



APAT- Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e
dei Servizi Tecnici

La valutazione dei costi unitari di bonifica dei suoli

Ing. Simona De Arcangelis

Tutor: Ing. Giuseppe Di Marco
Co-tutor: Ing. Paola Di Toppa

ABSTRACT

La valutazione dei costi unitari di bonifica dei suoli

Uno dei compiti dell'APAT è quello di effettuare la valutazione del danno connesso alla presunta compromissione dell'ambiente, diretta a dimostrare gli effetti dei comportamenti illeciti sulle risorse ambientali e a consentire la quantificazione del relativo risarcimento a favore dello Stato.

Le normative prevedono che il risarcimento sia quantificato sulla base dei costi di ripristino dello stato dei luoghi. In alcuni casi, i costi per gli interventi di bonifica possono coincidere in tutto o in parte con i costi di ripristino. Tuttavia la mancanza di un prezzario di riferimento a livello nazionale per la valutazione economica degli interventi di bonifica crea all'APAT delle difficoltà nella valutazione del danno.

La definizione dei costi unitari di bonifica, obiettivo del presente lavoro, può essere utile all'APAT al fine della quantificazione del risarcimento nella valutazione del danno ambientale.

In una prima parte del lavoro, unitamente ad un'analisi dei fattori che incidono sui costi di bonifica, sono stati riportati studi di letteratura di quantificazione dei costi unitari di alcune delle tecnologie di bonifica dei suoli più utilizzate: a livello internazionale si è fatto riferimento ad uno studio realizzato nel 1997 dall'EPA, l'Agenzia Statunitense di Protezione ambientale, mentre nell'ambito della Comunità Europea si è fatto riferimento al progetto CLARINET "Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies" nell'ambito dell' Environment & Climate Programme of the European Commission DG Reserch.

In riferimento al contesto italiano, unitamente agli aspetti normativi e alle novità in materia di gestione dei siti contaminati introdotte dal Nuovo Testo Unico Ambientale (D. Lgs. 152/06), sono riportate indicazioni unitarie di costo reperibili in letteratura, più precisamente sull'Elenco Prezzi della Regione Piemonte (1996) e sul sito internet della Provincia di Milano.

Nel primo caso tali dati sono incompleti, oltre a essere molto datati rispetto all'evoluzione tecnologica che ha subito il settore delle bonifiche negli ultimi anni, e sono limitati solo ad alcune tecnologie di bonifica. Nel secondo caso i dati fanno riferimento sempre a studi dell'EPA, e le diverse condizioni di mercato (diversità di sviluppo delle tecnologie di

bonifica, diversi costi dei materiali e dell'energia...), non consentono di riportarli tal quali nel contesto italiano.

Infine, sono riportati alcuni casi studio di interventi di bonifica realizzati in Italia con relative indicazioni di costo, complessive ed unitarie.

Il presente lavoro ha permesso di ottenere, seppur in modo indicativo dei riferimenti utili nella quantificazione dei costi unitati di bonifica del suolo, nell'attesa dell'elaborazione di un prezzario di riferimento a livello nazionale, e di fare alcune considerazioni generali sullo stato di applicazione delle diverse tecnologie di bonifica.

ABSTRACT

The evaluation of the unitary costs of soils remediation

An APAT task is to effect the evaluation of the damage connected to the estimated environment damage, to show the effects of the illicit behaviours on the environmental resources and to allow the qualification of the relative indemnity in State's favour. The regulations provide a quantified indemnity on the basis of restoration costs of places state. Sometimes the reclamation costs can coincide in everything or partly with the restoration costs. But the lack of national level terms creates difficulties in damage evaluation for APAT.

The definition of the unitary costs of remediation can be useful to APAT to qualify the indemnity in the evaluation of the environmental damage.

In the first part of this work, together with an analysis of the factors that draw on the reclamation costs, there are quantification studies of the unitary costs about some soil remediation technologies: from an international point of view there are many references about a study realized in 1997 by EPA, the American Agency of environmental Protection, while within the European Community there are references to CLARINET project, "Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies", within the Environment & Climate Programme of the European Commission DG Research.

For the Italian context, together with the regulations and the management of contaminated sites novelties, introduced by Nuovo Testa Unico Ambientale (D. Lgs. 152/06), there are unitary cost indications available in literature, exactly on Elenco Prezzi of Regione Piemonte (1996) and on web pages of Provincia di Milano.

In the first case data are incomplete and very dated in comparison with the recent technological evolution that the remediation sector has suffered; besides these are restricted only to some remediation technologies. In the second case the data always refer to EPA studies and the different market conditions (difference of development of reclamation technologies, different costs of materials and energy...) don't allow to refer them to the Italian context. Finally there are some studies of remediation interventions realized in Italy with cost indications, overall and unitary.

This work has allowed to obtain, even if just as an indication, some useful references in the quantification of the unitary costs of soil remediation, waiting for the elaboration of a

reference price on a national scale, and to make some general considerations about the application of the different remediation technologies.

INDICE

1. INTRODUZIONE	8
2. SCELTA DELLA MIGLIORE TECNOLOGIA DI BONIFICA	10
2.1 RIFERIMENTI NORMATIVI NELLA SELEZIONE DELLA TECNICA DI BONIFICA	11
2.1.1 TIPOLOGIE DI INTERVENTO	12
2.1.2 IL PROGETTO DI BONIFICA	13
2.1.3 INDICAZIONI MINISTERIALI PER LA SCELTA DELLA MIGLIORE TECNOLOGIA DI BONIFICA	14
2.1.4 CRITICHE MOSSE ALLE NOVITA' INTRODOTTE DAL TESTO UNICO AMBIENTALE	16
2.2 ASPETTI TECNICI ED ECONOMICI NELLA SELEZIONE DELLA TECNOLOGIA	16
2.1.5 TECNOLOGIE PER IL TRATTAMENTO DEI SITI CONTAMINATI	17
2.1.6 FATTORI LEGATI ALLA NATURA DEGLI INQUINANTI	18
2.1.7 FATTORI LEGATI ALLA MATRICE E AL SITO	20
2.1.8 FATTORE DI SCALA DELL'INTERVENTO	22
2.1.9 I TEMPI DI INTERVENTO	23
2.1.10 FATTORI DI NATURA POLITICO-SOCIALE LEGATI ALLA DESTINAZIONE D'USO DEL SITO	24
3. I COSTI UNITARI DI TRATTAMENTO NEI DATI DI LETTERATURA	25
3.1 I COSTI UNITARI DI TRATTAMENTO	26
3.2 STUDIO DI QUANTIFICAZIONE EPA: COSTI UNITARI DI BONIFICA DEI SUOLI	27
3.2.1 GENERALITA'	27
3.2.2 STIMA DEI COSTI UNITARI	28
3.2.3 ANALISI DEI DATI	30
3.3 IL CONTESTO EUROPEO: STIMA COSTI DI BONIFICA CLARINET	33
3.3.1 GENERALITA'	33
3.3.2 RISULTATI OTTENUTI	33
3.4 IL CONTESTO ITALIANO	35
3.4.1 STIMA DELLA REGIONE PIEMONTE	35
3.4.2 II PREZZIARIO DEL PRONTO INTERVENTO ECOLOGICO	36
3.4.3 IL LINK BONIFICHE ON-LINE DEL SITO DELLA PROVINCIA DI MILANO	37
3.5 CONSIDERAZIONI SUI DATI DI LETTERATURA	38
4. CASI STUDIO E ANALISI DEI COSTI	40
4.1 BONIFICA CON BIOPILA IN UN DEPOSITO COSTIERO DI VENEZIA-PORTO MARGHERA	41
4.2 BONIFICA VIA LANDFARMING DI UN SITO CONTAMINATO DA GASOLIO GENOVA-PEGLI	41

4.3 BONIFICA VIA BIOSPARGING DI UN SITO CONTAMINATO DA IPA (ITALIANA COKE – AVENZA)	42
4.4 BONIFICA DELL'AREA EX-ACNA NEI COMUNI DI CERIANO LAGHETTO, CESANO MADERNO E BOVISIO MASCIAGO	43
4.5 INTERVENTO DI MESSE IN SICUREZZA CON ASPORTAZIONE E SMALTIMENTO DEI RIFIUTI STOCCATI IN AREA “EX-GHIRAF s.p.a.” NEL COMUNE DI ANNICCO	46
5. CONCLUSIONI	48
<i>APPENDICE 1: L'analisi di rischio</i>	<i>52</i>
<i>APPENDICE 2: Tecnologie di bonifica</i>	<i>55</i>
<i>APPENDICE 3: Concentrazioni soglia di inquinanti nel suolo</i>	<i>58</i>

1. INTRODUZIONE

La crescente sensibilità degli Enti Pubblici verso il problema della contaminazione degli insediamenti industriali, aree dismesse, discariche abusive, unitamente all'elevato numero di dismissioni di siti industriali sui quali in molti casi si sono concentrati ingenti interessi economici finalizzati al loro riutilizzo, ha riproposto l'interesse in tema di bonifiche di siti contaminati.

Per sottolineare l'entità del fenomeno, secondo una stima del Ministero dell'Ambiente, in Italia i siti contaminati da inquinamento industriale sarebbero almeno 11.000¹.

L'interesse per il risanamento di tali aree deriva da numerosi fattori, tra cui: la preoccupazione per i rischi igienico-sanitari ad esse collegati, la necessità di sfruttare al meglio gli spazi disponibili, soprattutto in ambiente urbano, a causa della crescente antropizzazione del territorio, e la salvaguardia dell'approvvigionamento idropotabile.

La presenza di forti interessi legati alla bonifica dei suoli, sia da parte di proprietari, sia da parte di cittadini, impone che le scelte in materia siano fatte in modo esplicito e trasparente, mediante procedure standardizzate.

La bonifica dei siti contaminati è tuttavia un problema complesso, che comprende aspetti tecnologici, ambientali, economici e sociali.

La scelta della tecnologia più adatta richiede una serie di valutazioni relative a tutte le fasi del processo, che consente di individuare caso per caso l'intervento più adeguato in relazione ai costi e ai benefici ad esso associati.

Indipendentemente dal metodo di quotazione dei benefici, comunque, gli strumenti decisionali richiedono che sia effettuata una stima dei costi associati ad ogni tecnologia applicabile nei casi in esame.

L'obiettivo del presente lavoro è stato quello di definire i costi unitari di trattamento per le più diffuse tecnologie di bonifica.

Il lavoro è articolato in tre parti: la prima parte (Capitolo 1), ha lo scopo di inquadrare il problema della bonifica dei siti contaminati sia alla luce dell'entrata in vigore del nuovo Testo Unico Ambientale che ha introdotto numerose novità nella gestione di tale problematica, in particolare introducendo l'analisi di rischio in luogo dell'approccio tabellare, sia relativamente agli aspetti tecnici-economici che, nell'analisi decisionale

¹ "Introduzione alla bonifica dei siti inquinati" di Marco Giangrosso, Giuseppe Gisotti ed Emilio Tassoni - Atti del corso di aggiornamento *Bonifica dei siti inquinati*, Roma 19-21/03/2003)

finalizzata all'applicazione della tecnologia di bonifica "ottimale", giocano un ruolo di fondamentale importanza; in una seconda parte (Capitolo 2) sono stati riportati i risultati di alcuni studi, sviluppati sia a livello internazionale che europeo, in cui è stata elaborata una stima dei costi unitari di trattamento per le diverse tecnologie di bonifica, evidenziandone sia problematiche che prerogative.

Infine (Capitolo 3) è proposta una raccolta di casi studio, relativamente al contesto italiano, da cui è stato possibile trarre informazioni sui costi unitari di bonifica, discutendo i risultati ottenuti.

2. SCELTA DELLA MIGLIORE TECNOLOGIA DI BONIFICA

La contaminazione dei suoli è un'importante questione ambientale emersa negli ultimi anni con crescente insistenza, in seguito alla diffusione a livello mondiale delle attività industriali e degli insediamenti urbani.

La crescita esponenziale della problematica dell'inquinamento del suolo è stata determinata in gran parte dall'assenza, per un lungo periodo di tempo, di norme finalizzate a conciliare lo sviluppo industriale con il rispetto dell'ambiente, dalla scarsa conoscenza degli impatti ambientali derivanti dall'impiego di prodotti chimici nei processi produttivi e dalla carenza di informazioni sul reale stato di salubrità delle aree urbane e industriali a rischio.

Nei Paesi maggiormente industrializzati, gran parte del fenomeno dei siti contaminati è imputabile a numerosi complessi industriali, spesso abbandonati o frettolosamente dislocati senza le necessarie opere di messa in sicurezza.

Allo stato attuale, le politiche di tutela ambientale dell'Unione Europea sono indirizzate a risanare i danni ambientali e a recuperare le aree dimesse per lo sviluppo delle città, tutelando nel contempo i terreni naturali non ancora edificati.

In tale ottica, l'opera di bonifica di un sito contaminato, oltre che strumento di tutela del territorio e della salute umana, diviene un importante vettore dello sviluppo sociale ed economico, favorendo la trasformazione di intere aree da zone improduttive a zone di riqualificazione ambientale, urbana ed economica.

La scelta della tecnologia più adatta richiede una serie di valutazioni relative a tutte le fasi del processo, che consenta di individuare, caso per caso, l'intervento più adeguato in relazione ai costi e ai benefici ad esso associati.

Benché ogni intervento presenti caratteristiche peculiari e richieda studi sito-specifici, possono essere individuate linee comuni di approccio e strutturazione dell'analisi per la selezione della migliore tecnologia.

Obiettivo del presente capitolo è quello di individuare sia gli aspetti legislativi, sia tecnici ed economici che devono essere valutati, in fase progettuale, nella scelta della "migliore tecnica di intervento a costi sopportabili".

2.1 RIFERIMENTI NORMATIVI NELLA SELEZIONE DELLA TECNICA DI BONIFICA

Nel titolo V, Parte quarta, del Testo Unico Ambientale, (Pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 88 del 14 aprile 2006) sono stati disciplinati, tra l'altro, anche gli interventi di bonifica e ripristino ambientale dei siti contaminati, definendo le modalità per lo svolgimento delle operazioni necessarie per l'eliminazione delle sorgenti di inquinamento e per la riduzione delle concentrazioni delle sostanze inquinanti.

La nuova disciplina abbandona l'approccio tabellare del D.M. 471/99 dove, per individuare gli obiettivi di bonifica di un sito, era utilizzato, come riferimento, un criterio numerico fisso, costituito dalle concentrazioni limite ammissibili.

Nel nuovo decreto legislativo è invece utilizzato un processo decisionale, utilizzato anche in altri Paesi europei, basato sulla valutazione del rischio, nel quale le azioni correttive sono dimensionate sulle caratteristiche del sito e sui pericoli concreti che esso pone all'ambiente e alla popolazione.

Nella nuova normativa i limiti tabellari rappresentano i valori soglia (Concentrazioni Soglia di Contaminazione, CSC), superati i quali è necessaria la caratterizzazione di un sito e l'analisi di rischio sito specifica. Il sito è contaminato al superamento dei valori soglia di rischio (Concentrazioni Soglia di Rischio, CSR) individuati con l'analisi di rischio sito specifica, e che rappresentano anche gli obiettivi della bonifica, (Figura 2.1, pagina seguente).

Con questo processo è stimato il rischio associato alla contaminazione in funzione delle specifiche problematiche del sito, consentendo di investire il tempo e gli sforzi in modo proporzionato alla complessità ed alla pericolosità della contaminazione.

Si rimanda in Appendice 1 una più dettagliata definizione dell'analisi di rischio e delle modalità di calcolo.

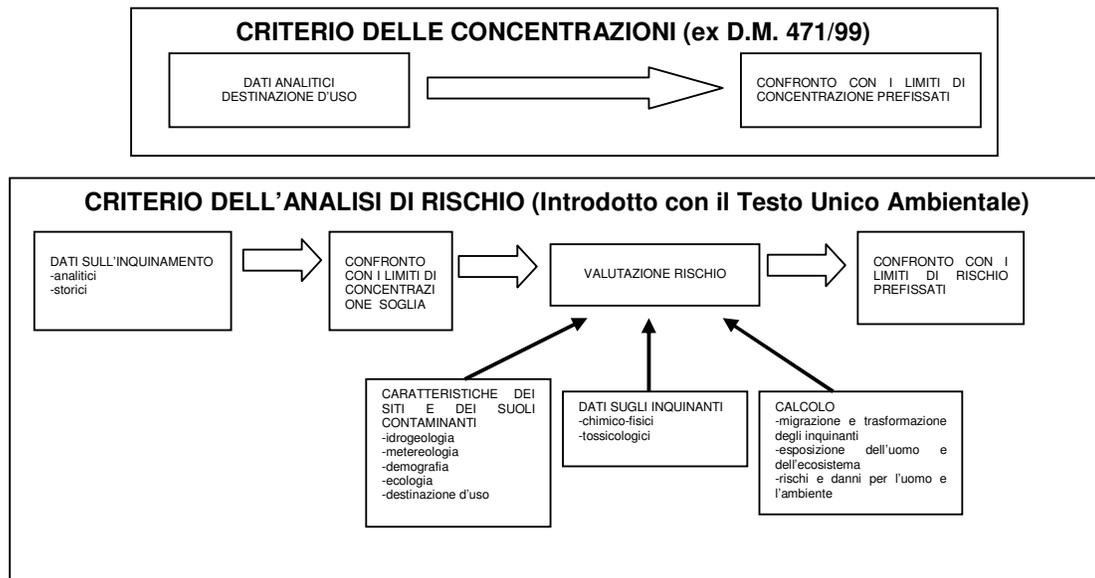


Figura 2.1: Differenze modalità di approccio alla gestione dei siti contaminati, secondo l'ex D.M. 471/99 e il nuovo Testo Unico Ambientale

2.1.1 TIPOLOGIE DI INTERVENTO

La normativa stabilisce diverse opzioni da prendere in considerazione, sia per pervenire ad un'effettiva eliminazione o riduzione della contaminazione, sia per conseguire un'efficace azione di protezione delle matrici ambientali influenzate dagli effetti del sito, mediante la messa in sicurezza dello stesso, qualora le tecnologie di bonifica dovessero risultare meno efficaci, ovvero non sostenibili economicamente, ovvero non compatibili con la prosecuzione delle attività produttive.

Tra gli interventi possibili si distinguono nella normativa:

- **Interventi di bonifica**, finalizzati ad eliminare l'inquinamento delle matrici ambientali, o a ridurre le concentrazioni di inquinanti nel suolo, sottosuolo, acque sotterranee e superficiali entro valori soglia di rischio (CSR), definiti in base ad una metodologia di Analisi di Rischio condotta per il sito.
- **Interventi di messa in sicurezza**, 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. Essi sono distinti in:
 - interventi che hanno carattere d'urgenza e che si applicano in caso di rilasci accidentali o di improvviso accertamento di una situazione di contaminazione (*interventi di messa in sicurezza d'urgenza*). Tale

intervento deve essere pianificato entro 48 ore dal presunto evento inquinante;

- interventi specifici per i siti “in esercizio”, laddove un intervento di bonifica intensivo comporterebbe delle limitazioni, se non l’interruzione delle attività di produzione (*interventi di messa in sicurezza operativa*). Tali interventi sono finalizzati al contenimento degli inquinanti all’interno del sito ed alla graduale eliminazione delle sorgenti inquinanti secondarie in step successivi programmati, rimandando la bonifica alla dismissione delle attività;
- *Interventi di messa in sicurezza permanente*, per i siti non interessati da attività produttive in esercizio, per i quali però non sia possibile procedere alla rimozione degli inquinanti pur applicando le migliori tecnologie disponibili a costi sopportabili.

2.1.2 IL PROGETTO DI BONIFICA

Diversamente dalla normativa precedente, l’intervento di bonifica deve seguire un’unica fase di progettazione, modificabile in base alle conoscenze acquisite in fase di caratterizzazione, essendo la natura degli inquinanti e le caratteristiche del sottosuolo eterogenee e complesse.

Sono riportate di seguito, in modo schematico le varie fasi dell’intervento:

- *Piano della caratterizzazione*, il cui obiettivo è quello di raccogliere e rappresentare tutti gli elementi che servono a definire l’estensione dell’area da bonificare, i volumi di suolo contaminato, le caratteristiche rilevanti dell’ambiente naturale e costruito, il grado di inquinamento delle diverse matrici ambientali;
- *Progetto operativo* (unico progetto, a differenza del D.M. 471/99 che richiedeva approvazione del progetto preliminare e definitivo). L’autorizzazione del progetto di bonifica sostituisce tutte le autorizzazioni e concessioni. Ai soli fini della realizzazione e dell’esercizio degli impianti e delle attrezzature necessarie all’attuazione del progetto operativo, l’autorizzazione regionale dello stesso sostituisce a tutti gli effetti le autorizzazioni, le concessioni, le intese, i nulla osta, e pareri e gli assensi. Il progetto di bonifica si basa, dunque, su principi di

comprensività e unitarietà per andare a favore di una maggiore certezza giuridica e di un'attuazione effettiva di quanto annunciato.

2.1.3 INDICAZIONI MINISTERIALI PER LA SCELTA DELLA MIGLIORE TECNOLOGIA DI BONIFICA

Gli interventi di bonifica, secondo quanto riportato nella suddetta normativa, devono essere condotti secondo alcuni criteri tecnici generali:

- 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;
- privilegiare le tecniche di bonifica tendenti a trattare e riutilizzare il suolo in situ o on site con conseguente riduzione dei rischi derivanti dal trasporto e messa in discarica di terreno inquinato;
- privilegiare le tecniche di bonifica o messa in sicurezza che blocchino le sostanze inquinanti in composti chimici stabili (ad esempio fasi cristalline stabili per metalli pesanti);
- privilegiare le tecniche di bonifica che permettono il trattamento e il riutilizzo nel sito dei materiali eterogenei o di risulta utilizzati nel sito come materiali di riempimento;
- prevedere il riutilizzo del suolo e dei materiali eterogenei sottoposti a trattamenti off site sia nel sito medesimo che in altri siti che presentino le caratteristiche ambientali e sanitarie adeguate;
- privilegiare negli interventi di bonifica e ripristino ambientale l'impiego di materiali organici di adeguata qualità provenienti da attività di recupero di rifiuti urbani;
- evitare ogni rischio aggiuntivo a quello esistente di inquinamento dell'aria, delle acque sotterranee e superficiale, del suolo e sottosuolo, nonché ogni inconveniente derivante da rumori e odori;
- evitare rischi igienico-sanitari per la popolazione durante lo svolgimento degli interventi;
- adeguare gli interventi di ripristino ambientale alla destinazione d'uso e alle caratteristiche morfologiche, della vegetazione e paesistiche dell'area.

I criteri per la selezione e l'esecuzione degli interventi di bonifica e ripristino ambientale, nonché l'individuazione delle migliori tecniche di intervento a costi sostenibili (B.A.T.N.E.E.C. Best Available Technology Not Entailing Excessive Costs) applicabile in un determinato caso di inquinamento di un sito comporta il bilanciamento di vari interessi in presenza di numerose variabili sia di ordine generale che soprattutto sito-specifiche, quali in particolare:

- il livello di protezione ambientale da conseguire;
- l'esistenza o meno di tecniche affidabili in grado di conseguire e mantenere nel tempo detti livelli di protezione;
- l'entità dei costi di progettazione, realizzazione, gestione, monitoraggio, da sostenere nelle varie fasi dell'intervento.

La formulazione più evoluta cui deve ispirarsi tale bilanciamento è data dalla definizione di "migliori tecnologie disponibili", contenuta nella Direttiva Comunitaria 96/61/CE (IPPC, Integrated Pollution Prevention and Control), recepita nel nostro ordinamento, che per la prevenzione e il controllo integrati dell'inquinamento di talune categorie di impianti considera tale:

"la più efficiente ed avanzata fase di sviluppo di attività e relativi metodi di esercizio indicanti l'idoneità pratica di determinate tecniche a costituire, in linea di massima, la base dei valori limite di emissione intesi ad evitare oppure, in linea di massima, a ridurre in modo generale le emissioni e l'impatto ambientale sull'ambiente nel suo complesso".

E specifica per:

- <<Tecniche>>, sia le tecniche impiegate sia le modalità di progettazione, costruzione, manutenzione, esercizio e chiusura dell'impianto;
- <<disponibili>>, le tecniche sviluppate su una scala che ne consenta l'applicazione in condizioni economicamente e tecnicamente valide nell'ambito del pertinente comparto industriale, prendendo in considerazione i costi e i vantaggi, indipendentemente dal fatto che siano applicate o meno o prodotte nello Stato membro di cui si tratta, purché il gestore possa avervi accesso a condizioni ragionevoli;
- <<migliori>>, le tecniche più efficaci per ottenere un elevato livello di protezione dell'ambiente nel suo complesso.



2.1.4 CRITICHE MOSSE ALLE NOVITA' INTRODOTTE DAL TESTO UNICO AMBIENTALE

Alla luce dell'entrata in vigore del testo unico ambientale molti sono i commenti e le critiche riportati da tecnici, giuristi, ambientalisti e operatori del settore.

Molti di loro accusano il Testo Unico di privilegiare le esigenze produttive rispetto a quelle ambientali, rendendo obbligatori gli interventi di ripristino solo a determinate condizioni, e non ogni qual volta si riscontri un fenomeno di inquinamento, in particolare introducendo la Messa in Sicurezza Operativa (MSO), che prevede: *“la graduale eliminazione delle sorgenti inquinanti secondarie”* rimandando l'intervento di bonifica vero e proprio dopo la dismissione delle attività produttive ubicate sul sito.

L'introduzione dell'analisi di rischio trova d'accordo molti tecnici, e mette l'Italia in linea con gli altri Paesi della Comunità Europea. Ma, secondo molti giuristi:

“la rigidità con cui è introdotta e il ruolo prioritario che assume rispetto all'approccio tabellare portano due pericoli: che non si bonifichi più nulla e che gli enti locali siano relegati a ricoprire un ruolo meramente burocratico”.

“La procedura con cui un privato dichiara che, sulla base dell'analisi del rischio, un sito non è inquinato, giungendo così alla chiusura della procedura di bonifica, è condotta senza il controllo reale dei soggetti pubblici, ma solo in base a un controllo burocratico: il pubblico è chiamato solo a verificare a tavolino che il privato abbia fatto quanto dichiara”.

“La gestione dei siti contaminati di interesse locale spetta alla Regione, mentre quella dei siti di interesse nazionale spetta al ministero dell'Ambiente. Il che, oltre a svilire il ruolo dei Comuni, comporta per loro la possibilità di trovare modifiche al proprio territorio decise altrove”².

Infine la normativa non prevede un regime transitorio indispensabile per facilitare l'attuazione di nuove disposizioni, compatibilmente con l'obbligo del rispetto delle normative preesistenti.

2.2 ASPETTI TECNICI ED ECONOMICI NELLA SELEZIONE DELLA TECNOLOGIA

² www.ecosportello.org, pubblicazione di Legambiente, Anno 4 Nr. 7 del 17/10/2005

Le procedure operative da realizzare dall'accertamento della contaminazione di un sito fino alla bonifica sono complesse e richiedono la disponibilità di professionalità diverse.

Tale complessità deriva:

- dall'eterogeneità tipica del suolo con la presenza di materiali tra loro molto spesso diversi;
- dalla frequente presenza contemporanea di più fasi contaminate (il suolo, i gas interstiziali e l'acqua);
- dai non semplici meccanismi sui quali si basano sia fenomeni di trasporto dei contaminanti, sia quelli utilizzati per la loro rimozione nel corso della bonifica.

L'insieme di questi elementi di complessità fa sì che i problemi da risolvere e i costi a essi associati devono essere considerati diversi da sito a sito.

E' comunque evidente che il costo complessivo di una bonifica dipende principalmente dalla quantità di materiale da trattare, dal comparto interessato al fenomeno di inquinamento (terreno saturo, terreno insaturo, falda, acque superficiali), dalla natura e concentrazione dei contaminati da rimuovere alle quali ovviamente deve essere vincolata la tecnologia o le tecnologie di bonifica oggi disponibili.

A questi fattori, puramente tecnici, si aggiungono ulteriori fattori di natura socio-economici, che saranno meglio descritti in seguito, che devono essere valutati di volta in volta, sito per sito, per la scelta della "migliore tecnologia".

2.1.5 TECNOLOGIE PER IL TRATTAMENTO DEI SITI CONTAMINATI

Le tecnologie di bonifica permettono di eliminare o di rendere innocue le sostanze che inquinano suoli o acque. A seconda del meccanismo prevalente su cui si basano, si possono distinguere tecnologie di tipo biologico, chimico, fisico e termico.

- I trattamenti biologici che utilizzano generalmente microrganismi per degradare le sostanze inquinanti di tipo organico, che rappresentano per i microrganismi fonte di nutrimento, e che sono generalmente degradati in anidride carbonica e acqua.
- I trattamenti chimici, che comprendono tipicamente reazioni redox che trasformano gli inquinanti in composti meno tossici o meno mobili.
- I trattamenti fisici, che si basano su sistemi in grado di separare il contaminante dalla matrice solida e di ottenerli in forma concentrata, destinandoli poi ad un trattamento finale.



- Infine, i trattamenti termici che possono indurre la separazione dell'inquinante oppure causarne la distruzione per pirolisi o ancora provocare l'immobilizzazione mediante fusione della matrice nella quale si trovano.

I processi di bonifica possono essere applicati direttamente sul luogo della contaminazione, cioè *in situ*, o dopo aver effettuato l'escavazione del suolo o il pompaggio delle acque di falda, ovvero *ex situ*.

In Appendice 2, è riportata la descrizione di alcune delle tecniche di bonifica più utilizzate nel trattamento di siti inquinanti.

Tra i fattori legati alla tecnologia che devono essere valutati per la scelta di quella ottimale rientrano:

- i limiti di efficacia del metodo di trattamento, il livello di sviluppo e di confidenza delle tecnologie applicabili;
- la presenza di effetti indesiderati collaterali al trattamento, quali rumore, cattivi odori, produzione di polveri e vibrazioni, mobilitazione di sostanze inquinanti;
- il rischio di incidenti associato al metodo di trattamento in relazione al sito.

2.1.6 FATTORI LEGATI ALLA NATURA DEGLI INQUINANTI

Gli inquinanti rilasciati nel suolo vanno incontro a una serie di fenomeni di migrazione, trasformazione e ripartizione tra le varie componenti del suolo stesso (gas interstiziale, particelle solide, acqua), che determinano sia l'estensione spaziale e temporale della contaminazione, sia la possibilità che essi vengano a contatto con l'uomo e con gli organismi sensibili dell'ambiente.

In generale, essi si possono diffondere dal luogo del rilascio muovendosi in superficie con l'acqua piovana, disciolti in essa o trascinati insieme ai detriti, verso l'atmosfera per volatilizzazione diretta o portate dal vento con la polvere, verso il sottosuolo dilavati dall'acqua piovana o, se in forma fluida, percolando direttamente verso il basso.

La via di migrazione nel sottosuolo è anche la più importante, in genere, per l'estensione spaziale che può assumere l'inquinamento quando sia trasportato da una falda mobile e per la persistenza temporale che ci si può attendere da sostanze assorbite nel terreno.

I fenomeni di trasporto e trasformazione sono in genere complessi e dipendono sia dalle proprietà chimico-fisiche delle sostanze coinvolte nell'inquinamento, sia dalle caratteristiche geologiche ed ecologiche del sito.

In particolare, per quanto riguarda la tipologia di contaminazione deve essere valutata:

- la biodegradabilità, ossia la resistenza all'attacco microbiologico;
- le caratteristiche chimico-fisiche che caratterizzano la mobilità e la persistenza dei composti nei suoli, (solubilità, volatilità, tensione di vapore...);
- la forma in cui l'inquinante è presente, se adsorbita sul suolo, disciolta nelle acque o si presenta come prodotto libero negli spazi interstiziali tra le particelle di suolo;
- la tossicità degli inquinanti, che determina le misure di prevenzione e sicurezza durante le operazioni di bonifica.

È riportata in Tabella 2.1 una matrice di applicabilità delle diverse tecniche di bonifica dei suoli inquinati in relazione alle proprietà chimico-fisiche e biologiche dei contaminanti organici, assai utile nella fase iniziale di scelta della tecnologia ottimale.

Tabella 2.1: Matrice di applicabilità delle diverse tecnologie in funzione delle caratteristiche degli inquinanti (fonte: elaborazione dati A. Colombo P. Perenni "Caratterizzazione degli inquinanti organici nella bonifica dei suoli", 2000)

	Estrazione di vapori	Soil flushing	strippaggio	Elettrocinesi	phytoremediation	Trattamenti termici	Stabilizzazione solidificazione	Isolamento	Landfarming	compostaggio	Soil washing	Discarica	incenerimento	Desorbimento termico	Bioreattori
Idrocarburi policiclici aromatici	□	■	■	□	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	□
Composti organici volatili	□	□	□	□	□	■	■	■	□	□	□	■	■	■	■
Composti organici semi-volatili	■	■	■	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	□
Altri composti chimici (Ammine aromatiche, nitrobenzene)	■	□	■	□	■	■	■	■	■	■	□	■	■	■	■
Pesticidi	—	□	—	—	□	■	■	■	■	□	■	■	■	■	■
PCB, diossine e furani	□	□	—	—	□	■	■	■	—	—	□	■	■	■	□
■	applicabile														
—	non applicabile														
□	potenzialmente applicabile														

La Tabella 2.1 è stata realizzata tenendo conto dell'applicabilità o meno delle tecnologie di bonifica unicamente sulla base delle proprietà degli inquinanti; non sono considerati altri aspetti che, inevitabilmente, influiscono sulla scelta finale della tecnica migliore (aspetti economici, tecnici, sociali, ambientali) di cui si discuterà nei capitoli successivi.

Le diverse tecniche di bonifica, tuttavia, sono confrontabili solo se permettono il raggiungimento e il rispetto dei limiti di concentrazione definiti a livello normativo.

2.1.7 FATTORI LEGATI ALLA MATRICE E AL SITO

Altri fattori che possono influenzare la scelta della tecnologia di bonifica da adottare, oltre che influire sul costo complessivo della bonifica sono legati strettamente alle caratteristiche del sito e alla matrice da decontaminare (terreno saturo, terreno insaturo, falda).

Influenzano la scelta e l'efficienza di un intervento di bonifica:

- il tipo di suolo (permeabilità, omogeneità);
- la vicinanza e la vulnerabilità dell'acquifero, l'idrogeologia del sito, la prossimità dei punti di prelievo della falda, le condizioni meteorologiche locali;
- la facilità di accesso al sito, l'estensione e la profondità della zona contaminata, la disponibilità di infrastrutture e la prossimità di insediamenti;
- lo spazio disponibile per il trattamento

In Tabella 2.2 e in Tabella 2.3 sono indicati alcuni dei parametri condizionanti, relativi alla matrice suolo e alle caratteristiche del sito, che ne determinano l'applicabilità delle diverse tecnologie (Fonte: A. Colombo P. Perenni "Caratterizzazione degli inquinanti organici nella bonifica dei siti inquinati", 2000).

Tab. 2.2: parametri condizionanti l'applicabilità delle diverse tecnologie relativi alle caratteristiche della matrice

CARATTERISTICHE DELLA MATRICE	
DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA	Influisce sul trasporto degli inquinanti e di un fluido. Per trattamenti ex situ, influisce sulla frazione in peso di materiale contaminato. Nel caso di trattamenti biologici in fase slurry, influisce sull'energia necessaria alla miscelazione/sospensione della torbida. Nel lavaggio, influisce sulla separazione fisica delle particelle solide e sulla riduzione di volume contaminato. Nei sistemi di desorbimento termico, influisce sulla velocità di trasferimento di calore nel materiale contaminato e sulla produzione di polveri.
CONTENUTO DI ARGILLA	Influisce sui meccanismi di interazione dei contaminanti con la matrice solida e sulla loro ripartizione tra le fasi.
pH	Può influire sul comportamento chimico-fisico dei contaminanti e sull'attività biologica. Inoltre può danneggiare i macchinari se < 2 o > 12.
UMIDITA'	Influisce sull'attività microbica, sul trasporto di aria e acqua nel sottosuolo, sull'energia richiesta per i trattamenti termici, sulla stabilizzazione.
CAPACITA' DI SCAMBO IONICO	Influenza il comportamento di alcuni ioni metallici.
POTENZIALE DI OSSIDO-RIDUZIONE	Può influire sul comportamento chimico-fisico dei contaminanti e sulla attività biologica.
NUTRIENTI	Sono necessari per l'attività microbica. Il loro contenuto è una caratteristica della matrice, ma può essere modificato
CONCENTRAZIONE BIOMASSA ADATTA	Influisce direttamente sulla quantità di substrato biodegradato nell'unità di tempo



Tab. 2.3: parametri condizionanti l'applicabilità delle diverse tecnologie relativi alle caratteristiche del sito

CARATTERISTICHE DEL SITO	
SUPERFICIE DA RISANARE	Influisce sui costi di indagine pre-trattamento, e sul quantitativo di materiale da trattare
SPESSORE DA RISANARE	Per i trattamenti in situ, può ad esempio influire sulle portate di fluido (aria, acqua) estratti o iniettati, mentre per i trattamenti ex situ si fa riferimento ai volumi da trattare
PROFONDITA' DELLA CONTAMINAZIONE DAL PIANO CAMPAGNA	Influisce sulla profondità fino alla quale è necessario caratterizzare il sito. Per i trattamenti ex situ influisce sui costi di escavazione, mentre, nel caso di interventi in situ, può influire sulla profondità dei pozzi
PROFONDITA' ACQUIFERO	Influisce sulla diluizione dei contaminanti nella zona satura
FLUTTUAZIONE DEL LIVELLO DELLA FALDA	E' da tenere in considerazione nei trattamenti in situ di zone sature insature per la scelta della profondità dei pozzi e del tratto filtrante. In presenza di LNAPL, ne influenza la distribuzione alla frangia capillare
GRADIENTE IDRAULICO FALDA	Influisce sulla velocità darciana delle acque sotterranee e quindi sulla distribuzione dei contaminanti e sull'estensione dell'inquinamento

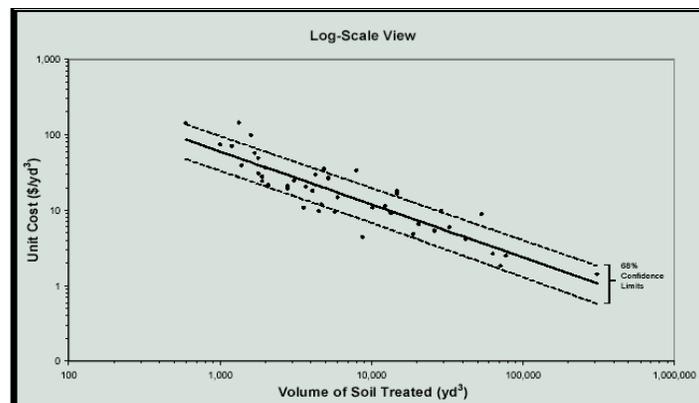
2.1.8 FATTORE DI SCALA DELL'INTERVENTO

La fattibilità tecnica di una tecnologia non è comunque sufficiente ad individuare la tecnologia ottimale per l'eliminazione degli inquinanti che contaminano un sito *a costi sopportabili*.

L'applicazione di una tecnologia di bonifica deve essere valutata anche in funzione della quantità del materiale da trattare: alcune tecnologie possono risultare più convenienti per grandi volumi da trattare (ad esempio lo strippaggio) mentre altre tecnologie (ad esempio l'incenerimento) se applicate a grandi volumi possono diventare proibitive.

Di seguito (Figure 2.2, 2.3, 2.4 pagina seguente) sono riportati dei grafici relativi ad uno studio realizzato dall'EPA nell'anno 2000, relativo ad alcuni degli interventi di bonifica realizzati negli Stati Uniti, in cui sono stati messi in correlazione i costi unitari del trattamento di bonifica con i volumi di suolo trattato³. Per ogni grafico in particolare sono riportati i valori puntuali e l'intervallo di confidenza

Figura 2.2: Costo unitario del trattamento di bioventing negli Stati Uniti in funzione dei volumi di terreno trattato ($1\text{yd}^3=0,76\text{ m}^3$).



³ U.S. Environmental Protection Agency: "Remediation Technology, Cost Compendium year 2000",

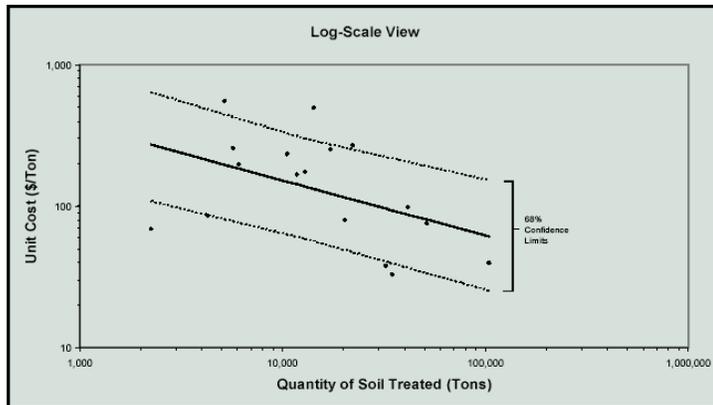
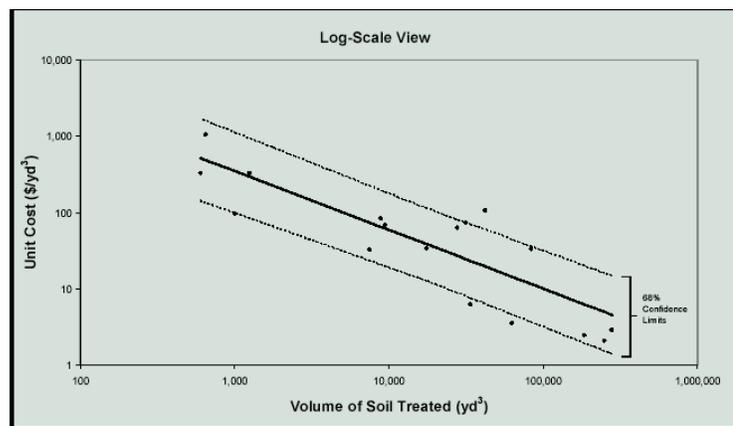


Figura 2.3: Costo unitario del trattamento di desorbimento termico negli Stati Uniti in funzione dei volumi di terreno trattato ($1\text{yd}^3=0,76\text{ m}^3$), in particolare sono riportati i valori puntuali e l'intervallo di confidenza.

Figura 2.4: Costo unitario del trattamento dello strippaggio negli Stati Uniti in funzione dei volumi di terreno trattato ($1\text{yd}^3=0,76\text{ m}^3$), in particolare sono riportati i valori puntuali e l'intervallo di confidenza.



Per la diversità delle condizioni del mercato delle bonifiche tra gli Stati Uniti e il contesto italiano, i costi unitari delle tecnologie possono essere poco significativi, tuttavia dallo studio dell'EPA è emersa, almeno per quanto riguarda il bioventing, il desorbimento termico e sistemi di Pump & Treat, una correlazione di inversa proporzionalità dei costi e la quantità di volume trattato, con importanti economie di scala, riconducibili soprattutto all'incidenza dei costi fissi.

2.1.9 I TEMPI DI INTERVENTO

I risvolti economici ed ambientali della bonifica comportano la necessità di valutare i tempi necessari all'adempimento delle operazioni di bonifica. Infatti, nel definire il valore economico devono essere considerati, oltre ai costi complessivi dell'intervento, anche gli oneri commessi al mancato o parziale utilizzo del sito durante i lavori ed i possibili profitti derivabili dalla bonifica legati alla rivalutazione economica dell'area in seguito al risanamento. I tempi di intervento, se lunghi, possono scoraggiare gli investimenti sull'area, in quanto è difficile prevedere l'evoluzione del mercato nel lungo periodo.

2.1.10 FATTORI DI NATURA POLITICO-SOCIALE LEGATI ALLA DESTINAZIONE D'USO DEL SITO

Per la scelta della migliore tecnologia di bonifica devono essere valutati anche i diversi fattori economico e sociali. L'intervento di bonifica, infatti, deve essere inserito nell'ambito della pianificazione territoriale.

La normativa nazionale prevede, in relazione alla specifica destinazione d'uso diverse concentrazioni soglia di contaminazione nel suolo nel sottosuolo e nelle acque sotterranee, oltre le quali deve realizzata l'analisi di rischio (riportata in Appendice 3), facendo una distinzione tra siti ad uso Verde pubblico privato e residenziale e siti ad uso commerciale e industriale, mentre le aree destinate alla produzione agricola e all'allevamento saranno regolamentate con Decreto del Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio di concerto con i Ministri delle attività produttive della salute e delle politiche agricole e forestali.

L'analisi di rischio costituisce un criterio quantitativo che stabilisce se le concentrazioni riscontrate nel sito siano tollerabili, e nel caso non lo siano di quanto esse vadano ridotte.

L'analisi di rischio, prevede che siano valutati dati analitici (natura, quantità e distribuzione spaziale delle sostanze inquinanti), dati idro-geologici, topologici, metereologici, ma anche dati ecologici e sociali (demografia, ecologia, destinazione d'uso attuale, futura o possibile del sito) per valutare l'effettiva minaccia che il sito pone per la salute dell'uomo e dell'ambiente.

E' evidente che la destinazione d'uso finale del sito influisce sia nella determinazione degli obiettivi di bonifica, ma anche nelle future prospettive di sviluppo dell'area.

Grandi aziende potrebbero, infatti, contribuire economicamente agli interventi di bonifica nel caso abbiano, come contropartita, la possibilità di investire nell'area.

3. I COSTI UNITARI DI TRATTAMENTO NEI DATI DI LETTERATURA

La bonifica dei siti contaminati richiede un programma di gestione a lungo termine con indagini preliminari, monitoraggi, indagini dettagliate sul posto per la caratterizzazione del sito, analisi dei livelli di contaminazione, accertamenti e valutazioni di rischio, selezione delle possibili tecnologie adottabili per la bonifica finalizzate alla redazione del Progetto di Bonifica. In fase progettuale, inoltre, devono essere definiti i costi necessari per la realizzazione dell'opera.

Definire il valore economico di un intervento di bonifica non è semplice, sia per l'elevato numero di fattori che entrano in gioco ma anche per la mancanza di un riferimento a livello nazionale specifico per la valutazione economica (Prezzari Regionali delle Opere Pubbliche, Capitolati d'Appalto...).

L'obiettivo del presente capitolo è quello di proporre una rassegna dei maggiori studi realizzati, in ambito internazionale, europeo e nazionale che forniscono una stima dei costi unitari di bonifica, descrivendone i procedimenti, riportandone i risultati ottenuti ed evidenziandone problematiche e prerogative.

3.1 I COSTI UNITARI DI TRATTAMENTO

I costi unitari di bonifica possono essere ricavati dividendo il costo complessivo della bonifica per il volume di sostanza trattata, o per la quantità di sostanze inquinanti rimosse (ad esempio come Euro/t di terreno trattato o Euro/Kg di contaminante rimosso).

In generale, i costi di un intervento di bonifica si possono suddividere in:

- **costi di investimento** che in genere sono affrontati immediatamente, ad esempio costi per la progettazione dell'intervento, acquisti e installazione degli impianti;
- **costi di esercizio**, che possono essere distribuiti in un certo numero di anni;
- **altre voci di costo**, che comprendono le spese che non rientrano nelle prime due classi.

In Tabella 3.1 (a, b, c) sono elencate alcuni esempi di voci di costo, da affrontate in un intervento di bonifica, che incidono sul costo complessivo e di conseguenza di quello unitario.

Tab. 3.1-a: Costi di investimento in un intervento di bonifica

a. COSTI DI INVESTIMENTO	
ELEMENT DI COSTO	ESEMPI
Trasporto	Include il trasporto delle apparecchiature, e del personale sul sito e viceversa
Progettazione	Include i permessi e le licenze legate all'uso della tecnologia, redazione dei piani di lavoro, campionamento e analisi, piani di sicurezza, e piani di gestione
Preparazione del sito	Include tutti i lavori necessari per preparare il sito alla bonifica (pulizia, dissodamento, estirpazione delle erbacce...)
Apparecchiature e annessi <ul style="list-style-type: none"> ▪ strutture ▪ equipaggiamento 	Include strutture, costruzione o installazione di tutti i componenti della tecnologia di bonifica e i materiali necessari, loro acquisto o noleggio
Test	Attività correlata con la messa in opera della bonifica, in particolare la realizzazione delle condizioni operative, collaudo e formazione del personale
Altro	Costi capitali legati alla specifica tecnologia non indicati precedentemente come l'analisi dei dati, protezioni di sicurezza e mezzi di locomozione

Tab. 3.1-b: Costi di esercizio in un intervento di bonifica

b. COSTI DI ESERCIZIO	
ELEMENTI DI COSTO	ESEMPI
Personale	Costi del personale per le operazioni, la supervisione e spese del libro paga
Materiali	Forniture, materiali per il giusto funzionamento del processo, reagenti chimici
Energia	Fornitura di energia elettrica, carburante, gas, acqua
Analisi e test prestazionali	Monitoraggio, campionamento, analisi per verificare il funzionamento della tecnologia

Tab.3.1- c: Altri costi

c. ALTRI COSTI	
ELEMENTO DI COSTO	ESEMPI
Escavazione	Escavazione del suolo per il trattamento ex situ o per il conferimento in discarica
Trattamento dei materiali di rifiuto	Messa a dimora del materiale, trattamento dei rifiuti secondati prodotti

3.2 STUDIO DI QUANTIFICAZIONE EPA: COSTI UNITARI DI BONIFICA DEI SUOLI

3.2.1 GENERALITA'

La definizione di un costo medio unitario di trattamento per tonnellata di suolo trattato, è riportata nel documento "Application of the phase IV land disposal restrictions to contaminated media: costs, cost savings, and economic impacts", redatto dall'EPA, L'U.S. Environmental Protection Agency, l'Agenzia Statunitense per la Protezione Ambientale (EPA, 1997).

La definizione del costo unitario medio di trattamento del suolo, è stata basata sull'analisi dei singoli costi degli interventi di bonifica già realizzati, nell'ambito di programmi statunitensi di protezione ambientale.

La consistenza dei risultati dello studio è dovuta al fatto che per ogni intervento di bonifica, per la definizione del costo complessivo dell'intervento, sono state considerate tutte le voci di costo descritte nel Paragrafo 3.1, mentre in molte altre stime, disponibili in letteratura non sempre è indicato se i costi per l'escavazione, il trattamento dei materiali di rifiuto, o i costi per la progettazione siano compresi o meno.

I dati, relativi ad ogni singolo intervento di bonifica considerato nello studio, sono stati poi inseriti in un database al fine di una loro elaborazione; in particolare per ogni intervento di bonifica è stata riportata la tecnologia di bonifica utilizzata, la tipologia e la concentrazione dei contaminanti, la volumetria del sito e i costi di trattamento.

Gli obiettivi dello studio, attraverso la realizzazione del database, sono:

- avere una stima dei costi di intervento unitari delle diverse tecnologie, con relativa varianza e range di variabilità;
- avere un archivio di informazioni sulle tecnologie convenzionali che possono essere utilizzate come punto di partenza nella valutazione di nuove tecnologie;
- accrescere l'affidabilità dei dati relativi all'applicazione dei diversi interventi di bonifica per facilitare la comparazione tra le diverse tecnologie e la scelta di quella ottimale.

Nel presente studio un'analisi semplificativa per la stima di un costo unitario di trattamento, è stata realizzata considerando la media aritmetica di tutti i costi unitari di trattamento per singola tecnologia, mentre, successivamente è stata realizzata un'analisi più dettagliata, correlando i costi unitari di bonifica alle caratteristiche del sito, come tipologia di contaminazione e volumetrie trattate.

3.2.2 STIMA DEI COSTI UNITARI

I risultati dello studio dell'EPA, riportati in Tabella 3.2, sono relativi all'esperienza di bonifica di 535 siti localizzati su tutto il territorio degli Stati Uniti e corrispondono a circa 44 milioni di tonnellate di suolo totale trattato.

I costi unitari di trattamento, per tonnellata di suolo trattato, sono stati riportati in Euro, tenendo conto del tasso di cambio del dollaro/lira del 1997 (1703,43 \$/£), anno a cui fanno riferimento i dati, e poi riportati al valore attuale (gennaio 2006) utilizzando coefficienti di adeguamento valutari.

Tab. 3.2: Costi di trattamento unitari per tecnologia di bonifica del suolo (Dati EPA 1997)

METODO TRATTAMENTO	DATO ORIGINE (\$/t)	COSTO/TONNELLATA (€/t)	RIFERIMENTO	COMMENTI
Bioremediation (in situ)	67	70,60	Vendor information System for Innovative Treatment Technologies (VISITT), Office of Solid Waste and Emergency Response, U.S. EPA, 1996: "A database containing innovative treatment costs submitted by developers, manufacturers and suppliers"	Valore costo medio su 31 siti presenti nel database
Bioremediation (ex situ)	76	80,08	VISITT	Valore costo medio su 39 siti presenti nel database
immobilizzazione (in situ)	54	56,90	Regulatory Impact Analysis: Application of Phase IV Land Disposal Restrictions to Newly Identified Mineral Processing Wastes. Office of Solid Waste, U.S. EPA, Gennaio 1998.	
Immobilizzazione (ex situ)	164	172,80	Regulatory Impact Analysis: Application of Phase IV Land Disposal Restrictions to Newly Identified Mineral Processing Wastes. Office of Solid Waste, U.S. EPA, Gennaio 1998	
Incenerimento	1.375	1.448,80	Economic Assessment of the Proposed Hazardous Waste Identification Rule for Contaminated Media	Il 90% del materiale è stato trattato e ridisposto nel sito di origine, mentre il 10% è stato trattato e disposto off site
Incenerimento e immobilizzazione delle ceneri	1.382	1.456,18	Economic Assessment of the Proposed Hazardous Waste Identification Rule for Contaminated Media	Il 90% del materiale è stato trattato e ridisposto nel sito di origine, mentre il 10% è stato trattato e disposto off site
Soil washing	119	125,39	VISITT	Il 90% del materiale è stato trattato e ridisposto nel sito di origine, mentre il 10% è stato trattato e disposto off site
Desorbimento termico	110	115,90	VISITT Contaminated	Valore costo medio su 19 siti presenti nel database Il 90% del materiale è stato trattato e ridisposto nel sito di origine, mentre il 10% è stato trattato e disposto off site
Strippaggio	150	158,05	Economic Assessment of the Proposed Hazardous Waste Identification Rule for Contaminated Media	

3.2.3 ANALISI DEI DATI

Lo studio dell'EPA propone l'analisi dei dati contenuti nel database, sviluppata da esperti nel settore delle bonifiche, finalizzata ad individuare, rispetto alla tipologia di contaminante presente, alla relativa concentrazione e al volume da trattare, la tecnologia ottimale di trattamento, con la stima del relativo costo. Si è cercato, cioè, di determinare uno standard tecnico applicativo che permettesse di individuare nel modo più semplice possibile la tecnologia ottimale di trattamento, per un determinato sito, e di confrontare tra loro l'applicabilità e i costi delle diverse tecnologie possibili.

I costi unitari di trattamento dei suoli sono strettamente dipendenti da numerosi fattori, a molti dei quali è spesso difficile attribuire un peso economico; alla base dell'analisi si sono poste quindi alcune ipotesi semplificative, in particolare si è assunta la dipendenza dei costi di trattamento in funzione della volumetria del sito, ossia il fattore di scala dell'intervento, e della tipologia di contaminazione, mentre sono stati omessi fattori quali l'accessibilità del sito o la destinazione finale del sito, anche se la loro importanza gioca un ruolo fondamentale nella scelta della migliore tecnologia.

Le sostanze inquinanti sono state suddivise in quattro classi in base all'applicabilità tecnica delle diverse tecnologie in:

1. composti organici volatili (VOCs)
2. composti organici semivolatili (SVOCs);
3. composti organici alogenati, pesticidi e erbicidi (AHCs);
4. metalli.

Gli interventi di bonifica sono stati suddivisi in 4 grandi gruppi in base alla grande o piccola volumetria del sito (AV-BV) e dell'alta o bassa concentrazione degli inquinanti presenti (AC-BC).

L'attribuzione "alta" o "bassa" volumetria, tiene conto sia dei quantitativi trattati sia della tipologia di contaminazione e rende possibile il confronto tra tecnologie con diverse economie di scala. Alcune tecnologie, infatti, risultano più economiche se applicate a grande scala, altre, invece se applicate a piccola scala, come ad esempio l'incenerimento (tecnica a cui si fa ricorso nella maggior parte dei casi in cui ci sono contaminazioni non omogenee).

La concentrazione dei contaminanti riscontrata, infine, è stata definita "bassa" se essa non superava più di 100 volte i limiti definiti dalla normativa, "alta" in caso contrario, si deve

però tener conto che negli Stati Uniti le concentrazioni limite ammissibili di concentrazioni e di inquinanti nel suolo sono meno restrittive di quelle italiane.

In Tabella 3.3 sono riportati i risultati dello studio.

Per ogni tipologia di contaminante, o mix di contaminanti (VOCs, SVOCs, AHCs e Metalli), in funzione della relativa concentrazione, (ALTA o BASSA), è riportato un trattamento di bonifica consigliato, quello cioè che, con il minor costo, sia in grado di realizzare maggiori efficienze di rimozione.

Anche in questo caso i costi unitari di trattamento sono stati riportati in Euro, tenendo conto della quotazione del dollaro/lira del 1997, anno a cui fanno riferimento i dati, e poi riportati al valore attuale (gennaio 2006) utilizzando coefficienti di adeguamento valutari.

Tab. 3.3: trattamenti consigliati, e relative stime di costo, per il trattamento di siti contaminati in funzione della tipologia di contaminazione e della volumetria del sito.

TIPOLOGIA INQUINANTE	CONCENTRAZIONE VOLUME	TRATTAMENTO CONSIGLIATO	COSTI (€/t)
VOCs	BC/BV	50% bioremediation in situ, 50% bioremediation ex situ	117
	BC/AV, AC/BV, AC/AV	strippaggio	158
SVOCs	BC/AV, AC/BV, AC/AV	50% bioremediation in situ, 50% bioremediation ex situ	76
	AC/BV	75% incenerimento e 25% desorbimento termico	1.115
AHCs	BC/BV, BC/AV	50% bioremediation in situ, 50% bioremediation ex situ	76
	AC/AV	Soil washing	329
	AC/BV	75% incenerimento e 25% desorbimento termico	1.115
METALLI	BC/BV	Immobilizzazione in situ	57
	BC/AV, AC/BV, AC/AV	Immobilizzazione ex-situ	173
VOCs & SVOCs	BC/BV, BC/AV, AC/AV	50% bioremediation in situ, 50% strippaggio	117
	AC/BV	75% incenerimento e 25% desorbimento termico	1.115
VOCs & AHCs	BC/BV	50% bioremediation in situ, 50% bioremediation ex situ	76
	BC/AV, AC/AV	strippaggio	158
	AC/BV	75% incenerimento e 25% desorbimento termico	1.115
VOCs & METALLI	BC/BV	50% bioremediation & immobilizzazione in situ, 50% bioremediation & immobilizzazione ex situ	191
	BC/AV, AC/BV, AC/AV	Strippaggio e immobilizzazione in situ	215
VOCs, SVOC & METALLI	BC/BV	50% bioremediation & immobilizzazione in situ, 50% bioremediation & immobilizzazione ex situ	191
	BC/AV, AC/AV	Strippaggio e immobilizzazione in situ	215
	AC/BV	75% incenerimento e 25% desorbimento termico	1.121

TIPOLOGIA INQUINANTE	CONCENTRAZIONE/VOLUME	TRATTAMENTO CONSIGLIATO	COSTI (€/t)
VOCs, SVOCs & AHCs	BC/ BV	50% bioremediation in situ, 50% bioremediation ex situ	158
	BC/AV, AC/AV	Strippaggio	158
	AC/BV	Strippaggio e immobilizzazione in situ	1.115
VOCs, AHCs & METALLI	BC/BV	50% bioremediation & immobilizzazione in situ, 50% bioremediation & immobilizzazione ex situ	191
	BC/AV	Strippaggio e immobilizzazione in situ	215
	AC/AV	Soil washing e immobilizzazione ex situ	502
	AC/BV	75% incenerimento & immobilizzazione delle ceneri, 25% desorbimento termico	1.121
VOCs, SVOCs, AHCs & METALLI	BC/BV	50% bioremediation & immobilizzazione in situ, 50% bioremediation & immobilizzazione ex situ	191
	BC/AV	Strippaggio e immobilizzazione in situ	215
	AC/AV	Soil washing e immobilizzazione ex situ	502
	AC/BV	75% incenerimento & immobilizzazione delle ceneri, 25% desorbimento termico	1.121
SVOC & AHCS	BC/BV	50% bioremediation in situ, 50% bioremediation ex situ	76
	BC/AV	Soil washing e bioremediation ex situ	205
	AC/AV	Soil washing	329
	AC/BV	75% incenerimento e 25% desorbimento termico	1.115
SVOC & METALLI	BC/BV, BC/AV	50% bioremediation & immobilizzazione in situ, 50% bioremediation & immobilizzazione ex situ	191
	AC/BV, AC/AV	Soil washing e bioremediation in situ e ex situ	378
SVOCs, AHCs & METALLI	BC/BV	50% bioremediation & immobilizzazione in situ, 50% bioremediation & immobilizzazione ex situ	191
	BC/AV	Soil washing e bioremediation in situ e ex situ	378
	AC/AV	Soil washing e immobilizzazione ex situ	502
	AC/BV	75% incenerimento & immobilizzazione delle ceneri, 25% desorbimento termico	1.121
AHCs & METALLI	BC/AV, AC/AV	Soil washing, e immobilizzazione in situ	191
	AC/BV	75% incenerimento & immobilizzazione delle ceneri, 25% desorbimento termico	1.121
	BC/AV, AC/AV	Soil washing, e immobilizzazione in situ	444

3.3 IL CONTESTO EUROPEO: STIMA COSTI DI BONIFICA CLARINET

3.3.1 GENERALITA'

In generale, i costi riportati da fonti statunitensi non possono essere direttamente applicati al contesto europeo in ragione della diversità delle condizioni dei mercati, quali la scala di applicazione delle tecnologie ed i costi dell'energia.

Tuttavia informazioni relative agli interventi di bonifica nelle singole nazioni europee sono di difficile reperibilità ed i pochi dati disponibili risultano sovente datati e piuttosto frammentari.

In Europa è stato realizzato il CLARINET "Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies", un progetto che ha avuto inizio nel 1998, a cui hanno lavorato dipartimenti universitari, esperti, consulenti, industriali e tecnici, nell'ambito dell'Environment & Climate Programme of the European Commission DG Research, e che ha avuto, come obiettivo, quello di sviluppare raccomandazioni tecniche e linee guide di supporto alla decisione nella bonifica dei siti contaminati.

Il CLARINET, attraverso il gruppo di lavoro "Remediation Technologies", ha rilevato lo stato dell'arte dell'implementazione delle diverse tecnologie di bonifica nei Paesi che hanno partecipato al progetto (i 15 Paesi membri integrati da Islanda, Norvegia e Svizzera).

La raccolta dei dati è stata realizzata somministrando dei questionari ad Enti di ricerca, Enti pubblici, aziende, di tutti quei Paesi Membri che hanno partecipato al progetto, in cui fornire informazioni sul grado di sviluppo delle diverse tecnologie di bonifica e della loro applicazione a scala reale.

Tuttavia, data la modalità di reperimento dei dati, lo studio ha carattere solo indicativo, in quanto potrebbero contenere errori di stima non quantificabili.

3.3.2 RISULTATI OTTENUTI

I risultati del questionario evidenziano la difficoltà di ottenere costi confrontabili tra le diverse tecnologie nei diversi Paesi, inoltre i costi per l'applicazione di una determinata tecnologia variano di diversi ordini di grandezza, in funzione della disponibilità della

tecnologia nel Paese considerato e dalla grandezza del mercato della stessa tecnologia negli altri Paesi.

Ancor prima dell'investigazione, molti autori ritenevano che le tecnologie di trattamento in situ potessero essere più economiche di quelle ex situ, e quindi la loro applicazione in continuo aumento, ma le risposte ai questionari non sempre hanno dimostrato tale affermazione

In particolare è emerso che le tecnologie in situ sono maggiormente applicate solo in progetti dove le tecnologie ex situ non sono applicabili, negli altri casi sono queste ultime ad essere maggiormente applicate.

In Tabella 3.4 sono riportati i costi unitari di trattamento di alcune delle principali tecnologie (CLARINET 2002).

Tab. 3.4: costi unitari di trattamento di alcune tecnologie in Europa (CLARINET, 2002)

TECNOLOGIA DI BONIFICA	COSTO UNTARIO
Impermeabilizzazione	25-50 €/m ²
Escavazione e smaltimento in discarica	80 €/m ³
Bioremediation	60-75 €/t
Vetrificazione	280-560 €/t
Desorbimento termico	80-340 €/t
Strippaggio	65-100 €/m ³
Soil washing	50-60 €/t
Ossidazione chimica in situ	65-130 €/t
Incenerimento	130-1100 €/t

Nello studio effettuato dal CLARINET, nella raccolta dei dati, non sono stati presi in considerazione alcuni aspetti problematici.

In particolare, con riferimento ai trattamenti in situ, non è stato chiarito se la quantità di materiale trattato fosse riferita all'ammontare di materiale decontaminato (superficie dell'area, volume di terreno) o l'ammontare del materiale coinvolto nel trattamento (ad esempio zona di emungimento della falda).

Inoltre non è specificato se siano compresi nei costi di trattamento gli oneri derivanti dalla necessità di trattare flussi gassosi o liquidi durante le operazioni di trattamento.

La comparazione tra i costi presentati in Tabella 3.4 conferma la persistente maggior convenienza della messa in discarica, a fronte di tecnologie di vero e proprio trattamento.

Tale situazione potrà auspicabilmente evolvere in futuro in favore delle altre tecnologie a fronte, da un lato, delle economie di scala connesse alla maggior diffusione dei sistemi di trattamento, e dall'altro per l'incremento dei costi di messa in discarica.

3.4 IL CONTESTO ITALIANO

3.4.1 STIMA DELLA REGIONE PIEMONTE

Se in Europa e in particolare negli Stati Uniti, esistono elementi per descrivere e analizzare l'evoluzione tecnologica nella bonifica dei siti, in Italia la situazione risulta ancora molto complessa.

In Italia mancano studi di settore, elementi e dati, che riportano i costi unitari di trattamento delle diverse tecnologie di bonifica.

Fin'ora la maggiore convenienza della messa in discarica del suolo contaminato a fronte di tecnologie di vero e proprio trattamento ha scoraggiato lo sviluppo di nuove tecnologie e la loro relativa applicazione.

Le uniche indicazioni orientative sui costi, peraltro desunte dall'esperienza statunitense, (riportata nel capitolo 3.2), sono riportate nell'Elenco Prezzi redatto nel 1996 dalla Regione Piemonte⁴, riportate in Tabella 3.5.

Per diversi inquinanti e per diverse tipologie di intervento, sono indicate tre classi di costo: "basso", "medio" e "alto".

Nel caso di terreni:

- l'indicazione "basso" corrisponde ad un costo al di sotto di 83 €/t;
- l'indicazione "medio" corrisponde ad un costo compreso nell'intervallo 83-245 €/t;
- "alto", al di sopra di 245 €/t.

Per i trattamenti delle acque sotterranee:

- l'indicazione "basso" corrisponde ad un costo al di sotto di 586 €/m³;
- l'indicazione "medio" corrisponde ad un costo compreso nell'intervallo 586-1.962 €/m³;
- "alto", al di sopra di 1.962 €/m³.

L'assenza di indicazione può corrispondere sia alla non applicabilità della tecnologia alla classe di inquinanti, sia dalla non disponibilità del dato.

⁴ Regione Piemonte (1996) *Elenco prezzi opere pubbliche per interventi di bonifica di terreni contaminati*. Approvazione con Deliberazione Giunta Regionale n. 35 – 8489 del 6 maggio 1996.

Tab. 3.5: Classe di costo di trattamento (“basso”, B; “medio”, M; “alto” A) con differenti tecnologie (Regione Piemonte, 1996)

CLASSE COMPOSTI	TECNOLOGIE						
	Biorisanamento ex situ	lavaggio	Estrazione con solvente	Desorbimento termico	Bioventing	Estrazione di vapori	Air Sparging
Composti organici volatili alogenati				B		B	B
Composti organici semivolatili alogenati		M	A	M			
Composti organici volatili non alogenati	M-B			B	B	B	B
Composti organici semivolatili non alogenati		M	A	M	B		B
Combustibili	M-B	M		B	B	B	B
Pesticidi				M			
Inorganici		M					

3.4.2 II PREZZIARIO DEL PRONTO INTERVENTO ECOLOGICO

Pubblicato con un inserto sulla rivista Siti Contaminati (VI/2005), il prezziario contiene gli importi minimi relativi all'espletamento delle diverse fasi progettuali definite dalla normativa: piano della caratterizzazione, analisi di rischio, progetto operativo di bonifica, unitamente ai costi della direzione lavori, coordinamento della sicurezza (D. Lgs. 494/96) e della gestione del cantiere.

In Tabella 3.6 sono riportati i costi di progettazione del Piano della caratterizzazione del sito:

Tab. 3.6: Importo lavori fase progettazione Piano della caratterizzazione		
IMPORTO LAVORI CARATTERIZZAZIONE (ILC)	QUOTA FISSA	QUOTA VARIABILE
€ 0-50.000	€ 5.000	20% ILC
€ 50.000-100.000	€ 5.000	15% ILC
€ 100.000-500.000	€ 5.000	10% ILC
€ 500.000-1.000.000	€ 5.000	5% ILC
> € 1.000.000	€ 5.000	3% ILC

La nuova normativa a differenza della precedente (ex. 471/99) prevede la redazione di un unico progetto di bonifica, sostitutivo delle due fasi di Progettazione Preliminare e Definitiva.

I costi di progettazione per il Progetto Operativo, con relativa analisi di rischio, corrispondono alla somma dei costi che si sarebbero sostenuti per la redazione del Progetto Preliminare (riportati in Tabella 3.7), e di quelli che si sarebbero dovuti sostenere per la redazione del Progetto definitivo (Tabella 3.8).

Tab. 3.7: Importo lavori fase progettazione Progetto Preliminare

IMPORTO DELLE INTEGRAZIONI ALL'ATTIVITA' DI CARATTERIZZAZIONE (IAC)	COSTO REDAZIONE PROGETTO PRELIMINARE		COSTO PER ATTIVITA' INTEGRATIVE
	QUOTA FISSA (RF)	QUOTA VARIABILE (RV)	QUOTA VARIABILE (AV)
€ 0-50.000	€ 10.000	20% ILC	20% IAC
€ 50.000-100.000	€ 10.000	15% ILC	15% IAC
€ 100.000-500.000	€ 10.000	10% ILC	10% IAC
€ 500.000-1.000.000	€ 10.000	5% ILC	5% IAC
> € 1.000.000	€ 10.000	3% ILC	3% IAC
IMPORTO PER ANALISI DI RISCHIO	60% (RF+RV+AV)		

Tab. 3.8: Importo lavori fase progettazione Piano Definitivo

IMPORTO LAVORI DI BONIFICA (ILB)	QUOTA FISSA	QUOTA VARIABILE
€ 0-100.000	€ 15.000	5% ILC
€ 100.000-1.000.000	€ 15.000	4% ILC
€ 1.000.000-10.000.000	€ 15.000	2% ILC
> € 10.000.000	€ 15.000	1% ILC

Infine in Tabella 3.9, sono riportate, rispettivamente le voci di costo per il Coordinamento alla sicurezza.

Tab. 3.9: Coordinamento sicurezza D. Lgs. 494/96

IMPORTO LAVORI DI BONIFICA (ILB)	QUOTA FISSA	QUOTA VARIABILE
€ 0-100.000	€ 5.000	10% ILB
€ 100.000-500.000	€ 5.000	6% ILB
€ 500.000-1.000.000	€ 5.000	4% ILB
€ 1.000.000 - 10.000.000	€ 5.000	3% ILB
> 10.000.000	€ 5.000	1% ILB

I prezzi riportati nel Prezziario del Pronto Intervento Ecologico sono validi nel caso in cui il pagamento avvenga per Stadi di Avanzamento dei Lavori (SAL) mensili, con tempi di pagamento non superiori a 60 giorni. Il non rispetto delle tempistiche comporta l'applicazione a tutti i prezzi di un tasso di interesse maggiorato di tre punti percentuali.

3.4.3 IL LINK BONIFICHE ON-LINE DEL SITO DELLA PROVINCIA DI MILANO

Bonifiche on-line è un servizio consultivo messo a disposizione la Provincia di Milano, che, a partire dalla normativa nazionale vigente in materia, rende disponibili, in modo chiaro ed immediato, la normativa, i procedimenti e gli aspetti tecnico operativi in materia di bonifica di siti contaminati

Per molte delle tecnologie di bonifiche è riportata una scheda tecnica (<http://ambiente.provincia.milano.it/bonificheonline/Doc/Tec/TecnicheTrattamento.htm>),

in cui viene definita l'applicabilità e i limiti di ogni singola tecnologia. Inoltre, per molte di esse, sono riportati indicazioni di costo unitarie, che tuttavia fanno riferimento a studi di quantificazione dell'EPA.

3.5 CONSIDERAZIONI SUI DATI DI LETTERATURA

I fatti che influenzano in maniera decisiva il mercato delle bonifiche possono essere individuati nell'andamento del settore edilizio residenziale e industriale e, soprattutto nell'evoluzione legislativa e nello sviluppo delle diverse tecnologie di cui si è discusso nei capitoli precedenti.

Gli interventi di bonifica su un sito contaminato, nella maggior parte dei casi sono costituiti da:

- Escavazione del suolo e smaltimento in discarica, dopo eventuali azioni di solidificazione/stabilizzazione;
- Pump&Treat per la bonifica delle acque sotterranee.

Specie per la bonifica dei suoli, a fianco ai due approcci tradizionali, sopra menzionati, nel corso degli ultimi venti anni sono stati resi possibili approcci innovativi (alcuni dei quali descritti brevemente in Appendice 2) nell'ambito di uno sviluppo tecnologico impetuoso.

Nonostante il progresso conseguito dalle tecnologie di trattamento di suoli e delle acque sotterranee, i costi associati alla necessità di bonificare i siti contaminati sono da considerare elevati in tutti i Paesi del mondo industrializzato⁵.

Per dare una dimensione a questa affermazione può essere evidenziato che, nel 1992, sulla base dell'esperienza acquisita con la realizzazione delle bonifiche sino ad allora realizzate negli USA, è stata stimata la necessità di spendere oltre 1.000 miliardi di dollari, per realizzare solo gli interventi considerati "più urgenti"⁶.

Bisogna considerare inoltre che le risorse finanziarie necessarie per il ripristino di un sito, comprendono, oltre alle operazioni di bonifica vera e propria anche costi necessari alla caratterizzazione e al monitoraggio post-operam.

Per quanto riguarda lo studio EPA:

- I casi di studio dalle quali sono state desunte le stime sono riferite a contesti che, data la vastità del territorio degli Stati Uniti, potrebbero essere diversi tra loro;

⁵ P. Carrera, A. Robertiello: "Soil clean up in Europe: feasibility and costs", 2003;

⁶ <http://www.carcas.it>

- La variabilità della stima del costo unitario associato a ciascuna tecnologia dipende principalmente (e non solo) dalla quantità di suolo trattato e dalla natura dei contaminanti;
- I costi unitari associabili all'impiego delle tecnologie operanti in situ è significativamente più basso;
- I costi unitari associabili all'impiego di tecnologie biologiche sono nettamente inferiori a quelli derivanti dall'uso di approcci chimico-fisici, anche se hanno tempi lunghi di realizzazione, che, di fatto, rendono inutilizzabile il sito per lungo periodo.

Per quanto riguarda il contesto europeo l'utilizzo delle discariche rappresenta la forma di smaltimento dei suoli contaminati più utilizzata.

Dallo studio CLARINET è emersa:

- L'indisponibilità di banche dati di facile accesso o do directory nei quali siano riportate in forma coerente informazioni circa la azioni di bonifica realizzate, e ancora più difficoltosi risulta reperire dati relativi ai costi affrontati per la realizzazione di ogni intervento;
- L'assenza di una legislazione uniforme tra i vari Paesi, ha spinto ogni singola collettività nazionale a adottare provvedimenti basati sull'impiego di tecnologie diverse secondo gli obiettivi di bonifica da raggiungere.

Alla luce di quanto detto, le stime riportate nello studio, frutto di dati ottenuti tramite compilazione di questionari, e non riferiti a specifici casi di bonifica realizzati o in fase di realizzazione, hanno valore puramente indicativo.

4. CASI STUDIO E ANALISI DEI COSTI

Come visto in precedenza le tecnologie di bonifica hanno conquistato spazi di mercato importanti in alcuni paesi occidentali. Mancando in Italia studi di settore analoghi a quello dell'EPA, i cui risultati sono stati descritti e commentati nel capitolo 3, al fine di comprendere lo stato degli interventi di bonifica può essere utile analizzare alcuni interventi di bonifica realizzati o in via di realizzazione sul territorio nazionale.

Per avere un riferimento dei costi di intervento, contingente alla situazione nazionale, ai costi di mercato ed al contesto politico-territoriale in funzione anche delle specifiche normative vigenti, sono stati analizzati, a titolo esemplificativo, alcuni casi di studio.

I costi riportati sono stati tratti da atti di seminari, convegni, siti internet di Enti pubblici. Alcuni di questi dati sono stati reperiti dal database del "Settore valutazioni del danno ambientale" dell'APAT, in cui sono riportati tutti i casi di danno ambientale affrontati nel corso degli anni. Alcuni di essi, in particolare, fanno riferimento al reato di omessa bonifica, con relativa stima dei costi.

Alcuni dei casi di studio fanno riferimento a interventi di bonifica conclusi, altri ad interventi in corso di opera, per i quali è già stato realizzato il progetto di bonifica con la relativa caratterizzazione del sito e stima dei costi.

Nei casi studio riportati, inoltre, si è cercato di evidenziare, unitamente agli aspetti economici, i fattori legati alla specificità del sito, alle caratteristiche della contaminazione, cercando di ricostruire il percorso concettuale che ha portato i tecnici alla scelta della "tecnologia migliore".

4.1 BONIFICA CON BIOPILA IN UN DEPOSITO COSTIERO DI VENEZIA-PORTO MARGHERA⁷

Descrizione del sito

L'area oggetto della bonifica è situata nella zona industriale di Porto Marghera (VE) all'interno del deposito costiero di AgipPetroli, su cui avveniva il carico e lo scarico dei prodotti petroliferi sia per via ferroviaria che via autocisterna.

Piano e risultati del monitoraggio

Le indagini analitiche realizzate su campioni di suolo avevano rivelato:

- una diffusa contaminazione superficiale del terreno di idrocarburi, costituiti esclusivamente da miscele di gasolio e olio combustibile con concentrazioni di BTEX e di IPA trascurabili, con punte di concentrazione di migliaia di ppm;
- contaminazione progressivamente decrescente dagli strati superficiali;
- il suolo è risultato caratterizzato da forti eterogeneità e da una modesta permeabilità.

Definizione del piano di bonifica

La rimozione delle frazioni di suolo risultate contaminate ha portato alla necessità di trattare complessivamente 54.000 t di materiale con una concentrazione media di contaminazione di 2500 ppm

Per la bonifica, realizzata on site, si sono allestite 8 biopile lunghe circa 100 m, larghe 23 m e alte 2 m. La fase operativa della bonifica ha preso avvio nella seconda metà del 1999 e si è conclusa nel 2002, con un costo complessivo di circa 3,6 milioni di euro.

4.2 BONIFICA VIA LANDFARMING DI UN SITO CONTAMINATO DA GASOLIO GENOVA-PEGLI⁸

Descrizione del sito

Il sito, ubicato in una zona destinata ad un uso commerciale, occupa una superficie complessiva di circa un ettaro, ed è stata adibita, dal secondo dopoguerra fino agli inizi degli anni '90 a deposito di benzine e gasoli.

Il sottosuolo è costituito da un terreno limoso e quindi poco permeabile e dalla presenza di una falda a soli 1-2 m di profondità.

⁷ Fonte: EniTecnologie

⁸ Fonte: EniTecnologie

Piano e risultati del monitoraggio

Dal piano di caratterizzazione e monitoraggio è emerso che in totale risultavano contaminate circa 6.500 t di suolo da idrocarburi, la maggior parte costituiti da alcani con un numero di atomi di carbonio superiore a 12, (tipici della frazione meno volatile dei composti movimentati nel deposito), e che la qualità delle acque sotterranee non era influenzata da fenomeni di inquinamento che interessavano il suolo.

Definizione del piano di bonifica

I contaminanti del suolo, pur essendo biodegradabili non potevano essere trattati in situ data la matrice essenzialmente poco permeabile e per la presenza della falda.

Si è deciso di operare con la tecnica del landfarming, sfruttando i fenomeni spontanei di biodegradazione con l'attento controllo dei parametri critici, per il conseguimento della bonifica del sito.

La durata delle operazioni di bonifica è stata di circa 2 anni con un costo poco superiore a 100.000 €.

4.3 BONIFICA VIA BIOSPARGING DI UN SITO CONTAMINATO DA IPA (ITALIANA COKE – AVENZA)⁹

Descrizione del sito

Il sito è costituito da un'area industriale in passato utilizzata per la produzione di coke metallurgico e di gas con un'area complessiva di 36 ettari nel Comune di Avenza (MS), diviso in 12 lotti è stato liberato da tutte le strutture produttive fuori terra nel corso della prima metà degli anni 90, ed è destinato, per 5 dei 12 lotti, alla deindustrializzazione.

Il sottosuolo è costituito da una matrice sostanzialmente sabbiosa e omogenea con una buona permeabilità e dalla falda soggiacente a 2-3 m dal piano campagna, caratterizzata da una modestissima velocità.

Piano e risultati del monitoraggio

Dal piano di campionamento, in cui sono stati analizzati 1240 campioni è stato possibile suddividere il sito in tre sotto-aree:

1. aree di suolo insaturo (a profondità comprese tra il piano campagna e -2 m) risultate contaminate da idrocarburi mono e policiclici con presenza occasionale anche di fenoli e cianuri (AREE A);

⁹ Fonte: EniTecnologie

2. aree interessate superficialmente (dal piano campagna alla profondità di circa 1 m) e a “macchia di leopardo” dalla presenza di ceneri di pirite contenenti arsenico e piombo (AREE B);
3. aree di suolo saturo (comprese tra -3 e -11 m dal piano campagna) risultate contaminate da IPA e BTEX con concentrazioni variabili da 100 – 2.220 ppm (AREE C).

Definizione del piano di bonifica

Dati gli elevati livelli di contaminazione, la natura dei contaminanti, le relativamente modeste quantità di suolo inquinato, la facile accessibilità per la rimozione si è deciso di decorticare e smaltire off site (in discarica) il suolo individuato dalle aree A e dalle aree B, mentre per quanto riguarda la bonifica del suolo inquinato al di sotto del livello della falda, aree C, date le condizioni al contorno (natura e concentrazione dei contaminanti, permeabilità del suolo, immobilità della falda) e prove di fattibilità preliminari, sono stati realizzati impianti di biosparging.

In particolare si è provveduto a bonificare in situ circa 40.000 t di suolo, mentre sono state smaltite in discarica 3.500 t di suolo.

Le attività di bonifica sono iniziate alla fine del 1995 e si sono concluse nel corso dei primi mesi del 1999, con un costo complessivo di circa 2,6 milioni di euro.

4.4 BONIFICA DELL'AREA EX-ACNA NEI COMUNI DI CERIANO LAGHETTO, CESANO MADERNO E BOVISIO MASCIAGO¹⁰

Descrizione del sito

L'ex area ACNA occupa una superficie di oltre 1.200.000 m². L'inizio dell'attività industriale del sito è avvenuta alla fine del 1.800, mentre da parte della Società ACNA nei primi anni '30. L'insediamento era destinato alla produzione e fabbricazione di una vasta gamma di coloranti per tessuti, per la colorazione di benzine e oli minerali, acido solforico e oleum, pigmenti per inchiostri, vernici e materie plastiche ed altri intermedi. Nel dicembre 1983 l'ACNA cessa la propria attività. Ad oggi l'area risulta proprietà delle società Dibra, Basf Italia, Enichem ed altri insediamenti minori.

In figura 4.1 (pagina seguente) è riportato uno schema del sito:

¹⁰ Provincia di Milano, Assessorato all'Ambiente U.O. Interventi Acque suolo e sottosuolo: “Relazione riassuntiva a conclusione degli interventi di bonifica nell'area ex-ACNA di Cesano Maderno, Ceriano Laghetto, Bovisio Masciago e Limbiate”, febbraio 2000

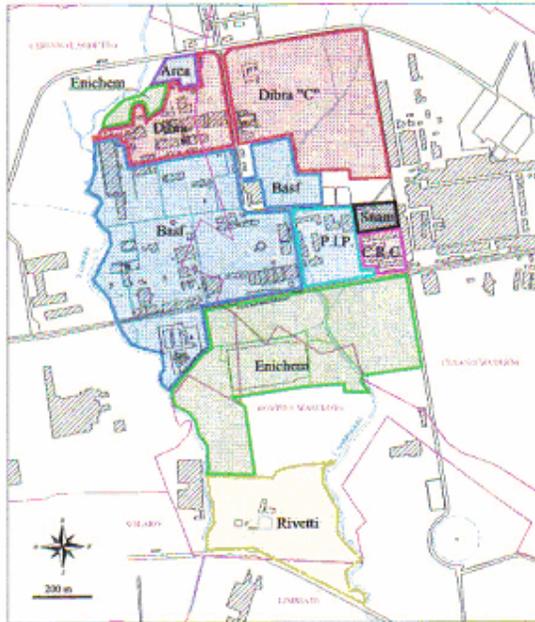


Fig. 4.1: schema del sito area ex ACNA

A seguito di indagini su terreni e falda è emerso il quadro della contaminazione dell'area, in cui sono presenti:

- rifiuti: (da inerti a tossici e nocivi), localizzati in vere e proprie discariche riconosciute, sia variamente collocati sui terreni e negli alvei dei corsi d'acqua;
- Terreni e acque di falda: composti organo alogenati, ammine aromatiche, metalli, idrocarburi aromatici azotati e/o clorurati (con concentrazioni di composti organo alogenati fino a 3.261 µg/l).

Dal punto di vista idrogeologico, l'area appare caratterizzata da una discreta omogeneità strutturale, in quanto i principali acquiferi si rinvencono con periodicità in tutto il settore di indagine.

Definizione del piano di bonifica

Nell'elaborazione del piano di bonifica si è dato avvio prioritario agli interventi di sbarramento idraulico delle falde contaminate per assicurare la realizzazione degli interventi di bonifica dell'area in condizioni di sicurezza.

In particolare lo sbarramento delle falde è avvenuto attraverso la costruzione, in totale, di 11 pozzi di emungimento realizzati in più momenti successivi e continuamente monitorati.

Per quanto riguarda i rifiuti presenti sul suolo, si è proceduto in alcuni casi alla messa in sicurezza permanente e in altri casi all'asportazione degli stessi e allo smaltimento in discarica.

Tra tutti gli interventi conclusi si ha:

- Zona Arca, a nord della Dibra, messa in sicurezza con impermeabilizzazione di fondo superficiale (conclusa a giugno '96);
- Zona Basf, suddivisa in più sottoaree di cui in parte si è proceduto all'escavazione dei terreni e successiva messa a dimora a discarica, o alla messa in sicurezza tramite diaframmatura e impermeabilizzazione. In particolare gli interventi hanno portato allo smaltimento in discarica di oltre 16.000 t di terreno inquinato;
- Zona CRC: l'intervento su un'area di 150 m², è consistito nello scavo dei materiali inquinati, realizzazione dell'impermeabilizzazione di fondo e smaltimento in discarica di 600 m³;
- Zona Dibra, suddivisa in più sottoaree di cui in parte si è proceduto all'escavazione dei terreni e successiva messa a dimora o alla messa in sicurezza permanente tramite diaframmatura e impermeabilizzazione;
- Zona Enichem, a nord della Dibra, si è avuta la messa in sicurezza con impermeabilizzazione superficiale e diaframmi laterali, mentre nella restante parte si è avuto l'incapsulamento dei fanghi e dei terreni ad essi connessi;
- Zona P.I.P, scavo e smaltimento del materiale in discarica;
- Zona Rivetti, messa in sicurezza con impermeabilizzazione.

In totale sono stati impermeabilizzati 36.000 m², e sono stati smaltiti in discarica circa 156.000 m³ di materiale.

Di seguito, in Tabella 4.1, si riportano i costi affrontati fin'ora per la bonifica dell'intera area:

SOGGETTI	EURO
Pubblici	900.000
Privati	76.200.000
TOTALE	77.100.000

4.5 INTERVENTO DI MESSA IN SICUREZZA CON ASPORTAZIONE E SMALTIMENTO DEI RIFIUTI STOCCATI IN AREA “EX-GHIRAF s.p.a.” NEL COMUNE DI ANNICCO¹¹

Descrizione del sito

Il sito è ubicato nel Comune di Annicco (Cr) a breve distanza, in direzione sud-ovest, dal centro abitato in un'area destinata ad attività produttive ed artigianali. Nel sito in esame la società GHIRAF S.p.A. svolgeva attività di recupero dell'alluminio dai rifiuti.

Dopo il fallimento della stessa si trovavano stoccate nel sito, in condizioni di abbandono e degrado, scorie saline e polveri di macinazione delle schiumature di alluminio (per un totale di circa 36.600 t).

Piano e risultati del monitoraggio

I rifiuti presenti erano confezionati in big bags, accatastati sia all'interno del capannone (circa 36.000 t) che all'aperto (5-6.000 t), inoltre alcuni di essi risultavano essere deteriorati, costituendo pericolo per l'ambiente e per la salute pubblica.

Dall'analisi e dalla caratterizzazione del sito è stata evidenziata, infatti, la diffusione dell'alluminio e del cloruro di sodio nel suolo circostante.

Definizione del piano di bonifica

L'intervento era stato articolato in due distinte fasi:

- La messa in sicurezza propriamente detta del sito, che in questo caso è consistita nella rimozione e smaltimento dei rifiuti speciali pericolosi attraverso tecnologie idonee e conformi alla normativa vigente;
- L'eventuale bonifica del suolo, preceduta dai necessari accertamenti sullo stato dei terreni sotto i cumuli, e della falda, che non stata attuata (analisi effettuate dopo gli interventi di messa in sicurezza non hanno rilevato alcuna contaminazione del suolo e della falda).

I costi complessivi di intervento (che comprendono la caratterizzazione, la progettazione e il monitoraggio) ammontano a circa 8.150.000 €.

¹¹ Fonte: database APAT

TABELLA RIASSUNTIVA COSTI UNITARI INTERVENTI DI BONIFICA CONCLUSI

PARAGRAFO DI RIFERIMENTO	DESCRIZIONE SITO	FONTE	TECNOLOGIA DI BONIFICA	DURATA IN INTERVENTO	QUANTITA' SUOLO TRATTATO	CARATTERISTICHE INQUINANTE PRINCIPALE	CONCENTRAZIONE	CARATTERISTICHE SUOLO	COSTO TOTALE (€)	COSTO UNITARIO (€/t)
4.1	Deposito costiero Porto Marghera (VE)	ENI TECNOLOGIE	biopile	42 mesi	54.000 t	Miscele di gasolio e olio combustibile, assenza di componenti tossiche o volatili	2500 ppm	Forte eterogeneità e modesta permeabilità	3.600.000	66,78
4.2	Deposito costiero Genova-Pegli	ENI TECNOLOGIE	landfarming	23 mesi	6.500 t	idrocarburi	1200 ppm	Terreno limoso a bassa permeabilità	100.000	15,38
4.3	Italiana Coke, Avenza (MS)	ENI TECNOLOGIE	Biosparging + messa in discarica	45 mesi	43.500 t	IPA, BTEX	100 – 2.200 ppm	Matrice sabbiosa e omogenea con buona permeabilità	2.600.000	59,77
4.4	Area ex ACNA	Provincia di Milano	Barriera falda, messa in sicurezza, smaltimento in discarica	Ancora in corso	1.200.000 m ³	Composti organo alogenati, metalli, idrocarburi aromatici	Fino a 3.261 µg/l per la contaminazione della falda	Discreta omogeneità strutturale idrogeologica	77.100.000	64,26 ¹²
4.5	Comune di Annico (Cr)	APAT	Allontanamento e messa a dimora rifiuti	-	36.600 t	Scorie saline e polveri di alluminio	-	-	8.150.000	222,88

¹² Data l'impossibilità di separare i costi per la messa in sicurezza da quelli per lo smaltimento del materiale in discarica si è definito il costo unitario complessivo per metro quadrato di terreno contaminato.

5. CONCLUSIONI

Lo studio ha permesso di ottenere, attraverso la ricerca e l'analisi dei dati di letteratura, i seppur indicativamente dei riferimenti utili per la quantificazione dei costi unitari di bonifica dei suoli, nell'attesa che venga elaborato un prezzario nazionale.

Sulla base dei dati raccolti è emerso che, per quanto riguarda il suolo l'intervento di bonifica più comunemente applicato è lo smaltimento in discarica.

Le altre forme di bonifica, ambientalmente più sostenibili, riguardano in genere interventi su siti di piccole dimensioni, in quanto la non prevedibilità dei tempi e dei risultati molto spesso scoraggia le applicazioni a grande scala.

Emerge quindi la necessità di superare queste problematiche, in particolare attraverso il potenziamento della ricerca in questo settore. Solo in questo modo possono essere individuate le relazioni che correlano i costi di bonifica con i fattori sito-specifici e le caratteristiche della contaminazione.

6. BIBLIOGRAFIA

Riferimenti normativi:

- *Repubblica Italiana, Decreto Legislativo del 3 aprile 2006 n. 152 di attuazione della Legge Delega n. 308/04, conferita al Governo per il “riordino, il coordinamento, e l’integrazione della legislazione in materia ambientale” pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 88 del 14 aprile 2006;*
- *Repubblica Italiana, Decreto Ministeriale 25 ottobre 1999, n. 471: "Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi dell'art. 17 del D.lg. 5 febbraio 1997, n.22 e successive modificazioni e integrazioni", G.U. 15 dicembre 1999, n.293. S.O.;*
- *Repubblica Italiana, Decreto Legislativo 5 febbraio 1997, n. 22, "Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio", G.U. 15 febbraio 1997, n. 38, s.;*
- *Regione Piemonte (1996) Elenco prezzi opere pubbliche per interventi di bonifica di terreni contaminati. Approvazione con Deliberazione Giunta Regionale n. 35 – 8489 del 6 maggio 1996.*

Testi e articoli:

- *Musmeci L., "Il nuovo Regolamento sulla bonifica dei siti inquinati, di cui al Decreto Ministeriale 471/99. Aspetti tecnici", Atti del 51° Corso di Aggiornamento in Ingegneria Sanitaria-Ambientale, Ed. Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento - Sezione Ambientale - Politecnico di Milano, 2000;*
- *Convegni e Seminari: "La bonifica dei siti inquinati", a cura del Comitato scientifico SEP Pollution 2000, PADOVA FIERE, marzo 2000;*
- *ENITECNOLOGIE, ENI CORPORATE UNIVERSITY: "La bonifica biologica di siti inquinati da idrocarburi", HOEPLI 200;*
- *Atti del corso "Esperto nella Gestione di Siti Contaminati", Roma 3-6 maggio 2005, a cura di Studio Aglietto s.r.l.;*
- *Consulting la rivista del consulente di azienda, anno 4 n. 1 gennaio-febbraio 2006;*
- *U.S. Environmental Protection Agency: "Application of the phase IV land disposal restrictions to contaminated media: costs, cost savings, and economic impacts";*
- *U.S. Environmental Protection Agency: "Remediation Technology, Cost Compendium year 2000";*

- *U.S. Environmental Protection Agency: “Clean Up The Nation’s Waste Sites: Technology trends”, 1996;*
- *U.S. Environmental Protection Agency: “Abstracts of Remediation Case Studies”, settembre 1998, EPA 542-R-98-010;*
- *ANPA, Centro Tematico Nazionale Suolo e Siti Contaminati (CTN-SSC), ARPA: “Atti del seminario nazionale: il contributo del Centro Tematico Nazionale Suolo e Siti Contaminati alla conoscenza del suolo, ottobre 2000;*
- *NATO/CCMS Pilot study: “Evaluation of Demonstrated and Emerging Technologies for the Treatment of Contaminated Land and Goundwater: decision support tools”, anno 2000;*
- *European Commission, Directorate-General JRC Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies: “Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on Best Available Technique for the Waste Treatments industries”, agosto 2005;*
- *Confindustria Seminario Informativo: “Il nuovo Codice Ambientale, cosa cambia per le imprese”, aprile 2006;*
- *Provincia di Milano, Assessorato all’Ambiente U.O. Interventi Acque suolo e sottosuolo: “Relazione riassuntiva a conclusione degli interventi di bonifica nell’area ex-ACNA di Cesano Maderno, Ceriano Laghetto, Bovisio Masciago e Limbiate”, febbraio 2000;*
- *Provincia di Milano, Assessorato all’Ambiente U.O. Interventi Acque suolo e sottosuolo: “Esempio di intervento di disinquinamento di aree industriali sotto il controllo dell’Ente Pubblico”, ottobre 1997;*
- *Luca Bonomo, Sabrina Saponaro: “Migliori tecnologie a costi sopportabili: aspetti tecnici”, Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Idraulica Ambientale e del Rilevamento - Sez. Ambientale, 2002;*
- *CLARINET (2000) Remediation of Contaminated Land Technology Implementation in Europe: A State of the Art of CLARINET WG 7. 8th Draft Document, December2000;*
- *Panno Andrea, Giangrasso Marco, Tassoni Emilio, Leoni Stefano, Perrella Egidio (2001) Il mercato italiano delle bonifiche. Atti del Convegno "Bonificare in Italia", Roma, 4 luglio 2001;*

siti internet visitati:

- [http://ambiente.provincia.milano.it/bonificheonline/;](http://ambiente.provincia.milano.it/bonificheonline/)
- www.siticontaminati.it;



Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici

- www.apat.gov.it/site/it;

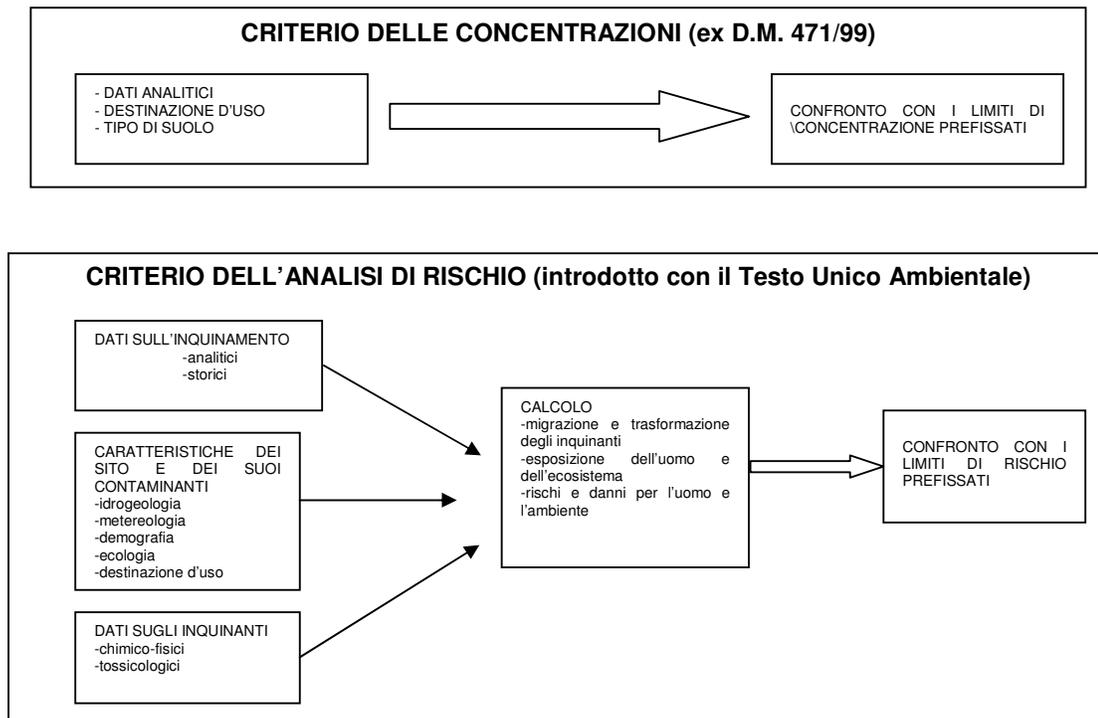
APPENDICE 1: L'analisi di rischio

L'analisi di rischio, per un sito contaminato, si propone di:

- valutare l'effettiva minaccia che il sito pone per la salute dell'uomo e dell'ambiente, tenendo conto delle caratteristiche specifiche del sito, dei suoi dintorni e dello scenario previsto per il suo uso;
- stabilire, nel caso in cui abbia mostrato l'esistenza di condizioni di contaminazione non tollerabili, quali siano gli obiettivi di risanamento che riportino il rischio entro limiti accettabili.

I criteri basati per l'analisi di rischio differiscono da quelli basati sulle concentrazioni limite di tipo tabellare (ex D.M. 471/99), e consistono nell'individuare le situazioni effettivamente più pericolose per l'uomo e concentrare su di esse gli sforzi e le risorse disponibili per il risanamento.

In figura seguente è mostrato schematicamente un raffronto tra i due diversi metodi, di cui il secondo è stato introdotto dalla normativa in materia ambientale, nota come Testo Unico.



L'analisi di rischio si svolge idealmente attraverso diverse fasi, di seguito elencate.

- La raccolta dei dati sul sito e sulle sue vicinanze (dati analitici, quantità e distribuzione spaziale delle sostanze inquinanti), dati idro-geologici, topologici, meteorologici, dati umani e ambientali (demografia, ecologia, destinazione d'uso finale, futura o possibile). I dati preliminari permettono la costruzione del "modello concettuale" del sito, che identifica i

contaminanti e i cammini di esposizione potenzialmente pericolosi e indirizza il proseguimento delle indagini.

- L'elaborazione modellistica dei dati, che può a sua volta essere divisa in due parti: la definizione del "fato" degli inquinanti, cioè dell'andamento spaziale e temporale delle loro concentrazioni e, sulla base di questo, il calcolo della prevedibile esposizione ad essi delle specie viventi, umane e non. In questa fase è necessario ricorrere a modelli che descrivono sia le migrazioni e trasformazioni delle specie inquinanti sia le vie con cui esse possono giungere in contatto ed essere assorbite dai componenti sensibili dell'ambiente. Questi modelli, tuttavia, spesso sono complicati e richiedono dati di input non sempre facilmente disponibili.
- Il calcolo del rischio cui la salute dell'uomo e dell'ambiente è sottoposta a causa dell'esistenza del sito inquinato, che si realizza applicando, alle esposizioni calcolate, i fattori tossicologici relative alle varie sostanze pericolose presenti. Le sostanze cancerogene si distinguono da quelle che non lo sono per il tipo di rischio (probabilistico anziché di soglia), che impone normalmente una maggiore severità dei limiti.
- Il confronto dei dati ottenuti con i limiti di rischio previsti dalla normativa¹³, contribuisce a decidere le azioni da compiere sul sito: dichiarare il sito non pericoloso, oppure fare altre indagini, risanare (e fino a che punto), isolare il sito, limitarne l'uso temporaneamente o per sempre, e così via.

Per il calcolo dell'esposizione degli inquinanti, sono usati modelli di comportamento di varie tipologie di persone che hanno probabilità di venire a contatto con gli inquinanti; a seconda del tipo di sito può trattarsi di residenti adulti o bambini, lavoratori al chiuso o all'aperto (e in particolare quelli addetti all'edilizia, che movimentano terra). In questi modelli si quantifica per esempio quante ore la persona passa sul sito all'aperto, quante al chiuso, quanta acqua beve, quanta aria respira in un giorno.

Il rischio "accettabile" per la salute umana è definito quantitativamente in vari modi.

Per le sostanze non cancerogene, si assume che l'effetto sulla salute sia "a soglia": al di sotto di certe dosi, il possibile danno diventa rapidamente nullo. Da questo valore di soglia, misurato o stimato, si ricava per ogni contaminante, con fattori di sicurezza che tengono conto anche dell'affidabilità dei dati, qual è la dose giornaliera (per unità di peso corporeo) che, assunta per sempre, "certamente" non causerà danno.

Per gli agenti cancerogeni, invece, non c'è un valore di soglia a cui riferirsi: riassume che la probabilità che essi causino un tumore rimanga sempre proporzionale, per piccole quantità,

¹³ Il Testo Unico Ambientale propone 1×10^{-5} come valore di rischio incrementale accettabile nel corso della vita come obiettivo di bonifica nei riguardi delle sostanze cancerogene, mentre per le sostanze non cancerogene si propone il criterio universalmente accettato del non superamento della dose tollerabile o accettabile (ADI o TDI) definita per la sostanza.

alla dose assunta. Le procedure di valutazione forniscono la probabilità che una persona, rimanga a lungo a contatto con il sito e contragga un cancro per colpa del contaminante in esame. La normativa italiana assume 10^{-5} come valore di rischio “tollerabile” per queste sostanze, cioè una possibilità su 100.000, che “assume”completamente il sito.

APPENDICE 2: Tecnologie di bonifica

Sono descritte di seguito alcune delle tecnologie più utilizzate nel trattamento dei siti contaminati.

- **Aspirazione di vapori dal suolo (Soil Vapor Extraction) e Air Sparging:** sono sistemi trattamento in situ, ovvero senza asportazione di terreno inquinato, che si basa su un principio fisico di separazione della frazione volatile degli inquinanti dalle frazioni solide del suolo mediante l'aspirazione eseguita attraverso pozzetti ed aspiratori. Lo SVE si applica quindi su inquinamento di tipo organico con forte presenza di sostanze volatili o semivolatili (benzine, prodotti raffinati dal petrolio, alcuni clorurati) che dopo essere state aspirate sono trattate mediante sistemi a combustione termica o catalitica. Quando il sistema di aspirazione è accoppiato ad un sistema che "inietta" aria nel sottosuolo (Air Sparging), si aumenta il tasso di rimozione degli inquinanti e, iniettando aria al di sotto della tavola d'acqua della falda sotterranea, si recuperano anche gli inquinanti presenti nelle acque sotterranee. Tale iniezione causa un arricchimento di ossigeno nel sottosuolo, che stimola ed incrementa l'azione di microrganismi presenti, in grado di degradare biologicamente gli inquinanti organici, con ulteriore beneficio per l'efficacia della bonifica.
- **Soil flushing/Bioflushing:** il metodo (in situ) consente l'estrazione degli inquinanti dal terreno dopo averli trasferiti nella fase liquida. Il fluido di lavaggio è in genere costituito da acqua arricchita con reagenti chimici opportunamente scelti, che sono in grado, per contatto con i terreni inquinati, di dissolvere o disperdere l'inquinante nel liquido stesso, che è quindi recuperato mediante idonei sistemi di estrazione. L'acqua estratta carica di inquinanti, è opportunamente trattata con impianti mobili. Questa tecnica ottiene buoni risultati in terreni inquinati sia da composti organici sia da metalli, anche con concentrazioni piuttosto rilevanti, inoltre possono essere applicati congiuntamente a metodi biologici, nel qual caso si parla di Bioflushing. Fra tutti i metodi è, però quello che ha costo di applicazione più elevato, a causa della complessità degli impianti necessari e del sistema di monitoraggio e controllo.
- **Pump&Treat:** tale termine si riferisce alla bonifica di acque sotterranee inquinate mediante estrazione con pozzi allineati o disposti su linee sfalsate. I pozzi permettono di estrarre acque contaminate per convogliarle agli impianti di trattamento senza diffusione degli inquinanti.

- **Desorbimento Termico:** tale sistema produce il riscaldamento del terreno inquinato fino a temperature sufficienti a vaporizzare i composti organici volatili e semivolatili, che poi sono trattati con ossidanti, filtri o condensatori. Si possono distinguere due sistemi principali basati sulla temperatura, alta e bassa. Nel primo caso si va dai 90°C ai 320°C e la percentuale di abbattimento di idrocarburi petroliferi raggiunge anche il 95%. I sistemi di trattamento termico hanno come vantaggi principali di poter essere applicati mediante unità mobili di rapida installazione e con tempi di applicazione non eccessivamente rilevanti, nonché la possibilità di applicazione a terreni anche altamente inquinati da inquinanti di vario genere. Come svantaggi principali hanno in genere la necessità di un pretrattamento fisico dei terreni e un accurato monitoraggio in corso d'opera.
- **Landfarming e Biopile:** il landfarming è un trattamento biologico che utilizza l'azione degradativa di microrganismi per abbattere le concentrazioni di inquinanti. Consiste nello stendere un terreno contaminato sopra un letto sabbioso, sistemando un manto impermeabile al fondo dello stesso per proteggere il sottosuolo. Questo terreno così disposto è periodicamente dissodato per garantire un'efficace miscelazione fra i microrganismi naturalmente presenti, o eventualmente inoculati, l'ossigeno, i nutrienti e le sostanze contaminate (idrocarburi e altre sostanze organiche). Paragonato alle altre tecnologie, il landfarming è un trattamento relativamente semplice da installare e da mantenere, ma poiché è strettamente dipendente dalle condizioni climatiche (quasi tutti i processi, infatti, si bloccano sotto ai 10°C) è difficile stabilirne precisamente i tempi di realizzazione. Le biopile sono anch'esse una tecnica di trattamento biologico dei terreni contaminati e consistono nella stesa di strati successivi di terreno inquinati sopra un telo impermeabile di base e la loro successiva copertura con un altro telo, impermeabile o semi-impermeabile. Tra uno strato e l'altro è interposto un sistema di tubi forati con il quale far circolare all'interno della pila i fluidi di degradazione. Tali fluidi possono essere costituiti da ossigeno o miscele degradative con acqua e nutrienti, che incrementano la capacità dei microrganismi presenti di abbattere le concentrazioni degli inquinanti presenti. Tale sistema può essere applicato a terreni contaminati anche con elevate concentrazioni di sostanze organiche (in genere idrocarburi) ed ha un tempo di applicazione piuttosto breve.
- **Soil Washing:** i sistemi di lavaggio ex situ dei terreni inquinati prevedono l'utilizzo di impianto mobili o semi-mobili nei quali i terreni inquinati scavati sono messi in contatto con miscele di estrazione che rimuovono gli inquinanti. Tale sistema è applicabile ad una vasta gamma di sostanze inquinanti, come metalli pesanti e contaminanti organici di varia origine. Per l'applicazione di tale sistema si opera una selezione preliminare dei materiali

scavati separando i terreni a granulometria fine (< 2 mm), in cui sono concentrate il 90% delle sostanze inquinanti, dai terreni grossolani. Come fattori limitanti al sistema si possono considerare la complessità di alcune miscele di lavaggio e la necessità di trattare il fluido acquoso residuo.

Tra le tecnologie emergenti si ha:

- **Phytoremediation:** per i suoli sta acquisendo un ruolo sempre più importante l'utilizzo diretto di vegetali per il trattamento di terreni, fanghi, sedimenti e acque inquinate. La coltivazione, e talora il raccolto di piante in un sito inquinato è una tecnica di bonifica esteticamente qualificante, di tipo passivo e con supporto energetico solare, che può essere adottata per inquinamenti superficiali di livello basso o moderato. Con tale sistema possono essere trattati inquinanti come metalli, pesticidi, solventi, greggio ed anche policiclici aromatici. Alcune tipologie di piante possono degradare, o metabolizzare gli inquinanti di tipo organico, mentre altre possono contenere e stabilizzare i metalli agendo come filtri o trappole. Il vantaggio di tale applicazione è la possibilità di poter controllare completamente il circuito di irrigazione, recupero e rilancio delle acque in assoluta sicurezza, ma si ha come contropartita la necessità di disporre di vaste aree.
- **Barriere Permeabili Reattive:** il sistema consiste nella realizzazione di barriere permeabili permanenti, semi-permanenti o mobili, trasversalmente al flusso di inquinanti che si sposta nel sottosuolo attraverso le acque sotterranee. I contaminanti sono rimossi attraverso la barriera, mediante processi di tipo biologico, fisico e chimico. Le barriere, infatti, possono contenere dei catalizzatori a base metallica, agenti chimici, nutrienti e ossigeno... Tale sistema ha ottima efficacia con inquinanti di tipo organico (BTEX, Organoalogenati, ecc.) e con diversi metalli, e sono attualmente in fase di primissima applicazione anche impianti per il trattamento dei PCB. Le barriere permeabili hanno diversi vantaggi rispetto ai sistemi convenzionali d'estrazione e trattamento di fluidi.

APPENDICE 3: Concentrazioni soglia di inquinanti nel suolo¹⁴

Concentrazioni soglia di contaminazione del suolo riferiti alla specifica destinazione d'uso dei siti da bonificare.

		SITI AD USO VERDE PUBBLICO E PRIVATO RESIDENZIALE (mg/kg espressi come suolo ss)	SITI AD USO COMMERCIALE E INDUSTRIALE (mg/kg espressi come suolo ss)
COMPOSTI INORGANICI			
1	Antimonio	10	30
2	Arsenico	20	50
3	Berillio	2	10
4	Cadmio	2	15
5	Cobalto	20	250
6	Cromo totale	150	800
7	Cromo esavalente	2	15
8	Mercurio	1	5
9	Nichel	120	500
10	Piombo	100	1.000
11	Rame	120	600
12	Selenio	3	15
13	Stagno	1	350
14	Tallio	1	10
15	Vanadio	90	250
16	Zinco	150	1.500
17	Cianuri (liberi)	1	100
18	Fluoruri	100	2.00'
AROMATICI			
19	Benzene	0,1	2
20	Etilbenzene	0,5	50
21	Stirene	0,5	50
22	Toluene	0,5	50
23	Xilene	0,5	50
24	Sommatoria organici (da 20 a 23)	1	100
AROMATICI POLICICLICI¹⁵			
25	Benzo(a)antracene	0,5	10
26	Benzo(a)pirene	0,1	10
27	Benzo(b)fluorantene	0,5	10
28	Benzo(k)fluorantene	0,5	10
29	Benzo(g,h,i)perilene	0,1	10
30	Crisene	5	50
31	Dibenzo(a)pirene	0,1	10
32	Dibenzo(a,h)antracene	0,1	10
33	Indenopirene	0,1	5
34	Pirene	5	50
35	Sommatoria ppoliciclici aromatici (da 25 a 34)	10	100
ALIFATICI CLORURATI CANCEROGENI			
36	Clorometano	0,1	5
37	Diclorometano	0,1	5
38	Triclorometano	0,1	5
39	Cloruro di vinile	0,01	0,1
40	1,2-dicloroetano	0,2	5
41	1,1-dicloroetilene	0,1	1
42	1,2-dicloropropano	0,3	5
43	1,1,2-tricloroetano	0,5	15
44	Tricloroetilene	1	10
45	1,2,3-tricloropropano	0,1	1
46	1,1,2,2-tetracloroetano	0,5	10
47	Tetracloroetilene (PCE)	0,5	20
ALIFATICI NON CANCEROGENI			
48	1,1-dicloroetano	0,5	30
49	1,2-dicloroetilene	0,3	15
50	1,1,1-tricloroetano	0,5	50

¹⁴ Allegato 5 al Titolo V del D. Lgs. 152/2006;

¹⁵ Nella tabella sono selezionate, per ogni categoria chimica, alcune sostanze frequentemente rilevate nei siti contaminati. Per le sostanze non esplicitamente indicate in tabella i valori di concentrazione di soglia sono ricavati adottando quelli indicati per la sostanza tossicologicamente più affine.

	ALIFATICI ALOGENATI CANCEROGENI		
51	Tribromometano (bromoformio)	0,5	10
52	1,2-dibromoetano	0,01	0,1
53	dibromoclorometano	0,5	10
54	bromodichlorometano	0,5	10
	NITROBENZENI		
55	Nitrobenzene	0,5	30
56	1,2-dinitrobenzene	0,1	25
57	1,3-dinitrobenzene	0,1	25
58	Cloronitrobenzeni	0,1	10
	CLOROBENZENI		
59	Monoclorobenzene	0,5	50
60	Diclorobenzeni non cancerogeni	1	50
61	Diclorobenzeni cancerogeni	0,1	10
62	1,2,4-triclorobenzene	1	50
63	1,2,4,5-tetraclorobenzene	1	25
64	pentaclorobenzene	0,1	50
65	Esaclorobenzene	0,05	5
	FENOLI NON CLORURATI		
66	metilfenolo	0,1	25
67	fenolo	1	60
	FENOLI CLORURATI		
68	2-clorofenolo	0,5	25
69	2,4-diclorofenolo	0,5	50
70	2,4,6-triclorofenolo	0,01	5
71	Pentaclorofenolo	0,01	5
	AMMINE AROMATICHE		
72	Anilina	0,05	5
73	o-anisidina	0,1	10
74	m,p-anisidina	0,1	10
75	difenilamina	0,1	10
76	p-toluina	0,1	5
77	Sommatoria ammine aromatiche (da 72 a 76)	0,5	26
	FITOFARMACI		
78	Alaclor	0,01	1
79	Aldrin	0,01	0,1
80	Atrazina	0,01	1
81	α-esacloroesano	0,01	0,1
82	B-esacloroesano	0,01	0,5
83	γ-esacloroesano	0,01	0,5
84	Clordano	0,01	0,1
85	DDD, DDT, DDE	0,01	0,1
86	Dieldrin	0,01	0,1
87	Endrin	0,01	2
	DIOSSINE E FURANI		
88	Sommatoria PCDD, PCDF, con conversione tossicità equivalente	1x10 ⁻⁵	1x10 ⁻⁶
89	PCB	0,001	5
	IDROCARBURI		
90	Idrocarburi leggeri (C<12)	10	250
91	Idrocarburi pesanti (C>12)	50	750
	ALTRE SOSTANZE		
92	Amianto (fibre libere)	1.000 ¹⁶	1.000
93	Esteri dell'acido ftalico (ognuno)	10	60

¹⁶ Corrisponde al limite di rilevabilità tecnica analitica (diffrazione a raggi X oppure I.R.-Trasformata di Fourier)