

Nuove tecnologie per il biorisanamento di suoli contaminati

Tiziana Pennesi, Marco Falconi, Antonio Dell'Anno, Francesca Beolchini, Laura Rocchetti

Circa il 3% del territorio italiano è da bonificare. E' molto importante, quindi, sviluppare tecnologie sostenibili per il risanamento del suolo. In questo ambito una delle tecniche più utilizzate è quella del bioventing che è basata sulla normale attività biologica presente nel terreno con l'immissione di ossigeno attraverso un fluido di aria. I vantaggi di questa tecnica biologica di bonifica dei siti contaminati risiedono essenzialmente nei bassi costi di realizzazione dell'impianto e della gestione

Per lungo tempo il suolo è stato considerato unicamente un sostegno alle numerose forme di insediamento antropico. Si tratta, invece, di un sistema naturale dinamico, che supporta numerosi processi naturali e consente lo svolgimento delle molteplici attività umane, che sempre più spesso risultano in competizione tra loro generando conflitti tra i possibili diversi usi della risorsa. La valutazione del suo stato e utilizzo rappresenta, di conseguenza, uno degli elementi fondamentali per la valutazione della qualità dell'ambiente nel suo complesso. La sua tutela disegna uno dei temi centrali delle politiche ambientali di tutti i Paesi industrializzati e nasce dalla piena consapevolezza che esso svolge diverse funzioni (Larson et al., 1991) tra le quali procurare le risorse di primaria importanza per l'alimentazione umana e servire da *filtro naturale* per i contaminanti, depurando anche le acque che passano attraverso i pori. I fenomeni più gravi di inquinamento derivano, nella maggior parte dei casi, dall'interazione del terreno con i prodotti di rifiuto e sono localizzati in aree industriali dismesse, vecchie discariche e zone in cui una non corretta gestione dei rifiuti ha portato un sovraccarico di inquinanti rispetto alle capacità depuranti del terreno. Quando l'ossigeno diminuisce, aumenta la concentrazione delle forme inorganiche dell'azoto (N_2 , NH_3 , NO e NO_2), dello zolfo (H_2S , SO_2 e SO_3) e di idrocarburi. Nel suolo sono presenti *microrganismi*, soprattutto batteri, funghi e attinomiceti, che esercitano un'azione sulla mobilità degli inquinanti; la microflora è presente anche in terreni con elevata quantità di sostanze tossiche, grazie alla sua notevole versatilità e resistenza. Le azioni dei microrganismi si

esplicano verso quasi tutti i materiali di rifiuto mediante biodegradazione, sintesi e ossidoriduzione, i cui effetti sono in grado di risultare sia benefici che dannosi (es. formazione dell'intermedio cloruro di vinile nella degradazione del TCE). In sintesi, quindi, il comportamento di un inquinante è controllato da un rilevante numero di variabili legate sia alle caratteristiche del terreno che a quelle dell'inquinante stesso; la bonifica di suoli e siti inquinati costituisce, pertanto, una delle più rilevanti problematiche emergenti per gli interventi di recupero e di risanamento ambientale e riguarda tutto il territorio nazionale. La disciplina degli interventi di bonifica e ripristino ambientale dei siti contaminati, nonché le procedure, i criteri e le modalità per lo svolgimento delle operazioni necessarie per l'eliminazione delle sorgenti dell'inquinamento e, comunque, per la riduzione delle concentrazioni di sostanze inquinanti, vengono attuate in armonia con le norme e i principi comunitari, con particolari oneri in termini finanziari. Infatti, analizzati da un punto di vista meramente economico, gli interventi di bonifica dei siti contaminati costituiscono un costo, sia naturalmente per i soggetti direttamente interessati, sia per la collettività.

Per valutare l'incidenza degli interventi di bonifica sulla riqualificazione di un'area e, di conseguenza, verificare la fattibilità e la remuneratività dell'intervento di sviluppo dell'area stessa, occorre fare riferimento a più parametri operativi, principalmente:

- costi degli interventi;
- certezza del raggiungimento degli obiettivi di bonifica;
- occupazione superficiale delle aree du-



rante gli interventi di bonifica;

- tempistiche per arrivare alla certificazione di avvenuta bonifica dell'area;
 - permanenza di eventuali vincoli sull'area a valle degli interventi di bonifica (per realizzazione della messa in sicurezza permanente, limitazioni d'uso previste a seguito dell'applicazione dell'analisi di rischio, etc.).
- L'applicazione di una tecnologia di risanamento rispetto a un'altra può determinare una variazione rilevante degli oneri di bonifica che, unitamente alle tempistiche di rilascio delle aree, rappresentano in molti casi un fattore determinante per un investitore. La scarsità delle informazioni acquisite relativamente ad un sito contaminato ha impedito, negli anni passati, un'adeguata previsione del modello concettuale del sito stesso, determinando invece una facile disposizione ad un frequente abuso del concet-

Scegliere una tecnica di bonifica piuttosto che un'altra può comportare oneri differenti

to di messa in sicurezza d'emergenza, intervento che deve essere eseguito in attesa e non in sostituzione degli interventi di bonifica e ripristino ambientale o degli interventi di messa in sicurezza permanente. La tendenza era, quindi, anche in seguito alla verifica di un grave stato di inquinamento, di mettere in atto un intervento finalizzato all'eliminazione totale della contaminazione, consistente sostanzialmente in un conferimento massiccio del suolo inquinato in discarica, rimandando nel tempo il problema, quando tra decine di anni, si dovrà bonificare o mettere in sicurezza, la discarica stessa.

TECNOLOGIE DI BIORISANAMENTO

La soluzione del problema della salvaguardia dell'ambiente impone l'utilizzo di nuove e più adeguate tecnologie di bonifica che consentano di distruggere o rendere innocui numerosi inquinanti utilizzando la naturale attività biologica presente nel terreno che

Figura 1 - Diagramma di un tipico sistema di bioventing

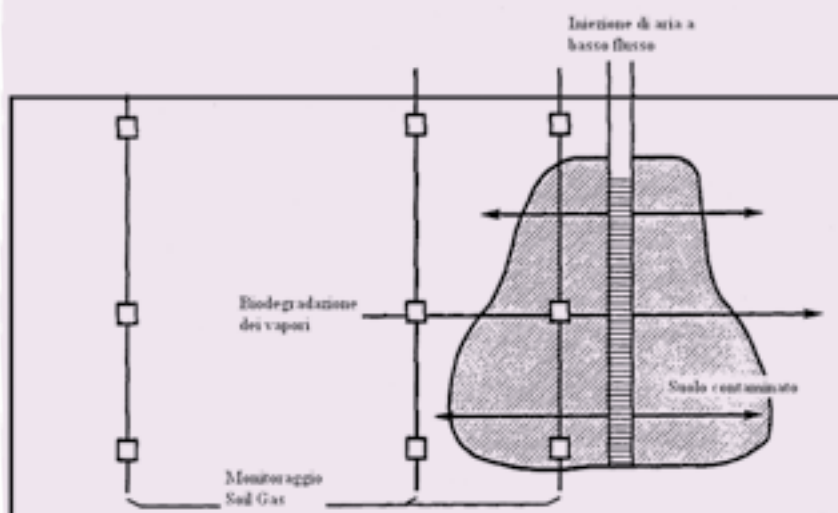
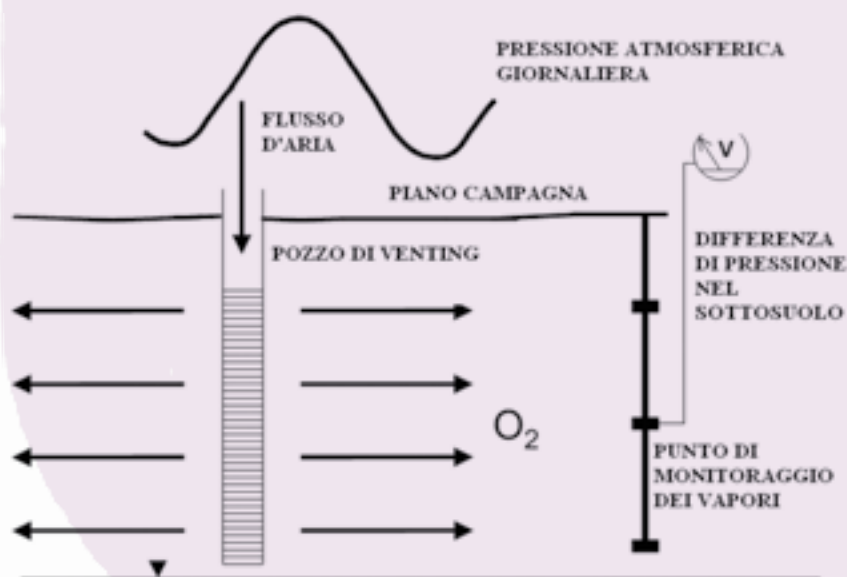


Figura 2 - Funzionamento del bioventing passivo



prendono il nome di *bioremediation* (Diaz, 2008). Attraverso il loro utilizzo viene, infatti, favorito l'incremento dell'attività biodegradativa prodotta dai batteri naturalmente presenti nel suolo inquinato o da batteri selezionati in laboratorio (*bioaugmentation*) e immessi nel terreno, attraverso inoculi sequenziali (Leeson et al., 2001). I microrganismi utilizzano le sostanze inquinanti come nutrimento e come fonte di energia, ottenuta ossidando le suddette sostanze e cedendo elettroni a elementi e/o composti che variano secondo la profondità del suolo; normalmente l'elemento accettore è l'ossigeno, mentre, con l'aumentare della profondità e con la conseguente minore disponibilità di O₂, possono essere nitrati, solfati, ferro, manganese e anidride carbonica. Per la degradazione di composti organici come i prodotti petroliferi, è fondamentale che il terreno sia ricco di batteri aerobi eterotrofi. In questa categoria delle tecnologie di bonifica rientra la tecnica del *Bioventing*, quale approccio tra i maggiormente utilizzati per il risanamento di suoli insaturi ed il cui termine identifica il processo "in situ", di aerazione dei terreni, attraverso l'utilizzo di soffianti alimentate elettricamente, allo scopo di stimolare l'attività biologica dei microrganismi naturalmente presenti che sono in grado di decomporre questi contaminanti. Questa tecnologia, utilizzata principalmente in siti contaminati da idrocarburi, si è rivelata una tra le migliori, sia in termini di costi effettivi che in termini di efficienza (Fig. 1).

Vengono utilizzate delle portate d'aria relativamente basse (dell'ordine da 0,007 a 0,01 m³/sec. per pozzo) e basse pressioni di iniezione (dell'ordine di 25 a 75 mBar) per ridurre al minimo la perdita di sostanze volatili, massimizzando la biodegradazione. La fattibilità finale di un sistema di *bioventing* è influenzata da diversi processi fisici, chimici e biologici che trovano manifestazione secondo le particolarità specifiche, proprie di ogni singolo sito. Quattro principali caratteristiche fisiche influenzano il *bioventing*:

- A) la permeabilità del terreno ai gas;
- B) la diffusione dei contaminanti nel suolo;
- C) la distribuzione dei contaminanti
- D) la zona di influenza di ossigeno.

I sistemi di *bioventing* sono molto semplici, con poche parti meccaniche ed elettriche; sono tuttavia necessari controlli settimanali e alcune piccole manutenzioni come la sostituzione di filtri, dei misuratori di portata o degli indicatori. Se viene installato un sistema di *bioventing* di estrazione o di estrazione e reiniezione, è probabile che sia richiesta una manutenzione più intensa.

IL BIOVENTING PASSIVO

Nello scenario delle tecnologie maggiormente ecosostenibili trova spazio, sebbene ancora oggi con poche applicazioni a scala progettuale, il *Bioventing Passivo*. Tale tecnica innovativa differisce dal *bioventing* convenzionale nel modo in cui è recapitato ossigeno al sottosuolo: si basa, infatti, sul naturale ricambio



Il bioventing è fra gli approcci maggiormente utilizzati per il risanamento dei suoli insaturi

d'aria, senza l'utilizzo delle soffianti (Fig.2). I test sul campo, effettuati in diversi siti degli USA, hanno mostrato che le variazioni giornaliere della pressione atmosferica permettono ai pozzi aperti nella zona insatura di far entrare e uscire aria (Pirkle et al, 1992; Rossabi et al, 1993, Zimmerman et al, 1997).

Nei periodi di aumento della pressione atmosferica, si sviluppa un gradiente negativo di pressione tra l'atmosfera e il sottosuolo, che è misurabile nei punti di monitoraggio come un vuoto. L'entità del gradiente di pressione è principalmente in funzione del tasso di variazione della pressione atmosferica, della profondità, della permeabilità del suolo all'aria e della porosità totale (Zimmerman et al., 1997). La pressione atmosferica varia quotidianamente con le oscillazioni della temperatura dell'aria, con una pressione più bassa nelle ore pomeridiane e più alta nelle prime ore del mattino. Le variazioni di tale pressione, dovute alla situazione meteorologica, possono anche essere significative e il passaggio di alte o basse pres-

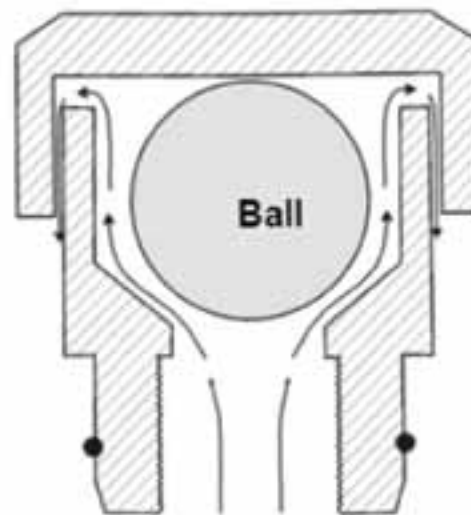


Figura 3 - Immagine e schema di una valvola passiva unidirezionale Baroball® (Christensen et al., 2003).

sioni può provocare una variazione ancora maggiore. Tuttavia, una variazione significativa della pressione atmosferica da sola non è una garanzia soddisfacente ad assicurare che saranno sviluppati dei gradienti sufficienti a creare il flusso d'aria necessario: la litologia del sito e le caratteristiche del suolo sono dei requisiti altrettanto importanti.

PROGETTAZIONE DEL SISTEMA

La progettazione di un sistema di *bioventing* passivo è quasi identica alla progettazione di un sistema di *bioventing* convenzionale, salvo che, come detto, non è richiesta una soffiante elettrica e nel modo in cui sono installate le valvole passive ai pozzi di *venting* (Fig. 3): utilizzando la valvola passiva, l'aria può entrare nel pozzo di *venting* solo quando la pressione interna è inferiore a quella atmosferica e, quando si verifica il gradiente inverso, la valvola si chiude per impedire la fuoriuscita dell'aria prima iniettata.

Oltre ai pozzi di *venting* impiegati per l'iniezione o l'estrazione dell'aria, vengono utilizzati dei punti

di monitoraggio dei vapori del suolo per osservare costantemente le prestazioni del sistema. I pozzi di monitoraggio sono installati con le loro finestrate alla stessa profondità del pozzo di ventilazione e sono collocati con un aumento di distanza dal pozzo stesso (Fig. 4). I punti di monitoraggio sono spazati spesso secondo un modello radiale (Fig. 4a), alle distanze previste per essere all'interno dell'influenza del pozzo di ventilazione o lungo una linea dal pozzo stesso (Fig. 4b). I criteri chiave di progettazione per i sistemi di *bioventing* passivo sono rappresentati dallo spazio necessario per il pozzo di *venting*, in funzione del raggio di influenza atteso e il tasso del flusso d'aria nel pozzo stesso. Se il raggio di influenza previsto è piccolo ed il flusso d'aria atteso è basso, viene richiesto un numero maggiore di pozzi per coprire tutta l'area contaminata: in tal modo il risparmio sui costi, che si determinerebbe dalla mancata installazione e dal mancato funzionamento di una soffiante, sarebbe compensato dagli aumenti considerevoli per la perforazione e per i costi di installazione di altri pozzi di ventilazione. Poiché il raggio di influenza e

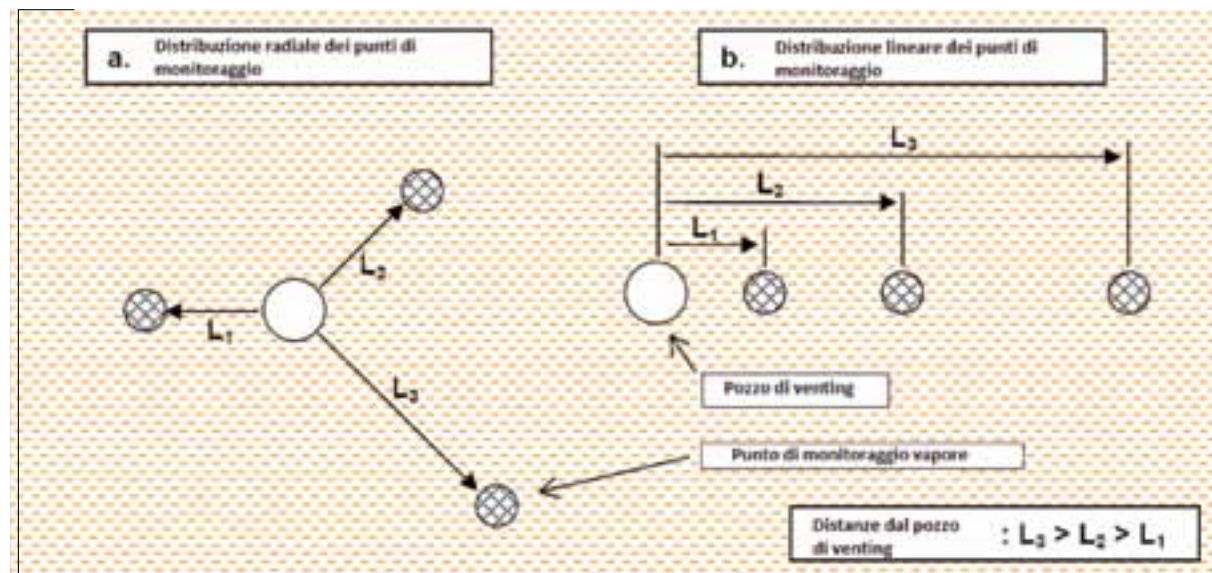


Figura 4 - Distribuzione radiale e lineare di punti di monitoraggio

la richiesta di ossigeno dei microrganismi sono strettamente sito specifici, il successo del progetto sarà inevitabilmente basato sulla capacità di raggiungere un raggio di influenza adeguato e indurre il flusso d'aria necessario per soddisfare le richieste di ossigeno proprie del sito; l'area di trattamento ed il flusso d'aria richiesto devono essere economicamente soddisfacenti, senza richiedere un numero eccessivo di pozzi di *venting* rispetto al *bioventing* convenzionale.

ECONOMICITÀ E PRESTAZIONI

Il raggio di influenza dell'ossigeno realizzato da un pozzo di ventilazione di *bioventing* passivo sarà sempre minore del raggio realizzato quando è iniettata aria con l'utilizzo delle soffianti, a causa del tasso più basso del flusso d'aria realizzato dal sistema passivo. La decisione di eseguire un test di fattibilità del *bioventing* passivo su scala pilota dovrebbe essere basata sul costo ipotizzato di un sistema passivo completo contro il costo di un sistema di *bioventing* convenzionale: la principale voce di costo di un sistema pas-

sivo consiste nei costi di perforazione e installazione dei pozzi di ventilazione e monitoraggio. In assenza di infrastrutture esistenti, il costo dell'installazione dei pozzi di ventilazione del *bioventing* passivo, se completato utilizzando i metodi convenzionali di perforazione, può superare il costo dell'installazione e di funzionamento del sistema convenzionale. Ad esempio, un raggio di influenza del pozzo minore di 3 m. (con 6 m. di area influenzata dal pozzo) è progettato per provocare un sistema di *bioventing* passivo completo che nell'installazione costerà di più di un sistema di *bioventing* convenzionale. Tuttavia, se per l'installazione del pozzo di ventilazione vengono utilizzate tecniche a basso costo come il penetrometro statico anziché la perforazione convenzionale, il costo del *bioventing* passivo in un'area anche inferiore a 6 m. trattata da un pozzo di ventilazione può essere inferiore rispetto a quello convenzionale. Altre condizioni sito specifiche che precluderebbero l'installazione di un impianto pilota includono:

- Differenziale di pressione atmosferica giornaliera inferiore a 3,39 mBar;

- Permeabilità all'aria verticale del terreno sovrastante l'area di trattamento superiore a 1.000 millidarcy;
- Permeabilità all'aria radiale del terreno contaminato inferiore a 100 millidarcy;
- Contenuto in acqua del terreno contaminato maggiore del 10% in massa.

I sistemi di *bioventing* sono stabili per lunghi periodi e non sono necessarie attrezzature complesse e valvole operative a distanza; l'uso di contatti elettrici e di guarnizioni riutilizzate è minimizzato. Tuttavia, deve essere effettuata la manutenzione programmata per accertare il continuo funzionamento. Le caratteristiche minime di manutenzione richieste riguardano il regolare funzionamento della guarnizione di ogni pozzo di *venting*. L'utilizzo di un sistema di trattamento dei gas aumenterà significativamente la complessità della manutenzione. Il *bioventing* passivo, così come quello convenzionale, richiede un periodo di funzionamento e di manutenzione prima che possa essere messa a regime la fase di esercizio. Il vantaggio principale di questa tecnologia innovativa rispetto al *bioventing* convenzionale o agli altri sistemi di bonifica è l'eliminazione della soffiante. In molti impianti tale energia non è disponibile o sarebbe comunque molto costosa; anche in strutture dove è disponibile l'alimentazione per una soffiante, i siti contaminati risultano spesso lontani dai punti di ac-



A differenza di quello convenzionale, il *bioventing* passivo si basa sul naturale ricambio d'aria

cesso, con problematiche annesse all'alimentazione. Il risparmio realizzato dalla mancata installazione di una soffiante e dal suo conseguente non utilizzo, verrebbe compensato dagli aumenti considerevoli per la perforazione e dei costi di installazione dei pozzi di *venting*, qualora il raggio d'influenza fosse di piccole dimensioni. In generale, nell'ambito di un metodo di *bioventing* passivo, i costi di installazione per i pozzi supplementari di *venting*, confrontati con quello per la soffiante e quelli previsti nell'ambito

di un metodo di *bioventing* convenzionale sono sito specifici e dipenderanno da quanto segue:

- differenze nel raggio di influenza fra *bioventing* convenzionale e passivo;
- costi per allacciamento alla rete elettrica;
- costi dell'energia elettrica;
- costi di perforazione, influenzati soprattutto dalla profondità della contaminazione, dal tipo del terreno e dalla posizione;
- tempo occorrente per raggiungere gli obiettivi di bonifica.

Nei siti in cui stanno funzionando sistemi di *Soil Vapor Extraction* o di *Bioventing* convenzionale, ci può essere la possibilità di spegnere la soffiante alimentata elettricamente ed installare una valvola passiva unidirezionale. Il momento in cui dovrebbe essere considerata la trasformazione da uno SVE attivo o da un sistema di *bioventing* convenzionale ad un sistema passivo è indicato dalla diminuzione del tasso di recupero della massa dell'agente inquinante per i sistemi di SVE e da una diminuzione misurata nel tasso di respirazione dei microrganismi per i sistemi di *bioventing*. Quando il tasso di recupero della massa dell'agente inquinante o di respirazione comincia a diminuire, il quantitativo di flusso d'aria del *bioventing* passivo può essere sufficiente per sostenere il flusso necessario alla bonifica. Il passaggio al *bioventing* passivo potrebbe potenzialmente abbassare i costi operativi e di manutenzione anche se vengono comunque forniti i volumi di aria sufficienti per sostenere il risanamento.

SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE DELLA TECNOLOGIA

In uno studio condotto presso un sito contaminato da idrocarburi presente nella provincia di Terni, sono state considerate le problematiche relative al confronto tra un sistema di *Soil Vapor Extraction* (SVE) con un'eventuale applicazione del *Bioventing* Passivo (BVP), cercando di cogliere non solo le differenze in sede progettuale, quanto le discordanze in termini di impatti sull'ecosistema, mettendo in luce le principali criticità di ogni processo, in riferimento alle conse-

guenze dannose per il comparto ambientale. Per la stima ed il calcolo dei parametri necessari alla valutazione dell'impatto ambientale si è fatto ricorso alla procedura di analisi quantitativa del ciclo di vita di un prodotto, denominata *Life Cycle Assessment* (LCA), la quale, determinati i fattori di ingresso (materie prime, uso di risorse, energia) e di uscita (produzione di rifiuti, emissioni inquinanti) in un processo produttivo, ne consente di determinare le conseguenti influenze sull'ambiente e di individuare, quindi, le fasi operative di maggiore criticità. Tale procedura è standardizzata dalla serie di norme ISO 14040-14043 che descrivono i criteri generali e la metodologia attraverso cui effettuare un *LCA* ed è stata condotta attraverso l'utilizzo del software GaBi 4.3 (*Ganzliche Bilanzierung* – da cui “GaBi”, bilancio complessivo), sviluppato grazie alla cooperazione dell'*Institute for Polymer Testing and Polymer Sciences* (IKP), oggi *Department Life Cycle Engineering* dell'Università di Stoccarda e della società di consulenza PE INTERNATIONAL. La banca dati utilizzata per questo studio è stato il *Professional Database* che fornisce la maggior parte dei processi industriali, partendo dalle materie prime e considerando i prodotti intermedi. Essendo progettato per l'analisi degli impatti ambientali generati da un processo, GaBi permette di costruire i bilanci ambientali considerando le risorse sfruttate durante il processo stesso e



Il *bioventing* passivo può sostenere il flusso della bonifica e molto probabilmente abbassa i costi operativi

le emissioni (solide, liquide e gassose) da esso generate. I confini del sistema sono stati definiti considerando nel dettaglio il processo di realizzazione dei pozzi di venting, di aspirazione e dei punti di monitoraggio ed includendo l'uso di alcuni prodotti utilizzati negli impianti di smaltimento e/o trattamento previsti in entrambe le tecnologie considerate, scegliendo di trascurare alcuni ingressi relativi ai materiali costituenti le strumentazioni tecniche (es. i *dataloggers*, i trasduttori d'aria, le valvole passive, etc.), materiali che pos-

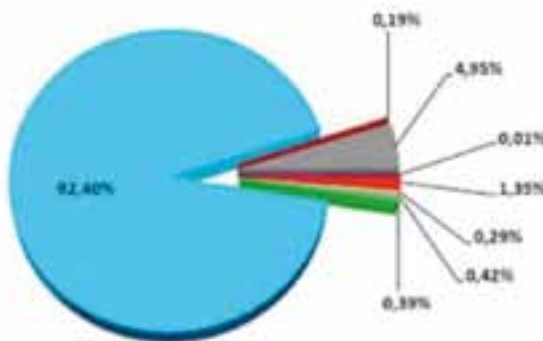
Figura 5 - LCA – Potenziale impatto sul riscaldamento totale

9 TCO₂ - Equiv.

Processo BVP

**80 TCO₂ - Equiv.**

Processo SVE



sono essere sottoposti al riutilizzo in ulteriori sistemi. Sono stati presi in considerazione i flussi riguardanti materia ed energia utilizzati da ogni processo (Tab.1), al fine di identificare la tipologia dell'impatto inflitto all'ambiente e di quantificarne le conseguenze. In particolare i flussi di interesse riguardano:

- le risorse energetiche utilizzate; } **INPUT**
 - la quantità dei materiali utilizzati; }

- la produzione di emissioni gassose; } **OUTPUT**
 - la produzione di rifiuti }

Le categorie di impatto considerate sono quelle individuate dalla metodologia "CML" (*Center for Environmental Studies*) sviluppata dall'Università di Leiden (Olanda), riconosciute a livello europeo e riportate nella tabella 2. Gli impatti relativi ai flussi riguardanti le risorse impiegate in ogni processo, in termini di kg di CO₂ Equivalente, sono riportati nella successiva tabella 3. La figura 5 mostra i grafici riguardanti i valori in percentuale dei flussi inerenti le risorse utilizzate all'interno di ogni processo, mettendo in evidenza quelle maggiormente significative nell'attuazione di ogni tecnologia. Ai fini del confronto delle tecnologie prese in esame sono stati analizzati i due processi in relazione alle sei categorie di impatto ambientale risultate significative in fase di normalizzazione (valori di riferimento a livello europeo su base annua, CML2001-Nov. 09; Tab. 4). Analizzando i valori sopra riportati si nota che il processo relativo al *Bioventing* Passivo risulta meno impattante di quello della *Soil Vapor Extraction* in tutte e sei le categorie d'impatto prese in considerazione. Le due tecnologie presentano una differenza non eccessiva nella categoria riguardante il consumo dell'ozono stratosferico, mentre in quella relativa al riscaldamento globale il processo relativo alla SVE risulta ben più di 10 volte superiore a quello del *bioventing* passivo. L'applicazione dell'LCA alle due tecnologie indagate ha permesso di conseguire l'importante risultato di aver messo in evidenza come la componente preponderante negli impatti provocati

Tabella 1 - Stima delle risorse utilizzate nei due processi.

RISORSE INPUT	PROCESSO BVP	PROCESSO SVE
Gasolio (kg.)	125	25
PVC (kg.) compresi i Corrugati flessibili	1.800	500
Sabbia (kg.)	31.000	6.000
Boiaccia (kg.)	2.300	500
Bentonite (kg.)	3.100	600
Energia elettrica (kW/h)	-	106.000
Olio lubrificante (kg.)	-	170
Carboni attivi (kg.)	-	2.800

Tabella 2 - Categorie di impatto (metodologia CML) e loro unità di misura.

CATEGORIA DI IMPATTO	UNITÀ DI MISURA
Potenziale Consumo Risorse	kg
Potenziale Acidificazione	kg SO ₂ -Equiv.
Potenziale Eutrofizzazione	kg fosfato-Equiv.
Potenziale Riscaldamento Globale	kg CO ₂ -Equiv.
Potenziale Consumo ozono stratosferico	kg R11-Equiv.
Potenziale Creazione Ozono troposferico	kg etene-Equiv.

Tabella 3 - Impatto in termini di emissioni di anidride carbonica dei processi di produzione delle risorse richieste nelle due tecnologie in esame (kg di CO₂-Equiv.).

FLUSSI INPUT	PROCESSO BVP	PROCESSO SVE
Gasolio	6,20*10 ¹	1,24*10 ¹
PVC, compresi i Corrugati flessibili	4,36*10 ³	1,10*10 ³
Sabbia	1,21*10 ³	2,42*10 ²
Boiaccia	1,72*10 ³	3,43*10 ²
Bentonite	1,58*10 ³	3,16*10 ²
Energia elettrica	-	7,50*10 ⁴
Olio lubrificante	-	1,55*10 ²
Carboni attivi	-	4,01*10 ³
TOTALE	8,93*10 ³	8,12*10 ⁴

Tabella 4 - Valori stimati per i due processi nelle principali categorie d'impatto

CATEGORIE D'IMPATTO	SVE	BVP
Consumo risorse	4,33*10 ⁹ •	6,66*10 ⁹
Acidificazione	2,55*10 ⁹ •	1,58*10 ⁹
Eutrofizzazione	7,72*10 ⁹ •	1,26*10 ⁹
Riscaldamento globale	1,56*10 ⁷ •	1,70*10 ⁸
Consumo ozono stratosferico	1,10*10 ⁹ •	3,25*10 ¹⁰
Creazione ozono troposferico	3,15*10 ⁹ •	5,01*10 ⁹

• valori che contraddistinguono il processo a maggior impatto

dalla SVE risulti essere quella provocata dal consumo di energia elettrica e dalla produzione di rifiuti quali i carboni attivi, evidenziando quanto l'utilizzo del *bioventing* passivo potrebbe essere conveniente in termini di conservazione e salvaguardia dell'ambiente.

Riferimenti bibliografici

Christensen, A.G., H.H. Nielsen, and E.V. Fisher (2003): "Passive Ventilation for Removing PCE from the Vadose Zone" (in Danish). Miljøprojekt Nr. 806, Teknologiuudviklingsprogrammet for, jord- og grundvandsforurening.

Diaz E. (2008). Microbial Biodegradation: Genomics and Molecular Biology (1st ed.). Caister Academic Press. ISBN 1-904455-17-4
EEA 2007: *Progress in management of contaminated sites (CSI 015) - Assessment published Aug 2007* - www.eea.europa.eu

ESTCP (Environmental Security Technology Certification Program) - U.S. Department of Defence (September 2000): *Natural Pressure-Driven Passive Bioventing - Final Report*. Naval Facilities Engineering Service Center.

ESTCP - U.S. Department of Defence (November 22, 2002): *Addendum - Natural Pressure-Driven Passive Bioventing - Final Report*. Naval Facilities Engineering Service Center.

ESTCP - U.S. Department of Defence (January 2004): *Cost and Performance Report - Natural Pressure-Driven Passive Bioventing*. Naval Facilities Engineering Service Center.

ESTCP - U.S. Department of Defence (March 2006): *Design Document for Passive Bioventing*. Naval Facilities Engineering Service Center.

Larson, W.E. and Pierce F.J. (1991): *Conservation and enhancement of soil quality. Evaluation of Sustainable Land Management in the Developing World*, International Board for Soil Research and Management, Bangkok, Thailand.

Leeson, A., Alleman B.C., Alvarez P.J., Magar V.S. (2001): *Bioaugmentation, biobarriers, and biogeochemistry*. Battelle Press 2001, ISBN 1-57477-110-8.
Pirkle, R.J., D.E. Wyatt, V. Price, and B.B. Looney (1992): *Barometric Pumping: The Connection Between the Vadose Zone and the Atmosphere*. The Focus Conference on Eastern Regional Ground Water Issues.

Rossabi, J., B.B. Looney, C.A. Eddy-Dilek, B. Riha, and V.J. Rohay (1993): *Passive Remediation of Chlorinated Volatile Organic Compounds Using Barometric Pumping*. WSRC-MS-93-615, DOE. Westinghouse Savannah River Company, Aiken, SC.

Sustainable Remediation Forum UK (2010): *A Framework for Assessing the Sustainability of Soil and Groundwater Remediation*, ISBN 978-1-905046-19-5
USEPA Office of Research and Development (ORD) (September 1995): *Principles and Practices of Bioventing*. EPA/540/R-95/534.

Zimmerman, C.T., Sass, B.M., Zwick, T.C., Alleman, B.C., Payne, C.A., Hoepfel, R.E., Bowling, L. (1997): *Principles of Passive Aeration for Biodegradation of JP-5 Jet Fuel*. Bioventing Applications and Extensions. Battelle Press.