

La bonifica sostenibile dei siti contaminati: gli ingegneri ambientali e la sfida della complessità

di *Angela Antonucci*

Fisico e Ingegnere Ambientale

angela.antonucci@uniroma1.it

Sommario

Il lungo percorso che ha reso evidente e condivisa la necessità di preservare l'ambiente e le risorse naturali, ha messo in luce le conseguenze di uno sfruttamento incontrollato, inconsapevole e a volte criminale del territorio e reso indispensabile la bonifica dei siti contaminati.

La “*green remediation*” introduce il concetto di sostenibilità della bonifica definita come “Il processo di gestione e bonifica di un sito contaminato, finalizzato ad identificare la migliore soluzione, che massimizzi i benefici della sua esecuzione dal punto di vista ambientale, economico e sociale, tramite un processo decisionale condiviso con i portatori di interesse”. In quest’ambito è centrale il ruolo dell’ingegnere ambientale che progetta e conduce la bonifica e deve essere in grado di analizzare e tenere in considerazione tutti gli aspetti del processo, adottando soluzioni rispettose dell’ambiente in un’ottica di lungo periodo che tenga in considerazione le necessità delle generazioni future.

Parole chiave

Bonifica, Sito contaminato, Bonifica Sostenibile, Ingegnere Ambientale

Summary

The long road that has made it clear and shared the need to preserve the environment and natural resources has highlighted the consequences of uncontrolled exploitation, unconscious and sometimes criminal in the territory and the need to clean up the contaminated sites.

"Green remediation" introduces the concept sustainability in remediation defined as "the process of managing and clean up a contaminated site, aimed at identifying the best solution, maximizing the benefits of its execution from an environmental, economic and social point of view, through a shared decision-making process with stakeholders". In this context, the environmental engineer's position, which designs and carries out the remediation, is central. He must be able to analyze and consider all aspects of the process by adopting eco-friendly solutions in a long-term perspective considering future generation needs.

Keywords

Remediation, Contaminated Site, Sustainable Remediation, Environmental Engineer

Le origini del problema

Il problema della bonifica dei siti contaminati è relativamente nuovo nel panorama delle questioni che accompagnano lo sviluppo tecnologico della società moderna ed è strettamente legato all'uso e al successivo smaltimento, inconsapevole o volutamente criminale, di sostanze dannose e processi produttivi nocivi per l'uomo e l'ambiente. Solo pochi anni fa, ad esempio, l'utilizzo dei pesticidi in agricoltura era salutato come la vittoria definitiva sui parassiti che distruggevano i raccolti e causavano carestie.

La scoperta delle proprietà insetticide del DDT valse a Muller, loro scopritore, il premio Nobel nel 1948. Le campagne pubblicitarie che accompagnavano la commercializzazione del prodotto sostenevano che fosse innocuo per gli uomini e la stessa comunità scientifica non s'interrogava sulle conseguenze dell'utilizzo di un composto chimico rivelatosi successivamente pericoloso.

Con la pubblicazione nel 1962 del libro "Silent Spring" da parte di Rachel Carson, per la prima volta venivano messe in evidenza le caratteristiche nocive dei pesticidi e le conseguenze disastrose e spesso irreversibili che stavano provocando.

Lo studio, sviluppatosi da questo punto in poi, sugli effetti che l'utilizzo di prodotti e processi produttivi può avere sull'uomo e l'ambiente, ha inevitabilmente comportato anche un'analisi critica dei modelli economici e sociali della società moderna. In quest'ambito, si possono ricordare gli studi di B.Commoner ("The Closing Circle", 1971), J. Lovelock ("Gaia. A New Look at Life on Earth", 1979), J. Rifkin ("Entropy: Into the Greenhouse World", 1989).

La comunità internazionale ha iniziato a mettere a fuoco il problema con una certa lentezza; la pubblicazione nel 1987 del rapporto "Our Common Future" da parte della Commissione Brundtland ha introdotto il concetto di "Sviluppo Sostenibile" basato sull'idea di un utilizzo responsabile dell'ambiente e delle sue risorse come conseguenza di un patto intergenerazionale e definisce lo sviluppo un processo basato sul «soddisfacimento dei bisogni della generazione presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di realizzare i propri».

La Conferenza di Rio del 1992 ha tradotto il concetto di sviluppo sostenibile in una serie di atti formali tra i quali spicca la cosiddetta "Agenda 21", il programma di azioni necessarie per garantire uno sviluppo sostenibile nel ventunesimo secolo.

Il World Summit on Sustainable Development (WSSD) di Johannesburg (2002) ha ulteriormente specificato il concetto di sostenibilità indicandola come un processo di equilibrio dinamico tra sviluppo economico, sviluppo della struttura sociale e qualità ambientale.

La bonifica "verde" dei siti contaminati

Nell'ambito delle attività di bonifica dei siti contaminati il concetto di sostenibilità è stato introdotto recentemente. E' del 2009 il primo "Libro Bianco" sulle bonifiche sostenibili, pubblicato dal Sustainable Remediation Forum statunitense (SuRF US) che

introduce dell “linee guida” per le “bonifiche sostenibili”; una guida analoga è stata pubblicata nel 2011 dal SuRF UK e altre pubblicazioni dello stesso tipo affiancano le normative ufficiali di molti paesi.

In Italia SuRF Italy è presente dal 2012 ma molte sono le iniziative proposte da esperti, enti di controllo, associazioni di categoria e organizzazioni che in tutto il mondo promuovono l’utilizzo di tecnologie “verdi “ per la decontaminazione l’uso sostenibile del suolo e delle acque.

Bonificare un sito contaminato è tuttavia intrinsecamente un’attività ad elevato impatto ambientale che richiede l’utilizzo di tecnologie spesso invasive ed aggressive tanto più quanto la contaminazione è dovuta a diversi agenti inquinanti, a differenti inquinamenti che si sono sovrapposti nel tempo, a contaminazioni vecchie in cui le sostanze nocive sono ormai parte integrante del suolo o delle acque che si vogliono bonificare.

I principi e le tecnologie che guidano una bonifica tradizionale contrastano spesso con le metodologie suggerite dalla *Green Remediation*, che richiede che le attività di decontaminazione coinvolgano più ambiti e non siano strettamente indirizzate solo al trattamento del sito contaminato.

Schematicamente, una bonifica sostenibile dovrebbe coinvolgere e integrare l’ambito economico, sociale e ambientale, come indicato nel grafico in figura e non concentrarsi solo sugli aspetti ambientali del processo.

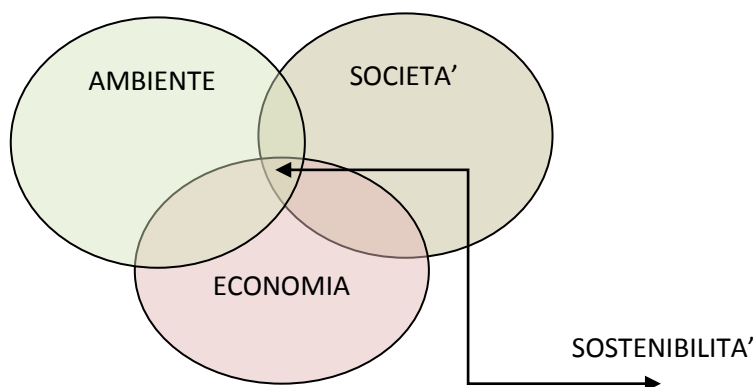


Fig.1 I tre ambiti della sostenibilità

Il concetto di sostenibilità è, infatti, derivato da considerazioni di tipo ecologico in cui è intuitivo fare riferimento a un “sistema” in cui tutte le parti devono funzionare in modo organico; di conseguenza l’intervento su una parte dell’organismo in crisi deve esser fatta rispettando il sistema nel suo complesso e tenendo presente che le azioni su una parte hanno effetti sul tutto.

Dal punto di vista operativo, la bonifica “verde” di un sito contaminato deve quindi tener conto di ambiti prima esclusi dalla pianificazione dell’attività di decontaminazione.

La programmazione delle attività di una bonifica tradizionale avviene per fasi ed inizia con l’applicazione della analisi di rischio che si basa sulla determinazione del modello concettuale del sito in relazione alla contaminazione presente, alle vie di migrazione possibili per le sostanze inquinanti e ai bersagli della contaminazione.

Attraverso una procedura, tanto più complessa quanto più è dettagliata l’analisi,

vengono definiti gli “obiettivi di bonifica” che si traducono essenzialmente in numeri, le cosiddette CSR, che rappresentano i valori di contaminazione a cui deve essere riportata la sorgente di contaminazione per evitare i rischi, per la salute umana. Una volta determinati gli obiettivi della bonifica, è lasciata al progettista la scelta delle tecnologie di bonifica da utilizzare.

In Italia, alcune indicazioni che sollecitano l’uso di tecnologie che salvaguardino in qualche modo l’ambiente sono contenute nel Testo Unico Ambientale (all. 3 Parte IV D.lgs 152/2006) che raccomanda, ad esempio, di privilegiare tecnologie “*in situ*” per evitare il più possibile il trasporto dei contaminanti e, in generale suggerisce di massimizzare l’efficacia dei trattamenti con il minor impatto ambientale ma non viene indicata esplicitamente una procedura che faccia riferimento alla sostenibilità.

In una bonifica sostenibile, invece, oltre al modello concettuale del sito e agli obiettivi di decontaminazione, vanno introdotti altri step che riguardano essenzialmente il coinvolgimento dei soggetti interessati al processo (i cosiddetti “stakeholder” o “portatori d’interesse”) e la selezione e l’utilizzo di opportuni metodi che rendano il procedimento di bonifica trasparente e condiviso.

A tale proposito è stata proposta l’adozione di indicatori che rendano in qualche modo “misurabile” la sostenibilità di una di bonifica.

Dal punto di vista ambientale, ad esempio, la bonifica “verde” richiede che siano rispettate le procedure indicate nello schema seguente (EPA, 2008):

Tabella 1. Indicatori della sostenibilità ambientale nell’ambito delle bonifiche sostenibili

Energia utilizzata	Devono essere privilegiate le cosiddette tecnologie “passive” che non utilizzano, o utilizzano al minimo, energia esterna al processo. In ogni caso l’efficienza energetica deve essere massimizzata anche con un monitoraggio continuo che consenta di adeguare, nel tempo, la richiesta energetica.
Emissioni in atmosfera	Minimizzare il contenuto di polveri e sostanze inquinanti immesse in atmosfera dal processo
Richiesta di acqua e impatto sulle risorse acquifere	Minimizzare il contenuto di acqua richiesto dal processo e privilegiare l’utilizzo di acqua di ricircolo. Prevenire gli effetti negativi a lungo termine sui corpi idrici (ad esempio limitare l’immissione di nutrienti che favoriscono l’eutrofizzazione). In caso di utilizzo della Phytoremediation privilegiare vegetazione spontanea che non richiede irrigazione.
Impatto sul territorio e sugli ecosistemi	Utilizzare tecnologie poco invasive. Utilizzare tecnologie a basso impatto energetico come la bioremediation, la phytoremediation eventualmente anche come tecnologie di finissaggio della

	<p>bonifica effettuata con altre tecnologie. Minimizzare la biodisponibilità dei contaminanti attraverso un adeguato contenimento del plume inquinante. Ridurre i disturbi dovuti al rumore o all'inquinamento luminoso.</p>
Produzione di rifiuti	<p>Minimizzare la produzione di rifiuti. Utilizzare materiale riciclato. Minimizzare l'estrazione e l'utilizzo di risorse naturali. Utilizzare dispositivi che minimizzino la produzione di materiale di scarto.</p>
Azioni a lungo termine	<p>Ridurre le emissioni di gas serra che contribuiscono ai cambiamenti climatici. Utilizzare sistemi di energia rinnovabile. Utilizzare sistemi di campionamento passivo. Sollecitare il coinvolgimento e l'accettazione della popolazione in merito alle attività e alle restrizioni sul sito dovute alle attività di bonifica.</p>

Tabelle analoghe sono state costruite anche per l'ambito sociale ed economico.

Per l'ambito sociale gli indicatori riguardano, tra gli altri, la salute e la sicurezza, l'etica e l'equità, gli impatti a scala locale o regionale e il coinvolgimento delle comunità mentre in ambito economico vengono presi in considerazione i livelli di occupazione, le analisi costi benefici, la durata e i rischi del progetto.

La valutazione complessiva dei tre ambiti, condotta utilizzando un opportuno sistema di indicatori, permette di valutare l'efficienza del processo e, nel caso di più soluzioni possibili, di scegliere quella che meglio soddisfa le condizioni previste dalla *green remediation*.

Il grado di sostenibilità di una bonifica viene successivamente valutato con approcci che integrano i tre aspetti, ambientale, sociale ed economico del processo, attraverso strumenti di valutazione anche molto complessi e che orientativamente possono supportare la fase di progettazione dell'intervento, quantificare gli impatti e supportare il processo decisionale.

L'attività di bonifica, così come delineata dalle azioni precedentemente indicate, presuppone una forte capacità di programmazione anche in merito al successivo utilizzo del sito contaminato. E' questo uno dei punti su cui si sta sviluppando un ragionamento che appare essenziale quando si avvia un processo così lungo e potenzialmente invasivo su un territorio. Bonificare è obbligatorio come è certamente doveroso bonificare cercando di minimizzare gli impatti ma è anche fondamentale bonificare avendo ben certa la destinazione d'uso del sito in un'ottica di recupero ambientale e economico di vaste porzioni di territorio a volte abbandonate in condizioni di degrado e contaminazione intollerabili.

Alcune di queste aree, più spesso quelle integrate nel tessuto urbano, particolarmente appetibili dal punto di vista economico, sono state bonificate con progetti molto

impegnativi ed onerosi e rappresentano un esempio di recupero e possibile riqualificazione ma altre rimangono contaminate e inutilizzabili anche a causa dei costi legati agli interventi di risanamento.

La normativa, infatti, prevede che sia il responsabile dell'inquinamento a provvedere alla bonifica in ottemperanza al principio del "chi inquina paga", ma in molti casi non è possibile rintracciare il responsabile della contaminazione e di conseguenza chi deve impiantare un'attività produttiva preferisce utilizzare terreni non contaminati per non sostenere gli elevati costi di bonifica. In questo modo s'incrementa il consumo di suolo e si mantengono attive potenziali sorgenti di contaminazione.

E' anche su queste aree che si sta concentrando l'idea di una bonifica "verde" capace di integrare le migliori tecnologie con la protezione dell'ambiente in un processo che sia in grado di coinvolgere i cittadini che possono concretamente indicare, in un ambito più ampio di una pianificazione a lungo termine, le finalità della bonifica e di riqualificazione del sito.

Le tecnologie di bonifica

Come appare evidente da quanto finora esposto, uno degli elementi che determina il successo di una bonifica è la scelta delle tecnologie da utilizzare e questo elemento del processo è particolarmente importante se si vuole realizzare una bonifica "verde".

Le tecnologie di bonifica si dividono essenzialmente in due gruppi: le tecnologie "in situ" / "on site" e quelle "ex situ".

Nelle tecnologie "in situ" il terreno da bonificare non viene scavato e l'intervento viene realizzato con impianti che si collocano direttamente sul sito contaminato e agiscono all'interno del terreno. Nelle tecnologie "on site" il terreno viene scavato ma non trasportato e la bonifica avviene in impianti che operano sul sito. Nel caso degli interventi "ex situ" il terreno viene scavato e trasportato in impianti dedicati in cui viene trattato e successivamente ricollocato nel sito di provenienza.

Per ognuna di queste tipologie di bonifica si possono elencare numerosi trattamenti che intervengono sull'inquinante contenuto nel suolo sfruttando reazioni di tipo chimico-fisico o biologico e che sono indicativamente riassunti nella tabella seguente:

Tabella 2. Principali tecnologie di bonifica

Trattamenti chimico fisici	Trattamenti biologici
Ossidazione chimica	Bioventing
Estrazione chimica	Bioremediation
Soil Flushing	Biopile
Soil Washing	Compostaggio
Solidificazione/Stabilizzazione	Landfarming
Soil Vapor Extraction	Bioreattori
Trattamento termico	
Elettrocinesi	
Pump and Treat	
Barriere permeabili reattive	

Ognuna delle tecnologie indicate ha un proprio ambito di azione e se ne conoscono in genere vantaggi, svantaggi e costi di applicazione mentre non viene generalmente indicato il loro grado di sostenibilità ambientale.

La scelta di una particolare tecnologia è quindi demandata a chi progetta e pianifica l'intervento di bonifica ed è dettata dalla conoscenza scientifica e dalla sensibilità del progettista.

E' evidente da quanto esposto che la sostenibilità non può realizzarsi semplicemente nella scelta di una tecnologia poco invasiva o genericamente considerata "verde" e nessun progetto di bonifica, per quanto tecnicamente rispettoso di indicatori e principi potrà dirsi realmente sostenibile se non si colloca in un contesto più complesso e organico e, in definitiva sistemico di relazione reciproca tra ambiti che contribuiscono complessivamente e ognuno per la sua parte al funzionamento e all'equilibrio del "sistema".

Le bonifiche diventano quindi realmente "sostenibili" solo se sono inserite in ambito che coinvolge equità sociale, sviluppo economico e qualità dell'ambiente in un complesso equilibrio di tipo dinamico. In quest'ambito diventa dunque fondamentale il ruolo degli "addetti ai lavori" e in particolare è centrale la figura dell'ingegnere ambientale cui è spesso commissionata la progettazione e l'attuazione dell'intervento di bonifica.

L'ingegnere ambientale e il committente nascosto

La realizzazione della bonifica di un sito contaminato è un'attività complessa, per la quale sono necessarie conoscenze interdisciplinari, ottime capacità di analisi, competenze e capacità di progettazione adeguate al conseguimento degli obiettivi di bonifica.

L'ingegnere ambientale è tecnicamente formato dai corsi universitari che si occupano di fornire le basi teoriche e tecniche necessarie per un'attività che richiede un elevato grado di specializzazione.

Le università stanno progressivamente integrando nei corsi di laurea dei percorsi che forniscono una visione più ampia e organica dei problemi ambientali ma fa ancora fatica ad emergere una visione meno settoriale basata sull'analisi della complessità determinata dall'interazione dei fattori sociali, ambientali e economici.

Non è infatti più possibile considerare un sistema complesso come aggregazione di singole parti perché come spiega Gould un sistema complesso "*... non può essere interamente spiegato separando gli elementi che lo compongono e interpretando le loro proprietà in assenza di interazioni che uniscono quegli elementi...*" (S.J.Gould, 1987).

E' proprio l'attenzione alle interazioni tra sistemi che deve caratterizzare il nuovo approccio alla bonifica e, più in generale, ai problemi dell'ambiente. E' difficile, infatti, ritenere che possano essere messe in atto tecnologie e processi di decontaminazione senza considerare le risposte che il sistema fornisce alle perturbazioni che queste azioni introducono e che rappresentano un'informazione fondamentale sugli effetti globali degli interventi realizzati.

In questo senso è anche necessario ripensare in senso critico alle analisi proposte dai modelli cibernetici adattativi che ipotizzano la possibilità per ogni sistema perturbato, nel nostro caso l'ambiente, di riportarsi spontaneamente in condizioni di equilibrio adottando meccanismi di autoregolazione. Più frequentemente si osservano invece situazioni in cui il sistema mostra un allontanamento dalle condizioni di equilibrio senza che sia possibile prevedere con certezza quali saranno i parametri del nuovo stato di stabilità verso cui il sistema dovrebbe evolvere.

Per questi motivi è diventato indispensabile costruire un nuovo approccio alle problematiche ambientali e, nello specifico, alle criticità legate all'applicazione delle diverse tecnologie di bonifica che integri l'ambiente, la sua complessità e le metodologie in grado di condurre a scelte progettuali consapevoli.

L'attività formativa legata all'introduzione dei principi della sostenibilità e all'analisi della complessità può progressivamente entrare a far parte del bagaglio di conoscenze dell'Ingegnere Ambientale anche attraverso l'analisi dei progetti di ricerca già realizzati che utilizzano metodi e tecnologie compatibili con la richiesta di sostenibilità ma soprattutto deve diventare prassi indispensabile quella di tener conto delle informazioni che lo stesso ambiente fornisce con i suoi *feedback*.

Affrontare la complessità è certamente una sfida che necessita di una solida preparazione ma soprattutto di un modo diverso di analizzare e affrontare le criticità. Si può certamente utilizzare una metodologia analitica, spesso usata dagli ingegneri, basata sulla parcellizzazione e risoluzione per parti dei problemi, ma nella loro ricomposizione è necessario introdurre elementi nuovi capaci di tener conto anche delle istanze del "committente nascosto" che impone scelte capaci di mantenere l'equilibrio tra sviluppo economico, conservazione dell'ambiente e bisogni sociali in una visione sistemica della stessa complessità.

La dinamicità e spesso l'instabilità di questo equilibrio impongono inoltre la necessità di introdurre elementi di flessibilità nelle soluzioni in modo che la risposta ai cambiamenti del sistema possa essere tempestiva e congrua. Soluzioni tecnologiche flessibili introducono nel sistema stesso un aumento di flessibilità e, come sottolineato da Ashby, la flessibilità in un sistema complesso è di fondamentale importanza per la sua sopravvivenza.

Il ruolo dell'ingegnere ambientale è dunque centrale in questo processo perché anche le scelte "semplicemente" tecniche nell'ambito di una attività di bonifica possono orientare un sistema verso un livello di maggiore o minore sostenibilità. Ad esempio, scegliere una tecnologia di bonifica aggressiva che riduce rapidamente la concentrazione dell'inquinante ma condiziona l'utilizzo successivo del suolo o prediligere un trattamento meno invasivo e più rispettoso dell'ambiente, a parità di risultati attesi, può ridurre il consumo di suolo, ricondurre il territorio alla popolazione alla quale era stato sottratto, contribuire al miglioramento economico della comunità determinando così un *feedback* positivo sul sistema.

In questo senso l'educazione alla complessità e ad una visione sistemica dei problemi può condurre ad un miglioramento della qualità dell'intero processo di bonifica e riqualificazione di un sito contaminato e, in senso generale, dell'ecosistema.

In conclusione, una visione più aperta e consapevole, in qualche modo olistica

dell'ecosistema da parte dell'Ingegnere Ambientale potrebbe condurre ad un approccio nuovo anche in un campo così specifico e fortemente caratterizzato dall'utilizzo di tecnologie ad elevato impatto ambientale come quello della bonifica dei siti contaminati. L'adozione dei principi e dei metodi della bonifica sostenibile rappresenta un primo e importante passo verso una differente visione dei problemi meno rivolta alla loro soluzione immediata e più cosciente delle conseguenze immediate e future di ogni scelta perché progettare nella complessità richiede una visione organica delle criticità e la consapevolezza che qualsiasi sia la nostra idea di futuro è oggi che cominciamo a costruirlo.

Bibliografia

- Ashby W.R., 1956. An Introduction to Cybernetics. Chapman & Hall, London.
- Bateson G. 2001. Verso un'Ecologia della Mente. Adelphi. Milano.
- ITRC, 2011. Green and Sustainable Remediation: A Practical Framework. Documento disponibile in format elettronico su www.itrcweb.org/GuidanceDocuments/GSR-2.pdf
- Gould, Stephen J.,1987. Il sorriso del fenicottero. Feltrinelli. Milano.
- Gorla, Maurizio, 2012. Siti Contaminati: Caratterizzazione-Analisi di rischio-Tecniche di disinquinamento. Dario Flaccovio Editore. Palermo.
- Micron, 2014. Bonifica, recupero ambientale e sviluppo del territorio: esperienze a confronto sul fitorimedia. Atti del convegno Micron n.29 agosto 2014.
- Surf Italy, 2015. Sostenibilità delle Bonifiche in Italia. Documento disponibile in formato elettronico su www.reconnet.net
- U.S.Environmental Protection Agency, 2008. Green Remediation: Incorporating Sustainable Environmental Practices into Remediation of Contaminated Sites. EPA 542-R-08-002.