tabella 2 – Vantaggi e svantaggi del P&T

Vantaggi	Svantaggi
La relativa semplicità di esecuzione e la facilità di progettazione di un sistema di pozzi-barriera possono garantire la realizzazione di un intervento di messa in sicurezza a breve termine	Questa tecnica non riduce la concentrazione della sorgente quando questa è costituita da sottosuolo inquinato
Durante le attività di bonifica condotte con altre tecniche si possono realizzare barriere di pozzi per controllare le attività svolte sul sito di intervento	Gli svantaggi principali riscontrabili sono relativi agli effetti di tailing (con aumento dei tempi di funzionamento richiesti) e rebound (con un aumento della concentrazione all'interruzione della fase di pompaggio)
	Il raggiungimento degli obiettivi di bonifica può richiedere anni

SOIL VAPOR EXTRACTION

La Soil Vapor Extraction (SVE) è una tecnica di bonifica per il trattamento di suoli dove con un flusso controllato di aria si ha la rimozione di contaminanti organici volatili presenti nella zona insatura del terreno. La zona insatura è quella porzione di terreno in cui l'acqua si muove principalmente per percolazione. La tecnica è di tipo in situ. Attraverso la SVE vengono create nel sottosuolo sacche di vuoto che favoriscono la rimozione dei contaminanti mediante volatilizzazione; si crea quindi una depressione che estrae i componenti volatili dell'inquinante presenti nel terreno. L'aspirazione di un flusso controllato dal sottosuolo richiama

l'aria dalla superficie favorendo così processi di degradazione biologica delle sostanze contaminanti. I gas aspirati vengono trattati in superficie prima del loro rilascio definitivo in atmosfera. La quantità di contaminanti estratta nell'unità di tempo decresce rapidamente durante la ventilazione. L'unica difficoltà nell'applicazione di questo intervento è data dalla complessità delle matrici sotterranee, che non permettono un controllo completo dell'ambiente in cui si opera con rischi di diffusioni indesiderate non rilevabili; per ridurre tale rischio si affiancano a tale intervento sistemi di controllo della migrazione dei contaminanti. Dal punto di vista impiantistico il sistema di ventilazione in situ è costituito da:

- Pozzi o dreni di estrazione vapori;
- Pozzi o dreni di immissione aria (eventuali);
- Pozzi di monitoraggio.

Le principali fasi del processo di SVE consistono:

- Nella ventilazione del suolo tramite uno o più pozzi tenuti sotto vuoto con apposite pompe. Tramite i pozzi di iniezione viene applicata una corrente di aria compressa che trascina con sé i contaminanti e li dirige verso i pozzi di estrazione sotto forma di vapore o gas;
- Nel convogliamento dei gas estratti verso un sistema di raccolta per il successivo trattamento;
- Nel richiamo di aria dalla superficie che innesca i naturali processi di degradazione biologica dei contaminanti.

La rimozione dei contaminanti è effettuata con l'applicazione di altri trattamenti come l'assorbimento su carbone attivo, l'ossidazione catalitica o con trappole a freddo e in certi casi con un sistema di termodistruzione. Il tipo di trattamento dipende dal contaminante e dalla sua concentrazione.

La tecnica di SVE presenta i vantaggi e svantaggi mostrati in Tabella 3

Tabella 3 – Vantaggi e svantaggi del SVE

Vantaggi	Svantaggi
Riduce efficacemente i contaminanti nella zona insatura e, in minor misura, anche il prodotto libero in galleggiamento	Difficilmente si raggiungono abbattimenti delle concentrazioni di contaminate superiori al 90% È applicabile solo alla zona insatura del terreno Non è applicabile per il trattamento di terreni contaminati da composti a bassa volatilità
Brevi tempi di trattamento (da alcuni mesi a un paio di anni, in dipendenza della concentrazioni iniziali e delle caratteristiche del sito)	È fortemente influenzata dalle caratteristiche del sottosuolo trattato. Zone a bassa permeabilità, ad elevato contenuto organico o ricche di canali referenziali o fratture possono ridurre sostanzialmente l'efficacia complessiva di estrazione
Le attrezzature sono facilmente installabili;	Può richiedere alti costi per il trattamento dell'aria estratta
Si possono trattare vaste aree senza interrompere le normali attività svolte sul sito e può essere trattato anche il terreno al di sotto di edifici esistenti	
Sono eliminati i rischi e i costi relativi al trasporto di notevoli quantità di suolo contaminato	
I costi sono contenuti, in particolar modo quando vengono trattate ampie zone di terreno	
Può essere utilizzata in associazione ad altre tecnologie di trattamento, come il bioventing e l'airsparging	

AIR SPARGING

L'air sparging è una tecnica utilizzata in situ per la bonifica dei terreni e delle falde acquifere contaminate mediante l'immissione d'aria in pressione su pozzi trivellati nella zona contaminata. L'immissione forzata nel suolo inquinato causa un gorgogliamento dell'aria che penetra orizzontalmente e verticalmente nel terreno e nella falda provocando lo strippaggio (processo fisico di separazione) dei composti organici presenti nel liquido (acqua) e la volatilizzazione di quelli

presenti negli interstizi del solido (terreno). Le sostanze inquinanti vengono così spinte e trasportate verso la zona insatura dopo un processo di volatilizzazione indotto dal gorgogliamento stesso. Il moto di trasporto verso l'alto del gas volatilizzato viene inoltre facilitato dallo sviluppo di una zona di depressione in prossimità del pozzo di aspirazione. I gas sprigionati vengono poi assorbiti da un sistema di aspirazione che può sfruttare una tecnologia SVE (Estrazione di vapore dal suolo) evitando così che gli agenti inquinanti si disperdano nelle zone limitrofe la zona da trattare. Il sistema nel suo complesso sfrutta la pressione e l'iniezione dell'aria pulita nella zona contaminata per favorire due tipi di azioni:

- La movimentazione dell'agente inquinante verso una zona dove è possibile estrarlo con una tecnica forzata (SVE);
- Un processo di aerazione nella falda e nel terreno che favorisce i processi di degradazione microbica dell'agente contaminante ad opera dell'ossigeno fino a produrne la mineralizzazione.

L'azione di degradazione svolta dalla flora microbica aerobica nel terreno è favorita anche da fattori naturali come una buona presenza di acqua nel terreno, la presenza di ossigeno negli interstizi del terreno, un pH del terreno ottimale tra 5 e 9, la buona disponibilità di elementi nutritivi C, N, P. Dal punto di vista impiantistico, l'intero sistema prevede la creazione di due distinti pozzi:

- Un pozzo soffiante (*pozzo di sparging*) dove si immette l'aria pulita in pressione;
- Un pozzo di estrazione SVE (Soil Vapour Extraction) collegato ad una camera di trattamento gas in uscita per l'abbattimento o il trattamento dell'inquinante.

La pressione d'aria ottimale in ingresso nel pozzo soffiante è in genere di 0,35 bar, in relazione ad una portata di 8,5 m³/h, ma l'immissione ottimale dovrebbe avvenire per impulsi lenti e continui per favorire una maggiore miscelazione aria/acqua in funzione di una migliore attività microbica. Il monitoraggio e la

raccolta di informazioni prima e durante le operazioni di air sparging risultano pertanto di fondamentale importanza sia nella determinazione della concentrazione di agenti inquinanti nel sottosuolo (soprattutto idrocarburi), sia nella quantità di ossigeno presente nella falda. La velocità dell'intero processo è influenzata, oltre che dalla volatilità dell'inquinante, dalla superficie specifica nel passaggio liquido-gas (Legge di Fick) e sono pertanto molto influenti le dimensioni delle bolle d'aria iniettate. Inoltre, è necessario controllare anche la temperatura sulle pressioni in gioco, poiché all'aumentare di questa aumenta la pressione di vapore degli agenti inquinanti. Il processo potrebbe essere quindi agevolato iniettando aria calda o vapore. La tecnica di air sparging risulta tanto più efficiente quanto più è adattata alla situazione idrogeologica specifica del sito. Per ottimizzare l'efficienza e i risultati è necessario far precedere alla messa in opera dell'intero sistema una fase di test pilota. Questi test si compongono di una serie di impianti composti da:

- Un pozzo di immissione dell'aria atmosferica ("pozzo di sparging");
- I cosiddetti "piezometri", cioè dei punti per il costante monitoraggio della pressione interstiziale;
- Componentistica varia: elettrovalvole, compressori, pressostati e regolatori di flusso.

I test vengono effettuati mediante l'immissione di aria atmosferica calibrando diverse portate e risultano utili per determinare se la falda è in pressione, il suo livello, la quantità di vapori organici, la quantità di ossigeno e anidride carbonica presenti. La necessità di effettuare numerose prove, onde evitare l'eventuale dispersione dell'inquinante, costituisce il vero fattore limitante nell'utilizzo di questa tecnologia che potrebbe pertanto risultare molto lunga nei tempi pre-bonifica. Se il flusso d'aria attraverso la zona satura non si diffonde in modo uniforme e canalizzato, potrebbe verificarsi il movimento incontrollato delle sostanze pericolose verso zone incontaminate. Tale fenomeno è più probabile in

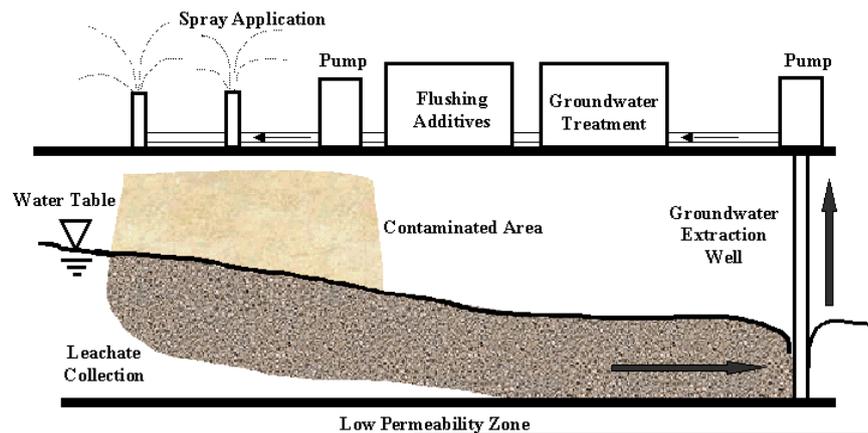
presenza di idrocarburi con basso peso specifico, con terreni disomogenei o con presenza di falde in pressione. Un'attenzione particolare va posta in caso di dosi consistenti di agenti inquinanti surnatanti (es. idrocarburi in sospensione), onde evitare che la spinta e il gorgogliamento provochino la dispersione del prodotto nelle zone limitrofe. In tal caso si fa precedere all'azione di air sparging la tecnica del soil venting per l'eliminazione dell'inquinante nella sua parte più grossolana. La tecnica di AS presenta i vantaggi e svantaggi mostrati in Tabella 4

Tabella 4 – Vantaggi e svantaggi del AS

Vantaggi	Svantaggi
Utilizza apparecchiature di semplice installazione. Consente il trattamento in situ della falda	Non può essere applicata in terreni con permeabilità inferiore a 10-3 cm/s
Non comporta problematiche di trattamento, stoccaggio o scarico di acque sotterranee Apportando ossigeno, promuove i processi di biodegradazione naturale aerobici	Non può essere impiegata, in prima approssimazione, se esiste prodotto in fase libera sulla falda (in tal caso tale prodotto deve essere prima rimosso)
Consente un'implementazione con minimo disturbo per le operazioni in sito	Non può essere usata in falde confinate
È di breve durata (da 1 a 5 anni in condizioni ottimali)	In presenza di stratificazione e forte eterogeneità del sottosuolo saturo può essere inefficace o generare l'allargamento del pennacchio
Consente l'utilizzo contemporaneo di altre tecnologie	Richiede l'esecuzione di accurate prove pilota per valutare il controllo dei vapori generati e gli effetti della loro migrazione
La sua efficacia può aumentare in associazione con altre tecnologie come l'estrazione di vapore dal suolo	Le infrastrutture presenti nel sito possono essere danneggiate dalla presenza di vapori provenienti dall'impianto di insufflazione: è necessario considerare le azioni di messa in sicurezza

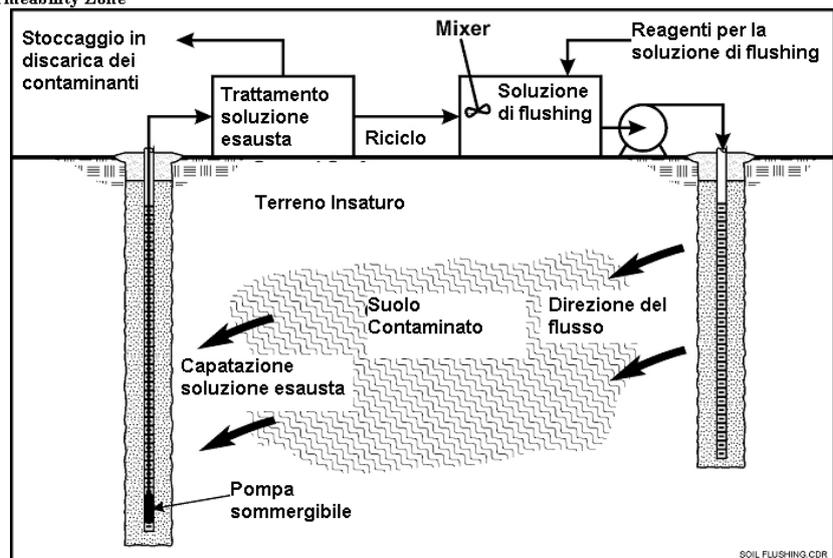
SOIL-FLUSHING

Il soil flushing (lavaggio in-situ) è un trattamento di natura chimico-fisica, in situ, che consiste in un'operazione di lavaggio del terreno mediante soluzioni, in grado di aumentare la solubilità e, quindi, estrarre i contaminanti presenti nel suolo. Le soluzioni utilizzate sono soluzioni di surfattanti, acidi, basi, ossidanti, chelanti



vengono immesse nel terreno da trattare mediante opportuni sistemi di irrigazione superficiale oppure vengono applicate

nel terreno mediante pozzi di iniezione posti all'inizio dell'area da trattare, mentre l'estrazione della soluzione arricchita di contaminanti, avviene grazie ad opportuni pozzi di captazione, posti alla fine dell'area da trattare.



Il sistema di estrazione deve essere progettato, in modo da assicurare il completo recupero del contaminante. La soluzione contaminata, una volta portata in superficie, deve essere trattata mediante opportuni sistemi di depurazione in-situ e, successivamente, ricircolata, fin tanto che mantiene un'adeguata capacità estraente nei confronti dei contaminanti presenti.

Il principale meccanismo chimico, coinvolto nel trasferimento del contaminante dal suolo alla fase liquida, è quello della solubilizzazione. Contemporaneamente ai meccanismi di rimozione del contaminante di natura chimica, si sviluppano altri meccanismi, di carattere puramente fisico, che comportano il distacco dei contaminanti, adsorbiti sulle particelle di suolo, mediante azioni meccaniche di attrito, urto, etc.

Una volta che il contaminante è stato solubilizzato, o che comunque si è staccato dal suolo per azione meccanica, il suo trasporto, in soluzione, avviene per avvezione e dispersione idrodinamica.

L'applicabilità di un trattamento di soil flushing, per la rimozione degli inquinanti da un terreno contaminato, dipende dalla tipologia di contaminazione e dalle caratteristiche del sito e può essere utilizzato per trattare una grande varietà di contaminanti organici e inorganici.

Composti organici:

- Liquidi in fase non acquosa o surnatanti (non-aqueous phase liquid, NAPL);
- Composti organici non volatili;
- Composti organici semivolatili (semivolatile organic compounds, SVOCs);
- Policlorobifenili (polychlorinated biphenyls, PCBs);
- Pesticidi alogenati;
- Diossine e furani;
- Cianuri;
- Sostanze corrosive.

Sostanze inorganiche:

- Metalli;
- Sostanze corrosive;
- Cianuri;
- Contaminanti radioattivi.

L'efficienza di rimozione dei contaminanti dipende sia dal contaminante che dal tipo di suolo ed in particolare la permeabilità è il fattore principale per la determinazione della fattibilità di un trattamento soil flushing. Essa dovrebbe essere maggiore di 10^{-3} cm/s, per consentire alla soluzione estraente di passare attraverso la matrice geologica in un periodo di tempo ragionevole.

La tecnica del SF presenta i vantaggi e svantaggi mostrati in Tabella 5

Tabella 5 – Vantaggi e svantaggi del SF

Vantaggi	Svantaggi
Comporta costi più contenuti rispetto al soil washing, in quanto lo scavo ed il trasporto del materiale contaminato rappresentano una frazione importante del costo globale di un trattamento di bonifica	La potenziale diffusione dei contaminanti
Non presenta i problemi di carattere igienico-sanitario legati alla movimentazione ed al trasporto del terreno contaminato, con la conseguente diminuzione del rischio di contaminazione delle altre matrici ambientali	L'efficacia del trattamento dipende fortemente dal tempo di contatto tra fluido di lavaggio e terreno, dalla corretta definizione dell'agente estraente, dall'umidità del terreno, dalle caratteristiche del terreno (contenuto organico, tessitura, permeabilità ecc.)
Potrebbe permettere la continuazione delle eventuali attività produttive presenti sull'area interessata dall'inquinamento	Un'eccessiva infiltrazione, durante la operazioni, potrebbe causare la diluizione della soluzione estraente e la perdita del controllo idraulico
Applicabilità della tecnica ad un ampio range di contaminanti	La soluzione estraente è funzione del contaminante specifico, dunque, la presenza contemporanea, nel sito, di contaminanti dalle caratteristiche molto differenti potrebbe rendere estremamente complessa l'applicazione del trattamento
	Rispetto al soil washing, risulta più delicata la fase di selezione dell'agente estraente, in quanto occorre evitare che una quantità eccessiva di fluido o che l'errata previsione delle possibili reazioni con le sostanze contaminanti possa peggiorare le condizioni di contaminazione del terreno e delle acque sotterranee; anche il controllo dei parametri influenzanti il trattamento (per esempio pH) è molto più difficoltoso rispetto al caso del relativo trattamento ex situ

L'impiego di questa tipologia di bonifica deve tener conto del calcolo delle voci di costo del trattamento, soprattutto i costi dei reattivi necessari per la preparazione della soluzione estraente, i costi energetici, nonché i costi di rigenerazione della soluzione esausta e di smaltimento dei residui di tale rigenerazione.

TRATTAMENTI BIOLOGICI

I trattamenti biologici si basano sulla decomposizione delle molecole organiche ad opera dell'attività metabolica di microrganismi opportunamente inoculati ai quali è necessario garantire la presenza di sostanze indispensabili per il sostentamento dell'attività batterica (nutrienti, donatori di elettroni per i metabolismi aerobici ed accettori di elettroni per quelli anaerobici) e di adeguate condizioni ambientali (pH, temperatura) al fine di accelerare processi che altrimenti potrebbero risultare estremamente lenti. All'interno della classe dei trattamenti biologici vengono anche inclusi quei processi finalizzati alla concentrazione degli inquinanti all'interno di matrici biotiche, rappresentate in genere da piante o alghe (phytoremediation); tali processi trovano spesso impiego nella rimozione di inquinanti inorganici, quali i metalli pesanti, che facilmente vengono assunti dalle piante tramite l'apparato radicale.

Rientrano nei trattamenti biologici *in situ*:

- Iniezione diretta di nutrienti, di accettori di elettroni e di donatori di elettroni;
- Bioventing/Biosparging;
- Ricircolo delle acque sotterranee;
- Biobarriere permeabili reattive.

I trattamenti *ex situ* comprendono:

- Biopile;

- Landfarming;
- Compostaggio;
- Bioreattori in fase solida e semisolida

BIOPILE E LANDFARMING

Le biopile e il landfarming vengono utilizzate per la bonifica dei terreni contaminati da prodotti del petrolio (presenza limitata di prodotti clorurati). I terreni vengono scavati e sistemati in cumuli per essere decontaminati tramite biodegradazione. L'attività biologica aerobica viene infatti stimolata nei terreni attraverso aerazione e aggiunta di nutrienti, minerali e acqua, degradando così i prodotti, generalmente derivati del petrolio, adsorbiti al terreno.

L'utilizzo delle biopile e del landfarming è particolarmente consigliato nei casi in cui la contaminazione raggiunga una profondità massima di 2,5 m dalla superficie o per siti con piccole aree contaminate (estensione minima 200 m³).

Entrambe le tecniche sono basate sulla stimolazione della crescita e della moltiplicazione dei batteri aerobi tramite l'uso di ossigeno, per la degradazione aerobica dei contaminanti. La differenza principale tra le due tecniche sta nell'ossigenazione del terreno; per il landfarming il terreno viene ossigenato movimentandolo, mentre nelle biopile l'aria viene fatta circolare nel terreno attraverso tubature con tecniche di estrazione/iniezione.

I composti più leggeri tendono ad essere rimossi per volatilizzazione durante l'aerazione dei terreni mentre gli altri componenti vengono rimossi per biodegradazione. Nel caso la presenza di componenti volatili sia elevata potrebbe essere necessario disporre di un impianto per il trattamento delle emissioni gassose.

La tecnica delle biopile presenta i vantaggi e svantaggi mostrati in Tabella 6

Tabella 6 – Vantaggi e svantaggi delle biopile

Vantaggi	Svantaggi
Progettazione ed implementazione semplici	Difficile ottenere una riduzione delle concentrazioni superiore al 95% e inferiore a 0.1 mg/kg
Tempi di trattamento brevi, compresi tra 3 mesi e 2 anni	Può non essere efficace per concentrazioni molto elevate (idrocarburi tot. >50mila mg/kg)
Costi limitati: 25-80 euro/tonn di terreno contaminato	La crescita microbica può essere inibita in presenza di alte concentrazioni di metalli pesanti (>2500 mg/kg)
Efficace su composti organici con tassi di biodegradazione lenti	I composti volatili tendono ad evaporare durante il trattamento piuttosto che biodegradarsi
Richiede meno spazio del landfarming	Richiede molto spazio anche se meno del landfarming
Può essere progettato come sistema chiuso; è possibile controllare le emissioni gassose(*)	La generazioni di vapori durante l'areazione può richiedere un trattamento prima dello scarico
Può essere progettato per tutte le combinazioni tra condizioni del sito e tipo di contaminanti(*)	Può essere necessario un rivestimento di fondo in caso di produzione di percolato consistente
Il terreno, una volta trattato, è pulito e non richiede contenimenti particolari(*)	

(*) Il landfarming non ha questi vantaggi ma presenta costi più bassi (25-50 euro/tonn di terreno contaminato).

L'efficacia di un trattamento biologico dipende da numerosi fattori ed essendo dei sistemi di trattamento fuori terra, la maggior parte dei parametri può essere modificata in fase operativa.

Caratteristiche del terreno:

- **Densità della popolazione microbica:** Generalmente il terreno contiene una quantità di microrganismi sufficiente a sostenere la biodegradazione. Tuttavia è possibile, prima dell'inizio del trattamento, arricchire il terreno con batteri coltivati e con nutrienti di varia natura. I ceppi microbici, tramite un processo metabolico, ossidano il carbonio presente nei contaminanti e lo trasformano in CO₂. Per la degradazione di prodotti petroliferi è

fondamentale che il terreno sia ricco di batteri aerobi eterotrofi (cioè non in grado di sintetizzare composti organici e quindi bisognosi di essere riforniti da altre fonti). Per verificare che il terreno contenga una quantità sufficiente di questi batteri è possibile effettuare analisi su campioni provenienti dal sito. Il conteggio è fatto in “unità formanti colonie” (CFU) per grammo di terreno. Perché il trattamento sia efficace, il terreno deve contenere almeno 10^3 CFU/g. Quantità inferiori potrebbero essere sintomo di condizioni tossiche per i microrganismi (elevate concentrazioni di metalli pesanti).

- **pH:** Per favorire l'attività microbica il pH dovrebbe essere compreso tra 6 e 8. Questo valore può essere variato tramite l'aggiunta di soluzioni liquide durante il trattamento.
- **Contenuto idrico:** I batteri necessitano di un ambiente umido per crescere; il tasso di umidità ideale per il terreno deve essere compreso tra il 12% e il 30% in peso. Periodicamente è necessario aggiungere acqua al terreno, che altrimenti tende ad asciugarsi in seguito a evaporazione. In aree soggette ad abbondanti precipitazioni è possibile predisporre una copertura impermeabile sopra la biopila in modo da prevenire l'erosione operata da acqua e vento.
- **Temperatura:** L'attività microbica diminuisce drasticamente al di sotto dei 10°C e al di sopra dei 45°C . Dunque sarà differente nei diversi periodi dell'anno poiché la temperatura del terreno è influenzata da quella dell'ambiente circostante.
- **Concentrazione dei nutrienti:** I nutrienti sono indispensabili per la crescita dei microrganismi; il rapporto ideale carbonio, azoto e fosforo nel terreno per la biodegradazione risulta essere 100:10:1 e può variare a seconda del tipo di contaminanti e di microrganismi coinvolti nel processo di biodegradazione. Il contenuto iniziale di tali elementi nel terreno può essere determinato in base ad analisi chimiche su campioni del sito. È

possibile approssimare la quantità di carbonio presente assimilandola alla massa totale dei contaminanti del sito (il C costituisce il 90% in peso degli idrocarburi del petrolio). Con questa approssimazione è possibile calcolare speditamente le quantità di azoto e fosforo necessarie per una adeguata crescita microbica; dopo il confronto con i valori presenti nel terreno, si determina la necessità o meno di un'aggiunta di nutrienti prima della formazione del cumulo.

- **Tessitura:** Parametro fondamentale che influenza la permeabilità, il contenuto idrico e la densità del terreno. Ad esempio i terreni argillosi sono difficili da aerare, in essi non è possibile avere una distribuzione omogenea dei nutrienti e mantengono a lungo un elevato tasso di umidità dopo una precipitazione; in questi casi è necessario trattare il terreno con materiali dilatanti per garantire una tessitura più sciolta (gessatura).

Caratteristiche dei contaminanti:

- **Volatilità:** I composti volatili, durante l'iniezione/estrazione di aria dalla biopila, o durante il rivolgimento nel landfarming, tendono a evaporare piuttosto che a degradarsi. Se il trattamento viene effettuato con biopila è necessario che la circolazione d'aria venga operata tramite estrazione, in modo tale che l'aria estratta possa essere trattata prima di essere immessa nell'atmosfera
- **Struttura chimica:** Pur essendo tutti i componenti del petrolio biodegradabili, a seconda della struttura molecolare, il processo degradativo può richiedere tempi differenti. Maggiore è il peso molecolare maggiore sarà il tempo richiesto per la degradazione.
- **Concentrazione e tossicità:** Concentrazioni troppo elevate di contaminanti del petrolio e/o di metalli pesanti nel terreno possono inibire la crescita dei batteri. Al contrario concentrazioni troppo basse riducono la loro attività. Nel primo caso è possibile diluirle con terreno pulito ma è comunque



sconsigliato il trattamento biologico per concentrazioni maggiori di 5000 mg/kg. Nel secondo caso bisogna stare attenti a non fissare i valori obiettivo di decontaminazione al di sotto dei valori che inducono scarsa attività batterica (valori soglia).

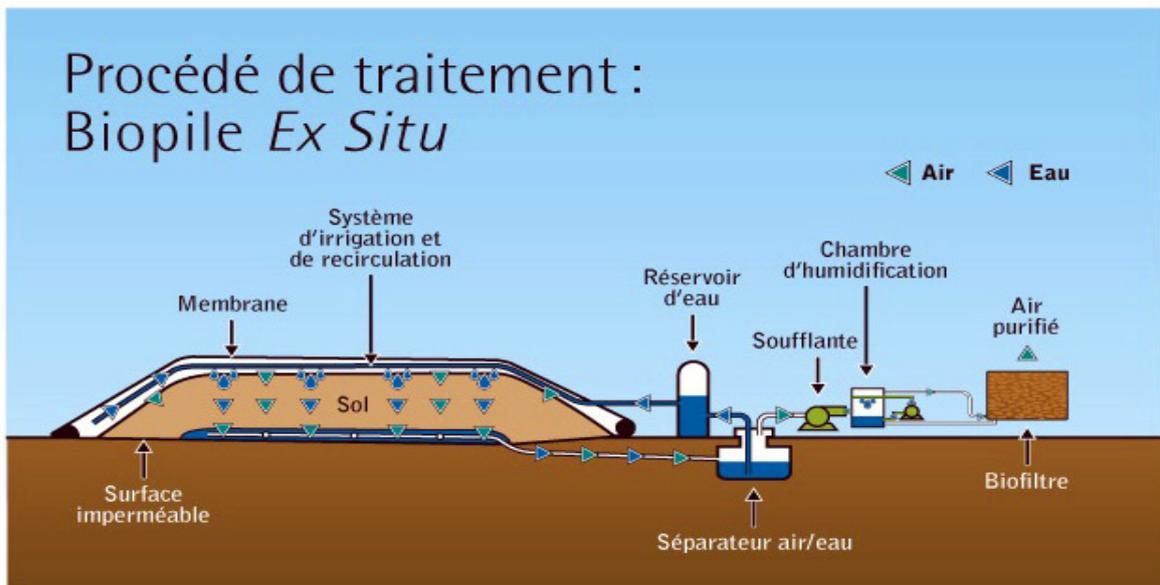
Condizioni climatiche

- **Temperatura ambiente:** Influenza la temperatura del terreno e quindi l'attività microbica. In caso questa si discosti dall'intervallo ottimale 10-45°C è possibile intervenire con opere di copertura e riscaldamento dei cumuli.
- **Piovosità e vento:** La caduta di pioggia su un cumulo privo di copertura impermeabile può causare l'aumento dell'umidità del terreno e l'erosione superficiale. Per questo, nel caso di precipitazione abbondanti, si devono realizzare delle sponde per la raccolta del percolato atte al controllo del dilavamento dei terreni. Il vento è causa di erosione ma un adeguato sistema di copertura minimizza questo fattore.

Una volta verificata la possibilità di applicare la biopila o il landfarming per la bonifica del terreno in esame, si può passare al progetto, che dovrà comprendere una descrizione dettagliata della struttura.

Progetto per il trattamento in biopile

In generale il sito destinato al posizionamento della biopila dovrebbe essere lontano da zone residenziali. Il trattamento dovrebbe essere effettuato on-site, cioè nello stesso sito di provenienza del terreno contaminato, minimizzando così i costi di gestione e trasporto. È possibile calcolare l'area che occuperà la biopila dividendo la quantità di terreno da trattare per l'altezza delle biopile (compresa comunque tra 1 e 3 metri). Deve essere considerata anche l'area di stoccaggio e preparazione del terreno (per la miscelazione con i nutrienti, l'aggiunta di materiali dilatanti, ecc.).



La costruzione della biopila include:

- La base della stessa, che funge da barriera contro la migrazione dei contaminanti nei terreni sottostanti la biopila;
- Le sponde per la raccolta del percolato
- I teli per la copertura
- Tubature per l'iniezione/estrazione di aria
- Sistemi per il trattamento del percolato
- Sistemi per l'iniezione di acqua e nutrienti
- Siti per il pretrattamento del terreno (stoccaggio)
- Strutture per il trattamento dei composti volatili.

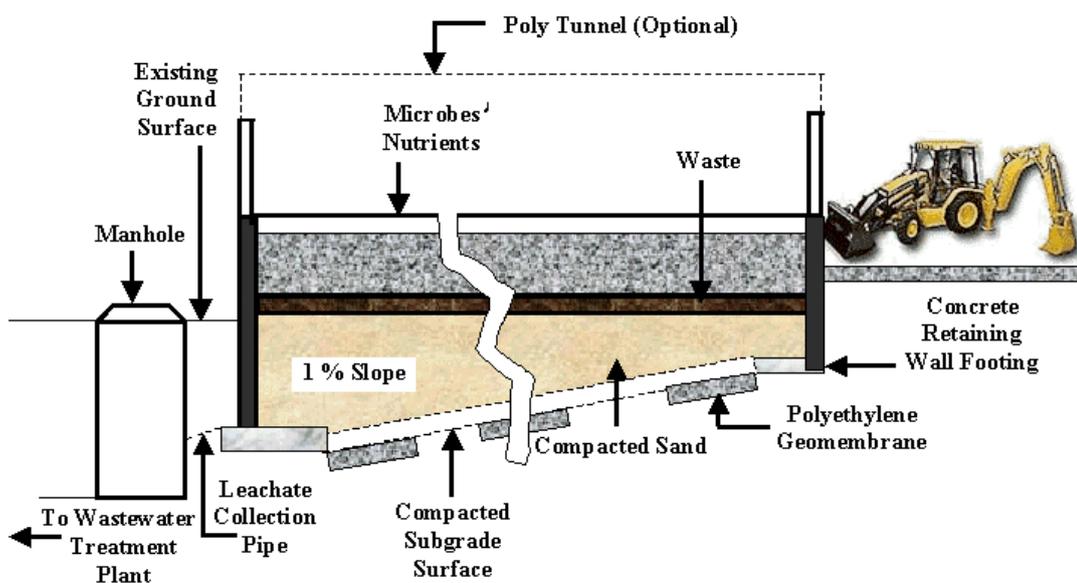
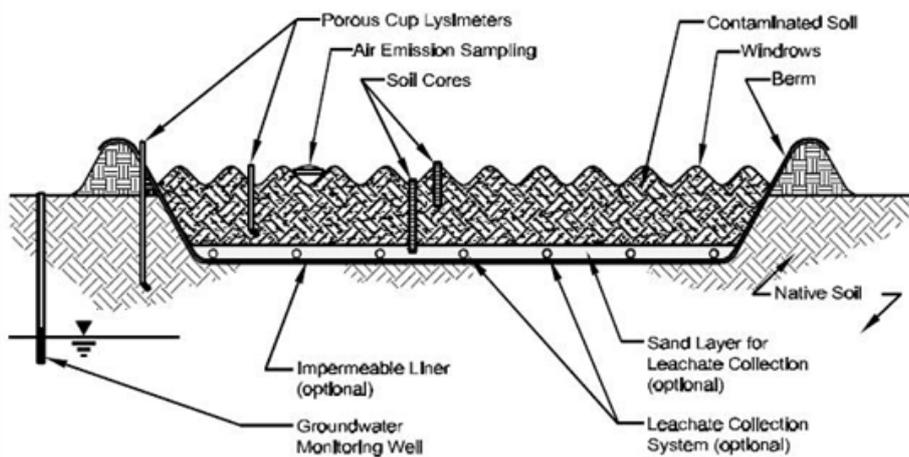
Progetto per il trattamento con landfarming

Come per le biopile, una volta verificato che le condizioni generali consentono l'applicazione del metodo biologico, è possibile passare alla valutazione del progetto del landfarming. In particolare dovranno essere incluse nel progetto le informazioni relative ai seguenti aspetti:

- **Requisiti dell'area:** la cella di trattamento deve essere ubicata in una zona dove la falda sia almeno due metri al di sotto del piano di posa del telo impermeabile alla base del cumulo. L'area necessaria per la disposizione dei cumuli può essere calcolata dividendo il volume del terreno da trattare per l'altezza di ognuno di essi. In genere il terreno da trattare viene disposto in lunghi cumuli a sezione triangolare di altezza variabile tra 30 e 50 cm, a seconda del tipo di macchine rivoltatrici utilizzate.
- **Messa in opera:** avviene in diverse fasi. Innanzitutto si procede alla preparazione del sito (estirpazione della vegetazione, pulitura e preparazione del fondo), si preparano le sponde e i teli per l'impermeabilizzazione del fondo, i sistemi per il pre-trattamento del terreno ed eventuali sistemi per il trattamento dei vapori.
- **Sistema di areazione:** generalmente è costituito da macchine agricole rivoltatrici. I rivoltamenti sono più frequenti (ogni due settimane) nel primo periodo, quando l'attività microbica è più intensa, per fornire maggiore ossigenazione al terreno. Successivamente, con la riduzione dei contaminanti, i rivoltamenti potranno essere diradati.
- **Sistema di gestione delle acque:** le sponde hanno lo scopo di prevenire l'uscita di acque contaminate verso l'esterno, colluttandole verso un sistema di raccolta.
- **Sistema di raccolta del percolato:** consiste nella posa di teli impermeabilizzanti alla base del cumulo, di uno strato compatto di argilla, di uno strato drenante sabbioso e di un sistema di tubi per la raccolta del percolato. E' buona norma creare una pendenza del fondo dell'1% per favorire il deflusso del percolato verso il sistema di raccolta. A trattamento terminato i cumuli vengono rimossi con escavatori.
- **Controllo dell'erosione:** viene effettuato disponendo il terreno in cumuli allungati e nel mantenere umida la superficie con un sistema di irrigazione

superficiale per ridurre la formazione di polveri anche durante il rivoltamento; è anche possibile disporre di teli semipermeabili che consentano lo scambio di gas tra l'interno e l'esterno.

- **Aggiustamento del pH e dei nutrienti:** vengono entrambe effettuate tramite l'aggiunta di soluzioni allo stato liquido previa irrigazione dei cumuli stessi. La frequenza di applicazione varia a seconda della necessità riscontrata durante il trattamento.
- **Controllo delle emissioni gassose (VOC):** per evitare la dispersione di vapori contaminati è opportuno predisporre delle coperture dei cumuli o delle strutture chiuse che contengano i vapori. Potrebbe essere necessario anche un sistema di trattamento dei vapori.



Monitoraggio per il trattamento in biopile

A seguito della messa in opera della biopila, è necessario verificarne il corretto funzionamento. A questo scopo si deve predisporre un piano di monitoraggio per assicurare l'ottimizzazione dei tassi di biodegradazione, per seguire la riduzione delle concentrazioni dei contaminanti, per monitorare le emissioni di vapori o la migrazione di contaminanti nei terreni al di sotto della biopila e infine per verificare la qualità delle acque sotterranee. Il piano delle attività deve prevedere l'eventualità di modifiche della gestione dell'intervento, a seconda di quanto rilevato in corso d'opera relativamente alle variazioni dei contaminanti e all'attività batterica. Inoltre esso deve tener conto delle variazioni climatiche stagionali (l'areazione e l'aggiunta di acqua e nutrienti dovrebbero essere generalmente maggiori nei mesi più caldi e asciutti).

All'avvio del sistema si deve misurare la concentrazione di O_2 presso tutti i punti di monitoraggio; questo è il parametro di controllo più importante per la biopila. La verifica deve essere compiuta ogni poche ore dopo aver posato il terreno fino alla stabilizzazione della concentrazione di O_2 . È inoltre importante il controllo periodico dei sistemi di areazione.

La manutenzione del sistema di trattamento dei gas estratti avviene per la maggior parte di questi sistemi tramite un'unità a carboni attivi o un biofiltro che devono essere ispezionate regolarmente per escludere la presenza di ruggine e perdite. Il monitoraggio viene effettuato mediante il campionamento periodico del terreno e dei gas interstiziali (prove respirometriche, quest'ultime a cadenza mensile). Il campionamento del terreno deve essere eseguito per valutare il tasso di degradazione nel tempo dei contaminanti nella biopila, per stimare la durata minima del trattamento per il raggiungimento degli obiettivi di risanamento. È possibile stimare il tasso di degradazione anche dalle prove respirometriche. La prova viene condotta tramite iniezione di He all'interno della biopila per un tempo sufficiente ad aerare completamente il terreno. Successivamente vengono

misurate le concentrazioni di O₂, CO₂, He e TPH. Graficando i tassi di biodegradazione ottenuti tramite l'interpretazione delle prove respirometriche successive, si può osservare una progressiva diminuzione di questi; quando cessano di diminuire è possibile effettuare la prova respirometrica di chiusura e il campionamento finale del terreno.

Monitoraggio per il trattamento con landfarming

È necessario vagliare il terreno prima del suo posizionamento, per eliminare il materiale troppo grossolano eventualmente presente; in particolare, non dovrebbe essere presente materiale con dimensione superiore agli 8 cm, per evitare il danneggiamento delle attrezzature.

I terreni dei cumuli dovrebbero essere campionati almeno ogni tre mesi per le determinazioni di pH, contenuto idrico, popolazioni batteriche, nutrienti e concentrazione dei contaminanti.

Nel caso in cui il campionamento indichi un contenuto idrico del terreno inferiore al 12% in peso, si deve procedere all'irrigazione.

Il rivoltamento dei cumuli per l'aerazione dovrebbe essere effettuato ogni 15 giorni, nel caso di un normale andamento della biodegradazione.

Una carenza di nutrienti deve essere colmata con l'aggiunta di fertilizzanti per ripristinare i livelli ottimali di azoto e fosforo. In caso di variazioni significative del pH dall'intervallo 6 - 8.5, si devono effettuare ulteriori analisi per determinare la quantità di ammendante necessaria per riportare questi valori a i livelli normali.

Chiusura dell'intervento: Biopile

Deve essere stilata una relazione riassuntiva di tutte le caratteristiche del trattamento, quali: tipo di contaminanti, concentrazioni iniziali, obiettivi di risanamento (valori limite da raggiungere), caratteristiche progettuali della biopila

e attività di monitoraggio svolte, esiti del campionamento e delle analisi, destino finale del terreno decontaminato. I parametri che indicano in modo definitivo se il terreno è pulito sono le concentrazioni dei contaminanti nei gas interstiziali e nel terreno. Per quanto riguarda i gas, si effettua una prova respirometrica dopo lo spegnimento della soffiante. Nel caso del terreno, si effettua un campionamento per verificare se le concentrazioni dei contaminanti risultano inferiori a quelle soglia determinate nella fase progettuale della biopila.

Chiusura dell'intervento: Landfarming

Il processo che porta alla chiusura del trattamento è progressivo, in quanto il monitoraggio delle condizioni di avanzamento della bonifica del terreno è continuo. Pertanto quello che viene richiesto per la decisione finale di chiusura del landfarming per un lotto è un campionamento confermativo. Una volta appurato che gli obiettivi di risanamento sono stati raggiunti, le aree da cui proveniva il terreno contaminato devono essere ripristinate. Tutti i macchinari e gli strumenti utilizzati per le diverse operazioni devono essere anch'essi decontaminati a trattamento compiuto.

PHYTOREMEDIATION

La contaminazione ambientale (del suolo e delle acque) da metalli tossici è diventato un argomento di interesse mondiale, dovuto all'aumento dell'industrializzazione e dei rifiuti urbani colpendo aree sempre più vaste di terreni coltivabili (*Surriya, 2014*). Tutto ciò rappresenta oggi una delle più importanti emergenze ambientali. (*Trusilova K, 2008*).

Tuttavia al giorno d'oggi i metodi di bonifica dei siti contaminati sono eccessivamente dispendiosi, laboriosi, invasivi per gli ambienti decontaminati e

pericolosi per la salute della fauna e della flora che dovrebbe ripopolarli; per questo motivo sono stati intensificati gli studi di ricerca di metodi alternativi maggiormente "eco sostenibili" (Michael A., 1993).

La tecnica della "*phytoremediation*" rientra in tale definizione poiché presenta bassi costi, mantiene le proprietà naturali dei terreni e genera residui vegetali ricchi di metalli pronti ad essere smaltiti (Witters N., 2012; Khan A.G., 2000).

La fitodepurazione si basa sui processi fisiologici tipici di alcune piante, che sono naturalmente in grado di degradare o accumulare nei proprio tessuti quantità di inquinanti spesso molto più elevate che in altri metodi (Padmavathiamma P.K., 2007).

Questa tecnica rispetta i quattro pilastri fondamentali dello "sviluppo eco sostenibile":

- *Sostenibilità economica, come capacità di generare reddito e lavoro per il sostentamento della popolazione;*
- *Sostenibilità sociale, cioè la capacità di garantire condizioni di benessere, sicurezza e salute, equamente distribuite fra classi e generi;*
- *Sostenibilità ambientale, intesa come capacità mantenere la qualità e la riproducibilità delle risorse naturali;*
- *Sostenibilità istituzionale, intesa come capacità di assicurare condizioni di stabilità, democrazia, partecipazione e giustizia (Woong Kye Sung, 2013).*

Per inquinamento del suolo si intende la modificazione, principalmente attraverso l'attività antropica, della composizione chimica naturale del terreno (Trusilova K. and Churkina G., 2008).

Per la quantificazione dell'inquinamento di un suolo è necessario effettuare analisi di tipo quantitativo, in modo da comprendere sia la qualità che la quantità dei tossici presenti nella complessa matrice. La quantificazione si basa anche sul

concetto di *Concentrazione Limite* (CL) o soglia, definita come quel valore al di sotto del quale non si osservano effetti rilevanti dal punto di vista tossicologico. L'uso sempre maggiore di fertilizzanti e pesticidi e alla massiccia presenza di detriti fognari. La presenza di metalli pesanti, tra i diversi agenti tossici, desta molta preoccupazione in quanto la loro altissima tossicità e la loro comprovata cancerogenicità (*Alloway B.J., 2005 and Jarup L., 2009*).

La crosta terrestre risulta essere costituita da diversi elementi chimici, di cui il 75% sono metalli. Basse percentuali di questi si trovano disciolti nell'acqua, nell'aria, nel suolo e quindi all'interno della catena alimentare (*Smeester L., 2014*). A causa dell'intensificarsi dell'attività umana dell'ultimo secolo, tale percentuale ha avuto un incremento, spingendo gli scienziati a studiare le possibili conseguenze sulla salute e sull'ambiente (*Rasool I., 1990*).

Ma non tutti i metalli sono pericolosi. È necessaria una distinzione in metalli “*essenziali*” e “*non essenziali*” o *tossici*. I primi sono essenziali (ferro, zinco, rame e poi vanadio, cromo, manganese, cobalto, arsenico, selenio e molibdeno in concentrazioni minori) per la fertilità del suolo, il sostentamento dei microrganismi essenziali dei suoli, il nutrimento delle piante, e di conseguenza il nutrimento degli animali. Invece i metalli non essenziali, non presentano alcuna funzione biologica o biochimica; fra questi troviamo piombo, mercurio, cadmio, alluminio, berillio e nichel. L'assunzione, a differenza degli essenziali, non dà alcuna risposta di interesse biologico, ma al contrario scatena condizioni patologiche anche di grave entità provocando danni tissutali e d'organo.

I metalli vengono classificati in “*leggeri*” e “*pesanti*”. Questa classificazione viene fatta in funzione dei pesi molecolari. I primi sono caratterizzati da una bassa densità ($<4 \text{ g/cm}^3$), ed il loro impiego è principalmente nelle leghe. I metalli pesanti, invece, mostrano le seguenti caratteristiche:

- Densità $<5,00 \text{ g/cm}^3$;
- Comportamento simile ai cationi;

- Bassa solubilità dei loro idrati;
- Tendenza a dare vita a legami complessi;
- Grande affinità con i solidi, nei quali tendono a concentrarsi;
- Diversi stati di ossidazione a seconda delle condizioni di pH e Eh.

Tra i metalli pesanti si annoverano: Alluminio, Ferro, Argento, Bario, Berillio, Cadmio, Cobalto, Cromo, Manganese, Mercurio, Molibdeno, Nickel, Piombo, Rame, Stagno, Titanio, Tallio, Vanadio, Zinco ed alcuni *metallodi* come Arsenico, Bismuto e Selenio.

E caratteristiche di tali categorie sono principalmente l'alta resistenza alla degradazione naturale e l'inalterato mantenimento della tossicità per lungo tempo; per questo motivo assume notevole importanza monitorarne la concentrazione ambientale, mantenendole quanto più bassa possibile. Tra i metalli pesanti precedentemente citati, i più pericolosi e maggiormente responsabili dell'impatto ambientale sono Mercurio, Cadmio, Piombo ed Alluminio (*Stanley E. Manahan, 2003 and Benes S., 2000*).

In questo studio prenderemo in analisi piante iperaccumulatrici in grado di decontaminare i suoli inquinati da Cadmio e Arsenico.

CADMIO

Il Cadmio è un elemento metallico, duttile e malleabile; è un elemento di transizione della tavola periodica (*Silvestroni P. 1999*).

L'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) ha classificato il cadmio fra le sostanze ad azione cancerogena per l'uomo.

L'inquinamento avviene soprattutto a livello della pedosfera, cioè dell'ecosistema del suolo. Il metallo si accumula nel terreno in maniera continua e sistematica,

immesso principalmente da scarichi industriali, pesticidi e fertilizzanti (*Alloway B.J., 2005*).

L'aria è un veicolo attraverso il quale viene trasportato, facendolo depositare sul suolo, sui frutti e sui vegetali i quali lo assorbono contantemente (*Vukocevic T., 2012*).

Secondo l'allegato AI, i valori massimi di Cadmio nei terreni agricoli destinati all'uso di fanghi di depurazione è di $1,5 \text{ mg kg}^{-1} \text{ SS}$ (*D.Lgs. 27-1-92, n.99*).

Poiché l'assunzione del Cd da parte delle piante aumenta con il diminuire del pH del suolo (*Filius A., 1998*), la maggiore frequenza di piogge acide ha come effetto l'incremento esponenziale della concentrazione del metallo negli alimenti.

Il cadmio è contenuto anche nelle pile Li-Cd, e quando ormai esaurite, possono rilasciare fino a 5 g di Cadmio nell'atmosfera. Per questo motivo le istituzioni hanno messo in atto la raccolta differenziata per le pile di tipo Li-Cd, in modo da evitarne l'errata eliminazione.

ARSENICO

L'Arsenico (As) è un elemento molto reattivo, e non solubile in acqua, al contrario dei suoi sali, la cui solubilità è funzione del pH e dell'intorno ionico. L'Arsenico (As) è un elemento molto reattivo e non idrosolubile, al contrario dei suoi sali, la cui solubilità in acqua è funzione del pH e dell'ambiente ionico. Esso può esistere in quattro stati di ossidazione (-3, 0, +3 e +5). In condizioni riducenti, lo stato di valenza +3 (AsIII) come arsenito rappresenta la forma dominante, mentre la valenza +5 (AsV), come arseniato, è la forma più stabile in condizioni ossidanti. In natura si ritrova solitamente in piccole quantità a livello delle rocce, dei suoli, delle polveri e dell'aria (*Onishi H., 1955*).

Esso viene inoltre immesso nell'ambiente (aria, acqua e suolo) da rifiuti ed emissioni derivanti dai molteplici processi industriali che ne fanno uso, divenendo così un contaminante significativo dei siti di bonifica.

La presenza nell'ambiente dell'arsenico può derivare sia da sorgenti naturali, quali i processi pedogenetici, l'attività biologica e l'attività vulcanica, che da sorgenti antropogeniche (*Bressa G., 2001*).

Anche l'Arsenico inorganico, come il Cadmio, è stato definito dall'Agenzia Internazionale per la ricerca sul Cancro (IARC, 1987) e l' U.S EPA (1993) come “sicuramente cancerogeno per l'uomo”.

L'arsenico terrestre può sussistere sia in forma organica che inorganica. I livelli presenti naturalmente nel suolo possono variare in base alla sua origine dal valore relativamente basso di 5 mg kg⁻¹ (*Matschullat J., 2000*) a concentrazioni superiori ai 40 mg Kg⁻¹, in grado di indurre tossicità (*Mandal B.K., 2002*). Le specie inorganiche più importanti sono l'arseniato (AsV) e l'arsenito (AsIII), mentre le forme organiche più comuni nel terreno sono l'acido monometilarsinico (MMA) e l'acido dimetilarsinico (DMA), la cui presenza è minore rispetto alle forme inorganiche (*Abedin V., 2002; Fitz W.J., 2002*). L'adsorbimento dell'As(V) nel suolo diminuisce con l'incremento del pH, contrariamente a quello di As(III). Il massimo adsorbimento dell'As(V) si ha intorno a pH 4, mentre quello di As(III) a pH 7-8.5 (*Fitz W.J., 2002*).

L'arsenico presente nell'atmosfera deriva da numerosi fattori (erosione del suolo esercitata dal vento, emissioni vulcaniche, volatilizzazione dell'elemento dal suolo, aerosol di acqua di mare, inquinamento antropico) e ritorna sulla superficie terrestre attraverso deposizioni umide e secche. L'arsenico atmosferico si trova sotto forma di As₂O₃ in polvere (*Cullen W.R., 1989*) o adsorbito come arsenito e arseniato su particolato (*Mandal B.K., 2002*). Durante i processi di fusione dei minerali contenenti Cu, Pb, Zn e Au avviene un ingente rilascio di arsenico nell'atmosfera (*Li X., 1993*). La combustione del carbone, oltre a determinare il rilascio di arsenico nell'atmosfera, determina anche la produzione di ingenti quantità di ceneri leggere e pesanti contenenti arsenico (*Beretka J., 1994*).

Nelle aree ad alta concentrazione di metalli, alcune specie di piante, si sono evolute aumentando la loro tolleranza e resistenza a dosaggi elevati, attraverso due strategie di base, cioè il trasporto lieve ed il trasporto escluso.

L'inquinante metallico potrebbe accumularsi sia nelle radici, rimanendo praticamente assente nella parte aerea, che, viceversa, occupare il fusto e le foglie del vegetale. L'accumulo del metallo avviene comunque in assenza di fenomeni di tossicità, proprietà, questa, che ha stimolato il crescente interesse dei ricercatori che identificarono le potenzialità di questa tecnica completamente eco sostenibile e diedero il via ad una serie di studi finalizzati a classificare ed utilizzare le specie dotate di tali caratteristiche.

Nella *phytoremediation*, quindi, le proprietà vegetali di accumulo e resistenza alla tossicità da metalli vengono applicate al fine di bonificare matrici ambientali contaminate. La *phytoremediation*, infatti, ben si adatta alla bonifica dei siti inquinati, come previsto dal D.M. 471/99, poiché è una tecnica che soddisfa alcuni dei requisiti di carattere generale riportati nell'Allegato 3 del suddetto decreto, fra cui:

a) privilegiare le tecniche di bonifica che riducono permanentemente e significativamente la concentrazione nelle diverse matrici ambientali, gli effetti tossici e la mobilità delle sostanze inquinanti;

b) privilegiare le tecniche di bonifica tendenti a trattare e riutilizzare il suolo nel sito, trattamento in-situ ed on-site del suolo contaminato, con conseguente riduzione dei rischi derivanti dal trasporto e messa a discarica di terreno inquinato;

(...)

p) salvaguardare le matrici ambientali presenti nel sito e nell'area interessata dagli effetti dell'inquinamento ed evitare ogni aggiuntivo degrado dell'ambiente e del paesaggio.

Uno dei principali svantaggi legati a questa tecnica, tuttavia, è sicuramente rappresentato dalla durata del trattamento, generalmente di anni, fattore questo che la esclude quindi negli interventi di urgenza, limitandone l'applicazione ai casi in cui non c'è necessità immediata di riutilizzare il sito. Altri potenziali svantaggi potrebbero essere rappresentati dalla soglia di tolleranza della pianta e all'eventuale trasferimento degli inquinanti alla catena alimentare (Schwitzguebel J.P, 2002).

Durante lo studio della phytoremediation, sono state sviluppate diverse tecniche in base all'obiettivo della bonifica, all'inquinante da trattare ed alla matrice ambientale interessata dalla contaminazione.

Queste hanno preso il nome di fitotecnologie e sono state classificate in base al tipo di meccanismo di depurazione coinvolto:

- Fitoestrazione: accumulo negli organi aerei delle piante di inquinanti inorganici;
- Rizofiltrazione: assorbimento di contaminanti presenti nell'acqua;
- Fitostabilizzazione: stabilizzazione ad opera della pianta della matrice contaminata e riduzione della mobilità degli inquinanti;
- Fizeodegradazione: tramite la produzione di essudati organici, viene stimolata l'azione di determinati microorganismi della rizosfera;
- Fitodegradazione: i contaminanti non solo vengono assorbiti, ma anche degradati;
- Fitovolatilizzazione: i contaminanti vengono trasferiti in atmosfera mediante processo di traspirazione.

Fitoestrazione

Il processo si basa sull'assorbimento di contaminanti inorganici da parte delle piante e sulla loro traslocazione agli organi aerei. Avvenuto l'accumulo, è quindi possibile tagliare la biomassa vegetale e di conseguenza rimuovere definitivamente il contaminante dal sistema (Baker A.J.M.,2000).

Sono definite “iperaccumulatrici” quelle specie vegetali capaci di assorbire concentrazioni di questi elementi incredibilmente elevate, a partire da 1.000 mg/kg di sostanza secca (SS), pari allo 0,1 % del peso secco, fino a 10.000 mg/kg di s.s. (1% del peso secco) (Baker A.J.M., 1994).

La quantità di metallo rimossa annualmente per unità di superficie (Q) viene definita dalla seguente formula:

$$Q = C_m \cdot B_m \cdot n$$

dove C_m è la concentrazione dei metalli negli organi vegetali (mg kg⁻¹ s.s.); B_m è la biomassa prodotta per ogni raccolto per unità di superficie (kg SS/m²); n è il numero di raccolti realizzabili ogni anno.

Il rendimento della fitoestrazione dipenderà dunque da questo prodotto, per cui qualora uno dei parametri sia basso, si avrà anche un basso rendimento.

Con l'aggiunta di particolari sostanze chelanti è possibile aumentare tale capacità assorbente in piante quali *Brassica juncea*, *Helianthus annuus* e *Zea mays*. In questi vegetali si è osservato un rilevante incremento della traslocazione di Pb alle parti mietibili della pianta in seguito alla somministrazione di chelante (K2EDTA) al terreno di coltura immediatamente prima della fioritura, quando le piante hanno già prodotto la maggior parte della biomassa.

Nel corso di questa tecnica, inoltre, la tossicità riflessa dalla pianta sembra essere legata, più che all'inquinante, al chelante in eccesso, normalmente associato a Ca²⁺ e Mg²⁺ ed in grado di modificare gli equilibri tra micro- e macro-nutrienti, regolati con estrema precisione in tutte le cellule.

Esistono due diversi approcci legati alla fitoestrazione:

1. **Fitoestrazione continua:** utilizza piante che si sono evolute sul suolo minerario come accumulatrici di metalli e che sono in grado di assorbire elevate concentrazioni di inquinante durante l'intero ciclo di vita, pur producendo poca biomassa;

2. **Fitoestrazione indotta o assistita:** fa uso di piante ad elevata produzione di biomassa e breve ciclo vegetativo. Queste vengono indotte all'accumulo di metalli per l'azione di molecole chelanti (EDTA, DTPA, NTA) aggiunte al terreno.

Al termine di un intervento di bonifica tramite fitoestrazione, è importante programmare la gestione delle masse vegetali prodotte, valutando il sistema di smaltimento più adatto in relazione al tipo ed alla concentrazione dei contaminanti presenti, ed alle prescrizioni normative in materia di rifiuti (*Baker A.J.M., 1994*). Durante il processo di fitoestrazione, il percorso effettuato dall'inquinante dipende sia dallo stesso che dal tipo di pianta utilizzata. L'inquinante viene prima captato dalle radici tramite flusso di traspirazione per le sostanze disciolte in acqua o tramite le proteine associate alle membrane delle radici stesse, quindi si sposta ai germogli o alle foglie, che vengono infine rimosse tramite potatura. Questa tecnica, per le sue caratteristiche, è segnalata come la più adatta a metalli e radionuclidi (*EPA, 2000*) e per realizzarla si utilizzano specie con la maggiore tendenza a catturare la sostanza desiderata, chiamate iperaccumulatrici o alofite (per i sali).

CYNARA CARDUNCULUS L.

Cynara cardunculus L.

Specie: Cynara cardunculus;

Famiglia: delle Asteraceae;

Sottofamiglia: Tubuliflorae;

Tribù: Cynareae;

Genere: Cynara.

Il Cardo è una specie erbacea perenne originaria del bacino Mediterraneo che si adatta molto bene ai climi caldo-aridi. Essa vegeta nel periodo autunnale e invernale e presenta ottime produzioni di biomassa.

La coltivazione del Cynara risale ai tempi dell'Impero Romano. Dagli anni '90, inoltre, il cardo da costa è stato rivalutato come coltura da destinare alla produzione di biomassa per energia (cardo da energia), al pari del cardo selvatico, suo progenitore ampiamente diffuso allo stato spontaneo.

L'uso del cardo come coltura da biomassa per energia nasce dall'altissima adattabilità a svariati tipi di terreno ed agenti atmosferici presentata da questa specie. Infatti il *C. cardunculus* L. si contraddistingue per la sua particolare resistenza all'ambiente mediterraneo, tipicamente caratterizzato da apporti idrici limitati e distribuiti irregolarmente durante l'anno (Raccuia S.A., 2011).

Tale coltura rende possibile la riattivazione di aree abbandonate, migliorando il governo complessivo del territorio ed incidendo in particolar modo sul contenimento dei fenomeni di erosione del suolo di alcune aree collinari centro-meridionali ed insulari.

Gli studi fin ora effettuati sul Cardo hanno dimostrato la sua piena validità nel campo della phytoremediation (Llugany M., 2012; Papazoglou E.G., 2011).

Sono molteplici i vantaggi legati al suo utilizzo:

- Basso costo;
- Condizioni di crescita non particolarmente difficili;
- Accumulo di alte concentrazioni di metallo dal terreno;
- Biomassa utilizzabile successivamente per la produzione di bioenergia.

In Sicilia, l'incremento dell'inquinamento nelle zone circostanti raffinerie ed industrie (Milazzo, Priolo, Gela, Augusta) ha destato grande preoccupazione per la salute pubblica, colpita sia direttamente, per l'inalazione dei fumi di scarico diluiti nell'aria ambiente che indirettamente, attraverso il consumo di acqua o alimenti contaminati. L'utilizzo della phytoremediation potrebbe essere una

soluzione adeguata alla bonifica del territorio e, come in Sardegna, una possibile svolta verso un'economia ecosostenibile (Costanzo M. F., 2014).

TRATTAMENTI FISICI

I trattamenti fisici sono associati alla variazione dello stato fisico degli inquinanti, che ne consente il trasferimento tra le diverse fasi del suolo. Sono procedure che avvengono a temperature molto maggiori di quelle atmosferiche e, per questo, definite pure trattamenti termici. Le sostanze inquinanti, per effetto dell'energia termica fornita alla matrice inquinata sono desorbite dalla matrice solida e possono essere vaporizzate e distrutte.

Le modalità operative si distinguono in:

- **Desorbimento termico:** vaporizzazione/pirolisi dei composti volatili (organici e/o inorganici) con temperatura in genere variabili tra 90 e 650°C;
- **Termodistruzione:** trattamento di ossidazione termica convenzionale con temperature variabili tra 850 e 1600°C;
- **Vetrificazione a caldo:** trattamento di ossidazione termica convenzionale con temperature superiori di 2000°C.

VETRIFICAZIONE

I rifiuti possono essere divisi, in prima approssimazione, in due categorie: rifiuto organico e inorganico, ed entrambe le categorie si dividono in rifiuto pericoloso e non pericoloso. I rifiuti organici (pericolosi e non) sono combustibili, quindi attualmente l'incenerimento è il trattamento di eliminazione più utilizzato in tutto il mondo, poiché è tecnologicamente semplice e dà la possibilità di riutilizzare il

calore generato durante il processo. I rifiuti inorganici derivano in gran parte da vari tipi di processi industriali, principalmente dai settori metallurgico, siderurgico e chimico, ma possono derivare anche dalla demolizione di edifici e strutture civili (realizzate, ad esempio, con cemento contenente amianto) o essere costituiti dalle scorie di vari processi di combustione (ceneri volanti derivate dai termovalorizzatori per esempio). Questi rifiuti vanno inertizzati prima di essere mandati in discarica o recuperati, e la loro inertizzazione può essere ottenuta attraverso diversi processi chimici e fisici come:

- Stabilizzazione con agenti chimici;
- Estrazione con acidi o altri solventi;
- Calcinazione a temperature elevate;
- Stabilizzazione - solidificazione;
- Vetrificazione.

Gli ultimi due processi elencati immobilizzano le sostanze inquinanti in un'opportuna matrice che impedisce il loro rilascio nell'ambiente.

I processi termici inducono la separazione dell'inquinante per volatilizzazione o desorbimento o per fissarlo in fusione con la matrice solida o ancora per distruggerlo termicamente. I sedimenti vengono portati a temperature superiori di parecchie centinaia o migliaia di gradi sopra la temperatura ambientale. Questi processi sono generalmente le opzioni più efficaci per distruggere gli agenti inquinanti organici, ma sono anche i più costosi. Un esempio di tali processi è la vetrificazione, che oltre ad essere un trattamento di bonifica termico, rientra anche tra i processi di inertizzazione. La vetrificazione è una tecnologia tra le più efficienti per il trattamento dei rifiuti inorganici, compresi quelli pericolosi. I rifiuti pericolosi possono essere vetrificati facendoli fondere, se necessario con l'aggiunta di ossidi formatori di vetro (in genere silice); conviene, dunque, modificare la sua composizione aggiungendo altri materiali di scarto come rottami di vetro. Un successivo raffreddamento del fuso ad una velocità sufficientemente

elevata impedirà la cristallizzazione. Durante il processo la parte organica del rifiuto come diossine e furani presenti nel rifiuto vengono decomposti e bruciati a temperature di circa 1400°C, mentre la parte inorganica viene stabilizzata poiché i suoi costituenti a livello atomico vengono trattenuti all'interno della matrice vetrosa. Sfruttando così una delle principali caratteristiche del vetro, ovvero la sua elevata stabilità chimica, che lo rende un materiale capace di contenere nella sua struttura un'enorme quantità di inquinanti sotto forma di ossidi. L'inerzia chimica del prodotto finale permetterà a quest'ultimo di essere interrato in discarica senza particolari problemi, ma anche riciclato come materia prima secondaria per la realizzazione di nuovi prodotti.

Nei primi anni sessanta la vetrificazione venne riconosciuta per la prima volta come il trattamento più appropriato per immobilizzare i rifiuti ad alto livello di radioattività (HLW – High Level radioactive Waste) e ottenere così un prodotto di rifiuto estremamente inerte e stabile nel tempo. Ad oggi è ancora considerata in tutto il mondo come la migliore tecnologia disponibile per il trattamento dei rifiuti HLW. In virtù degli ottimi risultati ottenuti dalla vetrificazione dei rifiuti HLW, negli anni ottanta e novanta tale tecnologia venne gradualmente estesa ad altri tipi di rifiuti pericolosi e contemporaneamente vennero collaudate e commercializzate varie tipologie di impianti di vetrificazione. Purtroppo, ad oggi, la tecnologia della vetrificazione, nonostante gli ottimi risultati ottenuti sia a livello scientifico che sperimentale, fa ancora fatica ad affermarsi. Bisogna tenere presente, infatti, che la vetrificazione è un processo più costoso di altri a causa della grande quantità di energia termica o elettrica necessaria per la fusione del rifiuto. Vanno però considerati anche altri aspetti, come l'aumento dei costi per il mantenimento delle discariche, la sempre minore disponibilità di nuovi siti da trasformare in discariche e la riluttanza della gente riguardo l'apertura di questi. In definitiva, perciò, un utilizzo vasto della vetrificazione viene accettato solo quando la sicurezza ambientale è prioritaria rispetto al costo, come nel caso delle

scorie nucleari. Tuttavia questo ostacolo potrebbe essere superato se il rifiuto, una volta vetrificato, venisse trasformato in prodotti a valore aggiunto e prezzo competitivo, invece che essere mandato in discarica o utilizzato in applicazioni di scarso valore, ad esempio come aggregato inerte per fondi stradali. In questo modo si potrebbero non solo abbattere i costi di vetrificazione, ma anche ottenere un profitto dai nuovi prodotti realizzati. Molte ricerche scientifiche hanno dimostrato la fattibilità del riutilizzo dei vetri derivati da rifiuti di vario tipo, che possono essere convertiti in vetroceramiche, vetroschiume, fibre di vetro e altri prodotti. Inoltre, studi recenti hanno evidenziato la possibilità di utilizzare il prodotto della vetrificazione come materia prima secondaria nella produzione di ceramici tradizionali, come mattoni o piastrelle da pavimentazioni.

I principali vantaggi della vetrificazione:

- Flessibilità del processo, che permette di trattare diverse tipologie di rifiuto come fanghi, ceneri volanti, scorie da processi chimici o metallurgici, solidi secchi e umidi (compreso l'amianto), in proporzioni variabili e, spesso, senza bisogno di trattamenti preliminari.
- Distruzione di tutti i componenti organici, inclusi i più tossici come le diossine e i furani, con un'efficienza superiore al 99,99%.
- Completa immobilizzazione dei componenti inorganici pericolosi, come metalli pesanti o elementi radioattivi, in forma ionica all'interno della matrice vetrosa.
- Notevole riduzione del volume del rifiuto (dal 20 al 97%, a seconda del tipo di rifiuto).
- Buone proprietà meccaniche e termiche del vetro prodotto.
- Eccellente stabilità chimica e durabilità del vetro prodotto, che risulta resistente all'attacco dell'acqua e di altri agenti chimici. Ciò comporta un basso impatto ambientale e la possibilità di smaltire il vetro in discarica senza problemi, poiché gli inquinanti inorganici vengono trattenuti, o

comunque il loro rilascio è talmente basso da non produrre effetti negativi sull'ambiente.

- La tecnologia è ben consolidata.

La vetrificazione può avvenire attraverso una serie di processi che si distinguono per il sistema di riscaldamento adottato nel forno. In genere vengono utilizzate temperature elevate e spesso la diversa natura dei rifiuti può dar luogo, oltre che al prodotto vetrificato, a prodotti secondari che vanno rimossi in sicurezza. Per esempio può verificarsi la deposizione di metallo fuso alla base del forno, mentre all'estremità superiore si può formare un sottile strato di sali liquidi, specialmente se il bagno fuso contiene elevate quantità di cloruri, solfati o altre sostanze a bassa solubilità nel vetro fuso.

Impianti e processi di vetrificazione

La vetrificazione può avvenire attraverso una serie di processi che si distinguono per il sistema di riscaldamento adottato nel forno. Le temperature elevate e la diversa natura dei rifiuti può dar luogo, oltre che al prodotto vetrificato, a prodotti secondari che vanno rimossi in sicurezza. Potrebbe, per esempio, depositarsi del metallo fuso alla base del forno, oppure, all'estremità superiore si può formare un sottile strato di sali liquidi, specialmente se il fuso contiene elevate quantità di cloruri, solfati o altre sostanze a bassa solubilità nel vetro fuso. La scelta del tipo di processo, e quindi di impianto, non è perciò legata solo al tipo di riscaldamento, ma deve tenere conto anche degli impianti e dei sistemi di trattamento dei prodotti secondari.

Alcuni dei principali tipi di impianti per la vetrificazione sono descritti di seguito:

- **Forno a combustione:** l'energia termica necessaria per la fusione del rifiuto è ricavata dalla combustione di gas naturale, olio combustibile o carbone. Questi forni possono essere di vario tipo: a vasca, a ciclone, a fusione superficiale o disposti come altiforni in scala ridotta.

- **Forno elettrico:** in questo tipo di forni il bagno fuso è attraversato da una corrente elettrica generatasi tra due elettrodi posti a una certa differenza di potenziale. Tali elettrodi sono posizionati al centro o ai lati del forno e sono totalmente immersi nel fuso. L'energia elettrica della corrente viene dissipata come calore per effetto Joule con un'elevata efficienza di conversione.
- **Forno a induzione a crogiolo freddo:** questa tecnologia è stata applicata principalmente nella vetrificazione di scorie nucleari. Il crogiolo metallico del forno è avvolto da una spira e il riscaldamento avviene per induzione. Le pareti interne vengono raffreddate in modo da permettere la formazione di uno strato di vetro che protegge il crogiolo dalla corrosione. Il rifiuto fuso si trova quindi avvolto da uno strato di vetro della stessa composizione, e vista anche l'assenza di elettrodi, non c'è alcun rischio di contaminazione.
- **Vetrificazione in-situ:** questa tecnologia permette di ottenere una vetrificazione diretta sul posto di terreni contaminati. Il processo avviene tramite l'inserimento nel terreno di quattro elettrodi e la conseguente fusione per effetto Joule, che trasforma la porzione di terreno circondata dagli elettrodi in un unico blocco monolitico. Dato che il terreno solitamente è poco conduttivo, il riscaldamento iniziale viene favorito collegando gli elettrodi con mezzi conduttivi come fibre di vetro impregnate con grafite ad alta conducibilità elettrica. Quando la porzione di terreno risulta completamente fusa, gli elettrodi vengono fatti affondare ulteriormente per proseguire la fusione fino alla profondità desiderata (fino a 6-7 metri). La temperatura di fusione varia dai 1500 ai 2000°C e il dispendio di energia è di 500-800 kWh/ton, ciò rende il processo molto efficiente. Quando il volume di terreno desiderato è completamente fuso, si sospende l'alimentazione elettrica e si attende il raffreddamento per ottenere un blocco monolitico di struttura vetrosa e cristallina che incorpora

sostanze inorganiche e metalli pesanti. Il prodotto risulta stabile e chimicamente inerte. L'alta temperatura di processo assicura inoltre l'eliminazione di tutte le sostanze organiche tramite pirolisi o evaporazione. Sopra l'intera area di trattamento vi è una copertura che permette l'aspirazione e la purificazione dei fumi di processo. L'impianto di vetrificazione in-situ è mobile e permette di fondere terreni di diversa composizione chimica. Il costo del processo dipende dalla profondità del terreno contaminato, dal suo grado di omogeneità e dalla presenza di detriti o umidità eccessiva. Il costo di processo generalmente elevato rende la vetrificazione in-situ adatta principalmente ai rifiuti pericolosi, per esempio quelli ricchi di sostanze organiche e metalli. Il processo risulta inoltre adatto per ripulire terreni contaminati da metalli pesanti (cromo, piombo, cadmio e arsenico) e da composti organici pericolosi (derivati da solventi, pesticidi, diserbanti ecc). Anche i terreni inquinati da scorie radioattive vengono decontaminati in maniera ottimale con la vetrificazione in-situ.

- ***Vetrificazione auto-sostenuta:*** questo processo sfrutta l'energia rilasciata durante reazioni chimiche esotermiche tra una miscela di rifiuti e un combustibile di polveri metalliche (PMF – Powder Metal Fuel) al fine di ottenere un fuso che al raffreddamento formi un materiale vetroso. Il processo è controllato dalla composizione della miscela iniziale di rifiuto essiccato e macinato e del PMF; non sono richiesti né apporti di energia dall'esterno, né un impianto grande e costoso, anzi questa tecnologia risulta vantaggiosa specialmente per piccoli volumi di rifiuto pericoloso. Il combustibile a polveri metalliche è una miscela opportunamente progettata di componenti che generano calore: solitamente è costituito da polveri di metalli combustibili (per esempio alluminio o magnesio), componenti che contengono ossigeno e additivi. La vetrificazione auto-sostenuta ha

dimostrato di essere una tecnologia adatta per l'immobilizzazione di svariati tipi di rifiuto, comprese le scorie nucleari.

L'affidabilità della vetrificazione nel produrre un rifiuto inertizzato che non rilasci sostanze tossiche è garantita dal fatto che essa è l'unica tecnologia utilizzata da più di quarant'anni per inertizzare le scorie radioattive in tutti i paesi che utilizzano l'energia nucleare.

CONCLUSIONE

I sistemi di bionica dei siti contaminati non sono altro che una pezza messa dall'uomo per far fronte ai disastri ambientali che ha provocato dall'inizio della prima Rivoluzione Industriale. Infatti, per quanto questi sistemi possano arginare i danni più ampi, non si possono ripristinare tutti i siti al punto da riportarli come in origine. Molti di questi processi, come si è visto, hanno costi di progettazione, messa in opera e mantenimento molto alti, e molti di questi processi sono molto invasivi e richiedono tempi molto lunghi. Ancora oggi non esistono tecniche in grado di depurare e ripristinare tutti i tipi di siti contaminati, ma il buon senso della comunità scientifica ha fatto sì che gli sforzi della ricerca tecnico scientifica si muovesse in questa direzione. Ma per ottenere risultati positivi non basta solo inventare nuove tecniche, ma è anche necessario investire nelle tecnologie Green, in modo da abbattere l'inquinamento, e ridurlo usando sostanze che non alterano l'ambiente dopo la loro emissione in atmosfera. Quindi, basterebbe l'uso di accorgimenti in ambito industriale per poter migliorare lo stato di salute del nostro pianeta, ed arrestare il declino del nostro paese.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

SEQUI P. FONDAMENTI DI CHIMICA DEL SUOLO

ADRIANO D.C., BOLLAG J.M., FRANKENBERGER W.T., SIMS R.C. (1999)

BIOREMEDIATION OF CONTAMINATED SOILS.

E. BERNARDO, G. SCARINCI, P. COLOMBO. VITRIFICATION OF WASTE AND REUSE OF WASTE-DERIVED GLASS.