

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea in

Valorizzazione delle risorse primarie e secondarie LS

**Utilizzo di fanghi di cartiera per ripristini ambientali:
tecniche per la messa in sicurezza rispetto alla
produzione di biogas**

CANDIDATO
Sara Verniti

RELATORE
Chiar.ma Prof. Ing. Alessandra Bonoli

CORRELATORI
Ing. Alice Dall'Ara
Ing. Nora Rappoli
Chiar.ma Prof. Mariolina Longo

Anno Accademico 2009/2010

Sessione II

INDICE

INTRODUZIONE	4
CAPITOLO 1.....	6
I FANGHI DI CARTIERA	6
1.1. I RIFIUTI SPECIALI NON PERICOLOSI	6
1.2. L'INDUSTRIA CARTARIA	8
1.3. RIFIUTI DELL'INDUSTRIA CARTARIA	12
1.4. TRATTAMENTO FANGHI PRODOTTI DAL PROCESSO DI DEPURAZIONE DELLE ACQUE.....	14
1.5. RECUPERO DEI RIFIUTI.....	15
1.6. CARATTERIZZAZIONE FANGHI DI CARTIERA.....	20
CAPITOLO 2.....	22
INQUADRAMENTO NORMATIVO	22
2.1. NORMATIVA ITALIANA	22
2.1.1. <i>Norme in materia di gestione dei rifiuti</i>	22
2.1.2. <i>Norme in materia di siti contaminati</i>	25
2.2. NORMATIVA EUROPEA.....	33
CAPITOLO 3.....	37
IL CASO: FONDO COLOMBAROTTO.....	37
3.1. INTRODUZIONE	37
3.2. I GAS SERRA E IL METANO: CENNI	40
3.3. CARATTERIZZAZIONE CHIMICO-FISICA DEI FANGHI DEL SITO “FONDO COLOMBAROTTO” E ANALISI DI STABILITÀ	42
3.4. CRONOLOGIA DEGLI INTERVENTI E DEI MONITORAGGI EFFETTUATI.....	45
3.4.1. <i>Tipologia di intervento di biostabilizzazione e recupero dell'area</i>	46
3.4.2. <i>Attuazione dell'intervento di stabilizzazione e recupero dell'area</i>	47
3.4.3. <i>Monitoraggio del biogas</i>	51
3.4.4. <i>Risultati</i>	52
3.5. EMISSIONI DI BIOGAS	54
3.5.1. <i>Misura delle emissioni di metano mediante flux box</i>	55
3.5.2. <i>Misura delle emissioni nel sito Fondo Colombarotto</i>	56
CAPITOLO 4.....	61
POSSIBILI APPLICAZIONI DELLA METODOLOGIA SVILUPPATA	61
4.1. INTRODUZIONE	61
4.2. SITI DI RIPRISTINO CON FANGHI DI CARTIERA: “FOSSA DI LAVAGNIN”	62
4.3. APPLICAZIONE A DISCARICHE	64

4.3.1.	<i>Legislazione italiana</i>	65
4.3.2.	<i>“Technical Guideline for Biocovers”</i>	69
CAPITOLO 5		78
CONSIDERAZIONI ECONOMICHE E DI IMPATTO AMBIENTALE DELLA TECNOLOGIA		78
5.1.	INTRODUZIONE	78
5.2.	POSSIBILI SOLUZIONI ALTERNATIVE	79
5.3.	LCA - <i>LIFE CYCLE ASSESSMENT</i>	86
5.3.1.	<i>Introduzione</i>	86
5.3.2.	<i>Metodologia</i>	87
5.3.3.	<i>Software per LCA</i>	95
5.4.	LCA PER LE TECNOLOGIE DI BONIFICA	96
5.4.1.	<i>Introduzione</i>	96
5.4.2.	<i>Esempio di LCA di confronto</i>	100
5.4.3.	<i>Approccio all’LCA per la tecnologia di Amek S.c.r.l.</i>	105
CAPITOLO 6		110
PROGETTO “S.O.SARA”		110
6.1.	APICE S.R.L.....	110
6.2.	FABBISOGNI/PROBLEMATICHE ALLA BASE DEL PROGETTO D’INNOVAZIONE	111
6.3.	OBIETTIVI E CONTENUTI DEL PROGETTO DI INNOVAZIONE ORGANIZZATIVA, MANAGERIALE E FINANZIARIA.....	112
6.4.	IMPATTO INDUSTRIALE E/O SOCIOECONOMICO ATTESO DEL PROGETTO DI INNOVAZIONE ORGANIZZATIVA, MANAGERIALE E FINANZIARIA, CON PARTICOLARE ATTENZIONE AL CONTESTO REGIONALE	114
6.5.	INNOVATIVITÀ DEL PROGETTO, IN PARTICOLARE RISPETTO AL CONTESTO REGIONALE.....	116
6.6.	OBIETTIVI DEL PROGETTO:.....	116
6.7.	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ PREVISTE.....	117
6.8.	COERENZA DELLE ATTIVITÀ CON GLI OBIETTIVI DEL PIANO	118
CONCLUSIONI		120
ALLEGATO		122
CARATTERIZZAZIONE FANGHI DI CARTIERA		122
BIBLIOGRAFIA		130

Introduzione

In questo lavoro di tesi è stato affrontato il tema del recupero dei fanghi di cartiera, rifiuti non pericolosi dell'industria cartaria, tramite il loro utilizzo in ripristini ambientali. In seguito ad alcuni avvenimenti verificatisi ad Imola, è stato scoperto che vi è un concreto rischio di produzione di biogas da questi rifiuti con il conseguente pericolo per la salute dell'uomo e per l'ambiente. In particolare, la produzione e la migrazione incontrollata di biogas da uno di questi siti, denominato "Fondo Colombarotto" ha causato due esplosioni in un'abitazione in prossimità dello stesso. Per la messa in sicurezza permanente del sito è stata utilizzata una tecnologia innovativa brevettata (Amek S.c.r.l.) che ne ha permesso anche il recupero ad uso agricolo.

Il primo capitolo contiene una panoramica sui fanghi di cartiera: vengono descritti questi rifiuti e viene data indicazione delle principali destinazioni degli stessi. In particolare, sono state indicate le diverse modalità di recupero, con particolare attenzione alla diffusione dell'utilizzo in ripristini ambientali.

Nel secondo capitolo sono stati affrontati gli aspetti normativi. Per quanto riguarda la legislazione italiana, è stata fornita indicazione della normativa relativa sia alla gestione dei rifiuti che alla bonifica dei siti contaminati, aspetti entrambi che interessano ai fini del lavoro svolto; si è fatto anche riferimento all'evoluzione legislativa nel tempo, in modo da descrivere sia le leggi in vigore oggi, sia negli anni in cui è avvenuto l'inconveniente ambientale al "Fondo Colombarotto". Segue un riferimento alla normativa europea riguardo la gestione dei rifiuti anche in questo caso con riferimento all'evoluzione degli ultimi anni.

Il terzo capitolo è dedicato al caso avvenuto ad Imola. È stato presentato il sito in esame ed è stato dettagliatamente descritto l'intervento di risanamento che l'ha interessato e che ha visto lo sviluppo di una metodologia innovativa che permette di stabilizzare i fanghi di cartiera accelerando la degradazione della componente cellulosica e di mitigare l'impatto ambientale tramite bioconversione del metano in CO₂. È stato anche descritto il programma di monitoraggio che ha accompagnato l'intervento e i risultati che è stato possibile ottenere a distanza di circa 5 anni.

Nel quarto capitolo sono state mostrate le potenzialità future della tecnologia sviluppata. In particolare il suo possibile utilizzo in altri siti in cui si dovesse verificare produzione incontrollata di biogas da fanghi di cartiera e la sua possibile futura applicazione a discariche contenenti rifiuti biodegradabili. Per quel che riguarda il primo punto è stato

descritto un altro caso avvenuto di recente in Liguria molto simile a quello del Fondo Colombarotto; riguardo all'utilizzo in discariche, invece, dopo aver indicato i principali aspetti normativi sull'argomento in Italia, è stata presentata una linea guida sui *biocovers* (*Technical Guideline for Biocovers*) che in ambito europeo rappresenta un importante riferimento su quelli che probabilmente diventeranno gli standard per interventi volti a ridurre le emissioni di metano dalle discariche.

Nel capitolo cinque è stato effettuato un confronto di natura tecnica, economica e di impatto ambientale tra la tecnologia di Amek e altre tecniche di *bioremediation* utilizzabili in alternativa. È stata anche presentata la metodologia del *Life Cycle Assessment* (LCA), il suo utilizzo per tecnologie di *bioremediation* e un'analisi preliminare per l'applicazione di tale metodologia alla tecnologia brevettata.

Infine l'ultimo capitolo è dedicato al progetto di Innovazione Organizzativa, Manageriale e Finanziaria presentato al bando "Spinner2013", un programma della Regione Emilia Romagna nell'ambito della ricerca e innovazione tecnologica. Il progetto, della durata di sei mesi, denominato "S.O.Sara", si propone l'apertura di un nuovo mercato nazionale per l'azienda Apice S.r.l. per la commercializzazione della tecnologia innovativa sviluppata da Amek rivolgendosi ad altri siti di ripristino ambientale con fanghi di cartiera in cui sia stata accertata la presenza di biogas. Apice S.r.l. è l'azienda titolare della commessa per la messa in sicurezza del Fondo Colombarotto e ha svolto, nell'ambito dell'intervento, attività di coordinamento e supporto all'azione dei tecnici attraverso la gestione della logistica e della sicurezza.

Questa tesi fa parte di un elenco nazionale di tesi/tirocinio ENEA ed è stata svolta presso i Laboratori di Ricerca di Faenza, Unità Tecnica Tecnologie dei Materiali Faenza (UTTMATF) (correlatrice ing. Alice Dall'Ara). Ha previsto anche la collaborazione delle due aziende interessate Apice e Amek (Correlatrice ing. Nora Rappoli).

CAPITOLO 1

I FANGHI DI CARTIERA

1.1. I rifiuti speciali non pericolosi

Ai sensi del Decreto Legislativo 3 Aprile 2006, n°152, “Norme in materia ambientale” (articolo 184), i rifiuti sono classificati, secondo l’origine, in rifiuti urbani e rifiuti speciali e, secondo le caratteristiche di pericolosità, in rifiuti pericolosi e rifiuti non pericolosi. I rifiuti speciali sono quelli provenienti da attività agricole e agro-industriali; dalle attività di demolizione, costruzione e scavo; da lavorazioni industriali e artigianali, da attività commerciali e di servizio; rifiuti derivanti dall’attività di recupero e smaltimento di rifiuti; i fanghi prodotti dalla potabilizzazione e da altri trattamenti delle acque e dalla depurazione delle acque reflue e da abbattimento di fumi; i rifiuti derivanti da attività sanitarie; i macchinari e le apparecchiature deteriorati ed obsoleti; i veicoli a motore, rimorchi e simili fuori uso e loro parti; il combustibile derivato da rifiuti; i rifiuti derivati dalle attività di selezione meccanica dei rifiuti solidi urbani [1].

La quantità totale di rifiuti speciali prodotta in Italia nel 2006 risulta pari a 134,7 milioni di tonnellate, di cui 73,4 milioni di tonnellate di rifiuti speciali non pericolosi (esclusi i rifiuti da costruzione e demolizione, C&D), 52,1 milioni di tonnellate di rifiuti speciali non pericolosi da C&D e 9,2 milioni di tonnellate di rifiuti pericolosi [2].

In figura 1.1. è riportata la produzione di rifiuti speciali non pericolosi (escluso C&D) per attività economiche, anno 2006 [2].

Da notare la grande incidenza dei rifiuti provenienti dall’industria manifatturiera, con il 59,4%, pari a circa 43,6 milioni di tonnellate.

Esaminando nel dettaglio questo macrosettore produttivo, si può ottenere una disaggregazione (figura 1.2) relativa alla produzione di rifiuti speciali non pericolosi dell’attività manifatturiera.

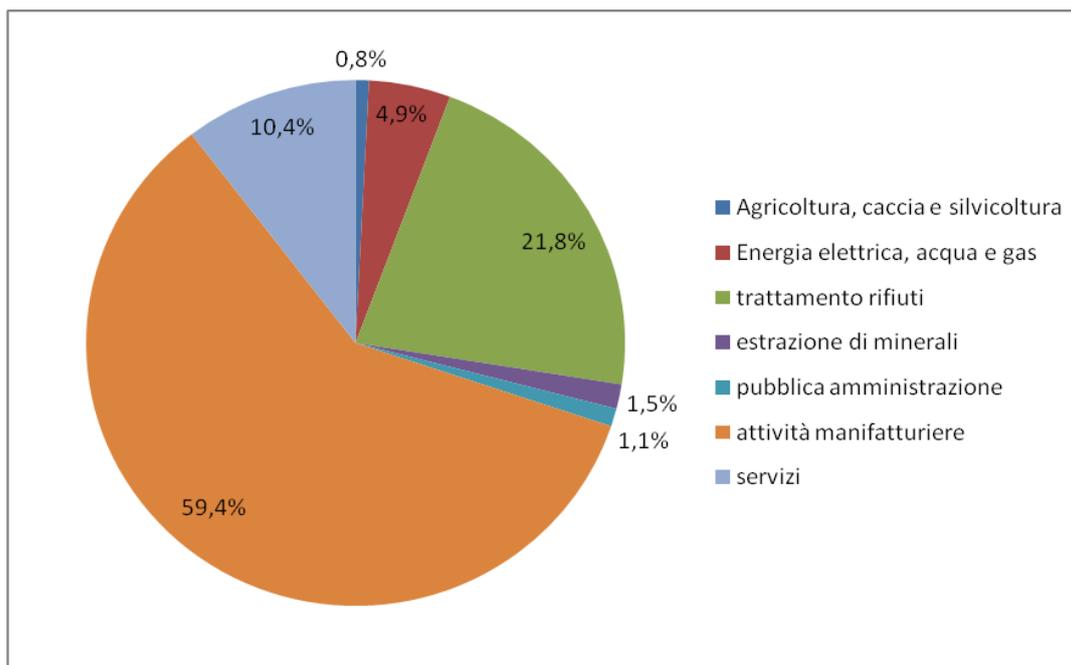


Figura 1.1 - Produzione di rifiuti speciali non pericolosi (escluso C&D) per attività economiche, anno 2006 [2]

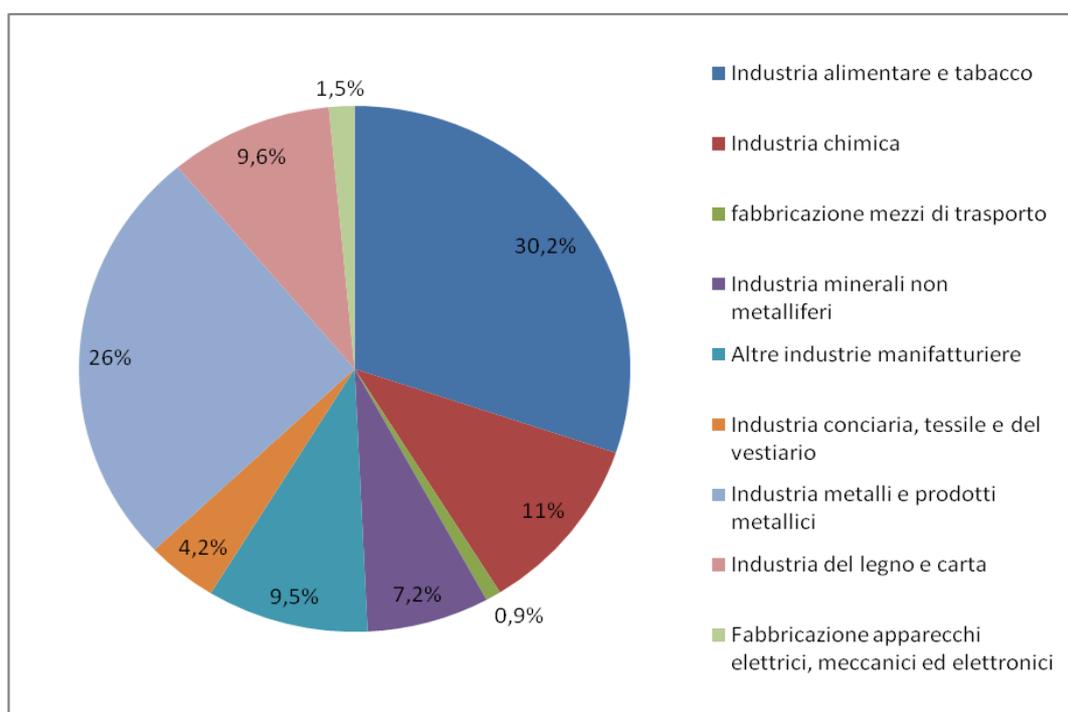


Figura 1.2 - Produzione di rifiuti speciali non pericolosi dell'attività manifatturiera, anno 2006 [2]

Per quanto riguarda l'industria del legno e della carta, essa si posiziona al terzo posto con il 9,6%, dopo l'industria alimentare e del tabacco (al primo posto con il 30,2%), l'industria dei metalli e dei prodotti metallici e l'industria chimica.

La produzione totale di rifiuti speciali non pericolosi da parte dell'industria del legno e della carta, inclusi i C&D, è di circa 1.554.523 t/a, mentre quella di rifiuti speciali pericolosi è di 11.102 t/a [2].

1.2. L'industria cartaria

L'industria cartaria vede in Italia circa 139 imprese, 180 stabilimenti, 21.800 addetti con una produzione di 9.467.000 ton (2008), e un fatturato di 7.592 milioni di euro [3]. L'Italia si posiziona al quinto posto in Europa per produzione di carta, dopo Germania, Finlandia, Svezia e Francia [4]. L'industria cartaria è caratterizzata da un'elevata intensità di investimento e da una forte incidenza delle materie prime nella struttura dei costi.

Tra i fattori di produzione vi sono l'energia, spesso autoprodotta dalle stesse cartiere, e le risorse idriche. L'acqua infatti viene usata per produrre la pasta di carta che servirà per produrre carta. Tali risorse sono protagoniste da tempo di una ricerca di ottimizzazione da parte dell'industria [5].

La carta è formata da un sottile strato di fibre di cellulosa sovrapposte e pressate. Il processo di produzione della carta si divide in cinque fasi:

- Preparazione dell'impasto
- Formazione del foglio
- Essiccazione
- Finitura
- Allestimento finale

A livello di preparazione dell'impasto il processo è differente a seconda della materia fibrosa in ingresso. Infatti la fibra può essere estratta dal legno o recuperata tramite il processo di riciclo della carta da macero [6].

Il "BREF Pulp and Paper manufacture"¹ [4], riporta due schemi che descrivono gli input (energia, materie prime ecc.) e gli output (prodotti finiti, semilavorati, emissioni, rifiuti) del processo di produzione (figura 1.3) e del processo di produzione con riciclo (figura 1.4) della carta.

¹ BREF è l'acronimo di BAT Reference Report – Rapporto sulle migliori tecniche disponibili.

Oggi le fibre riciclate sono un indispensabile materiale grezzo usato dall'industria della carta. In particolare rappresentano circa un terzo della materia prima utilizzata. Questo a causa del prezzo inferiore e della crescente attenzione che in tutta Europa sta interessando le questioni relative al riciclo dei rifiuti [4].

I consumi sono la principale criticità ambientale dell'industria cartaria.

Per quanto riguarda i consumi idrici, come già accennato, l'acqua è la principale materia prima, insieme alla cellulosa ed è per questo elemento imprescindibile. Aumentando la quantità di acqua inserita nel sistema, aumenterà di conseguenza l'investimento per gli impianti di depurazione. Per questo, progressivamente, si è arrivati alla "chiusura dei cicli", cioè il riciclo delle acque di processo: l'acqua necessaria al processo produttivo è per il 90% acqua di riciclo e per il restante 10% acqua fresca. Questo ha permesso di ottenere ottimi risultati in quanto ha portato a dimezzare, a parità di carta prodotta, i quantitativi di acqua utilizzata negli ultimi trent'anni. Tuttavia, la chiusura del ciclo comporta problemi relativi ad una maggiore corrosione delle attrezzature e, in generale, alla perdita di qualità del prodotto. Inoltre può portare ad un aumento della concentrazione di sostanze inquinanti nelle acque di scarico e nei fanghi di depurazione. Dunque, non necessariamente la riduzione dell'impiego di risorse idriche è la soluzione ambientalmente preferibile [6].

Per quanto riguarda i consumi energetici, il processo di fabbricazione della carta richiede significative quantità di energia, sia per quanto riguarda l'energia elettrica necessaria per il funzionamento del *pulper* (spappolatore, macchina per la produzione dell'impasto) e della macchina continua (che a partire dall'impasto crea il foglio in bobine), sia in termini di vapore necessario per la deumidificazione della carta. Ingenti quantitativi di energia elettrica e termica sono necessari anche per la produzione di cellulosa e per il recupero di fibra dal macero. Considerando che gli approvvigionamenti delle fonti energetiche rappresentano per le cartiere la seconda voce di costo, con un'incidenza di circa il 20% dei costi di produzione, l'industria cartaria si annovera nella categoria delle produzioni *energy intensive* [7].

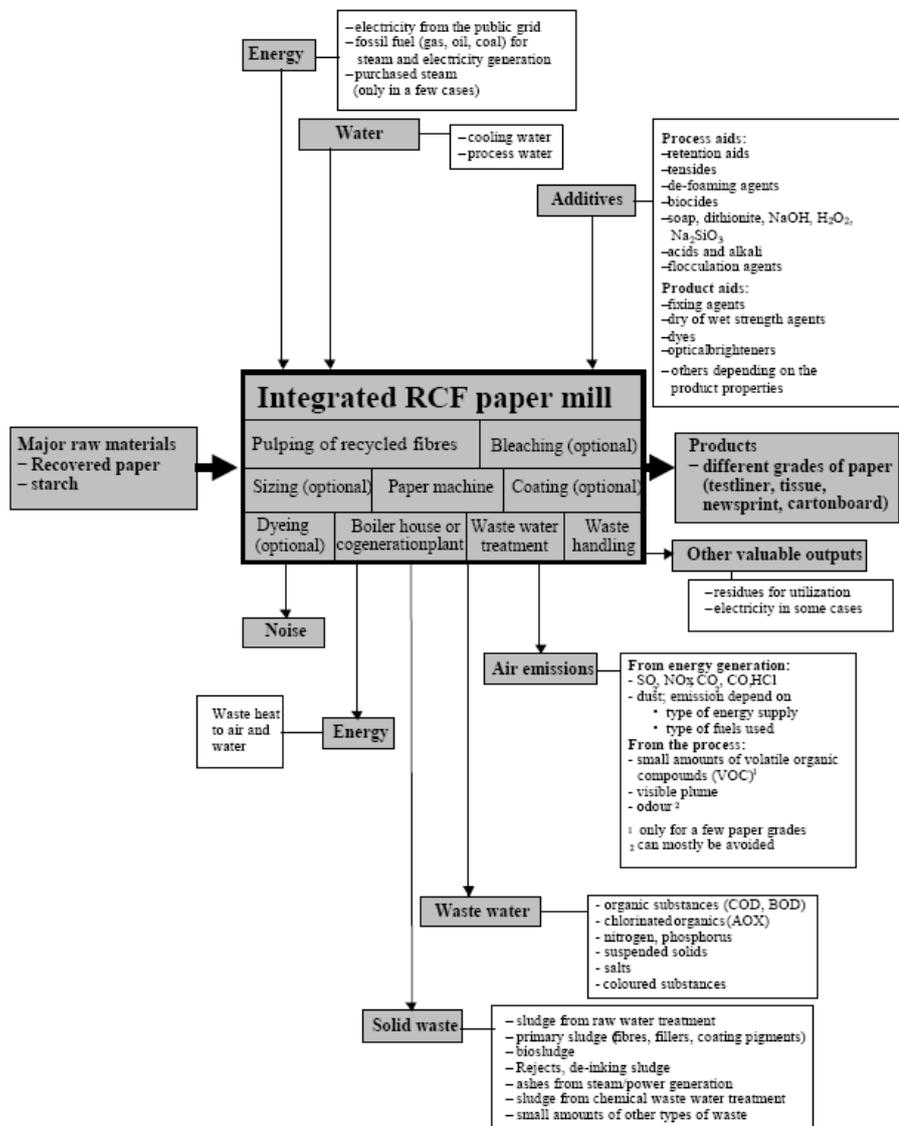


Figura 1.3 – Diagramma input-output di una cartiera [4]

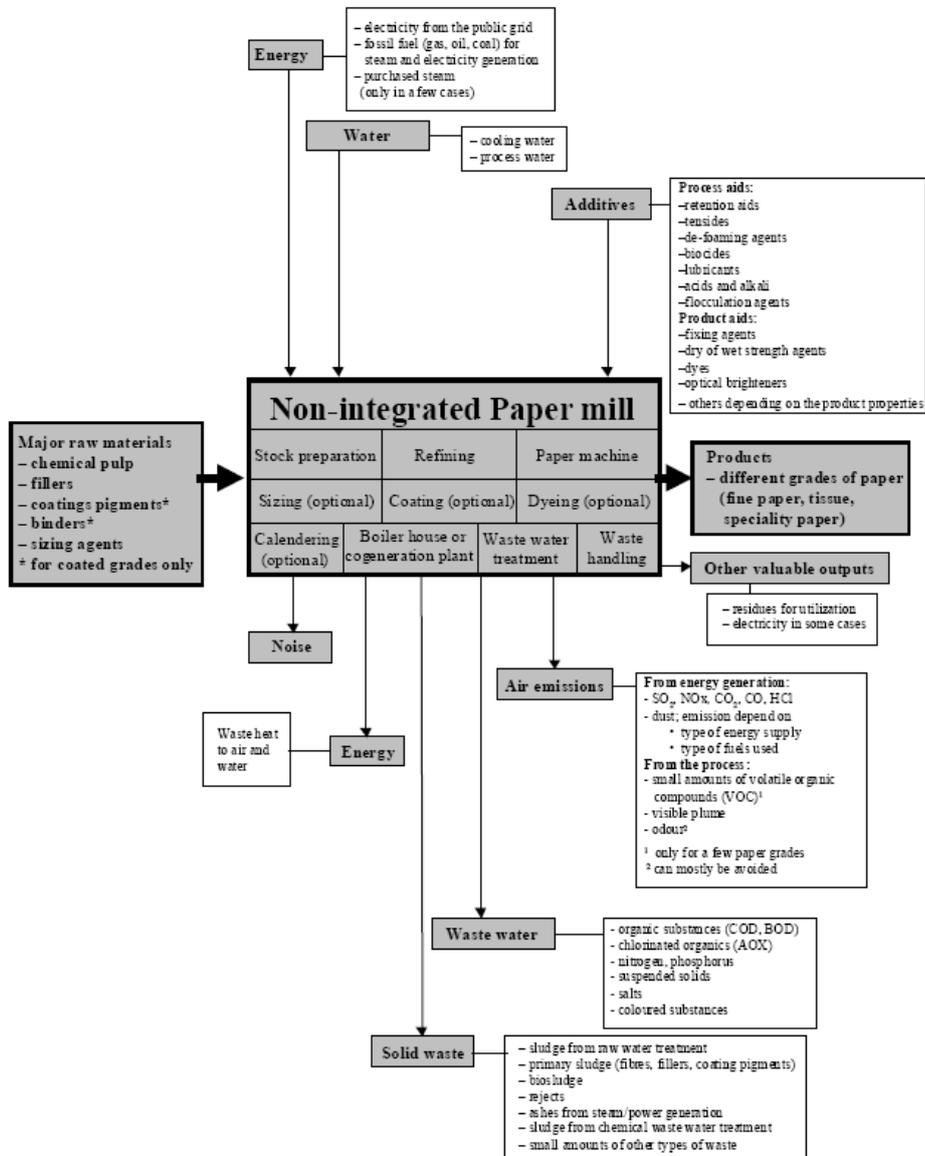


Figura 1.4 - Diagramma input-output di una cartiera con riciclo della carta integrato [4]

Il consumo di energia sta scendendo grazie all'utilizzo, in molte cartiere, della cogenerazione, ovvero la produzione combinata di elettricità e di calore. L'industria cartaria oggi ottiene i più elevati livelli di efficienza energetica contribuendo alla limitazione delle emissioni di gas serra [7].

1.3. Rifiuti dell'industria cartaria

Il riutilizzo degli scarti e dei sottoprodotti dell'industria cartaria sta divenendo per il settore uno degli aspetti più importanti, anche in chiave competitiva, con lo scopo di ridurre l'impatto ambientale legato alla produzione della carta, da una parte cercando di ridurre la richiesta di materie prime vergini e di energia non autoprodotta, dall'altra riducendo i flussi di rifiuto da avviare allo smaltimento [5].

L'industria nazionale cartaria produce ridotte tipologie di rifiuti. I residui di produzione dell'industria cartaria sono a base di biomasse e sono idonei al recupero, sia di materia che di energia. Il principale rifiuto generato dalla produzione della carta si presenta sotto forma di fanghi classificati come non pericolosi. I fanghi sono generalmente prodotti dal processo di depurazione delle acque, sia chimico-fisico, che biologico, mentre il processo produttivo della carta vero e proprio, sostanzialmente non produce rifiuti: normalmente gli scarti di lavorazione, come gli sfridi e i fogliacci, possono essere direttamente riutilizzati all'interno del processo produttivo. Per quanto riguarda invece i residui del processo di riciclo della carta da macero, si tratta essenzialmente di scarti di *pulper* (derivanti dalla separazione della fibra dalle impurità più grossolane) e fanghi di disinchiostrazione, prodotti solo nel caso in cui è prevista la rimozione dell'inchiostro dal macero. Tali residui, necessari per poter estrarre dal macero una fibra utilizzabile per fare nuova carta, rappresentano comunque in media meno del 10% del rifiuto evitato. Solo di quest'ultima tipologia di fanghi ne vengono prodotte ogni anno in Italia circa 400.000 tonnellate.

Minore incidenza hanno infine i rifiuti quali gli scarti di ferro, legno e plastica provenienti dalla gestione degli imballaggi, gli oli esausti e i rifiuti assimilabili agli urbani.

Negli ultimi anni si è potuto osservare un incremento nella generazione di rifiuti dovuto in gran parte al miglioramento delle capacità di trattamento degli impianti di depurazione delle acque e al maggiore impiego del macero, in particolar modo *post-consumer*, caratterizzati da un più alto contenuto di impurità e di fibra non riutilizzabile.

Tale incremento, si sta attenuando solo di recente grazie anche all'adozione di tecnologie che permettono una maggiore disidratazione dei fanghi [7].

Nella tabella 1.1 sono indicati i rifiuti in relazione alle diverse fasi di produzione della carta; nella figura 1.5, è invece rappresentata la percentuale di ciascuna tipologia di rifiuto nell'industria cartaria. Dalla figura si evince come i fanghi (da depurazione chimico-fisica, da depurazione biologica e da disinchiostrazione) rappresentino circa il 50% dei rifiuti di cartiera.

Tabella 1.1 - Rifiuti tipici delle diverse fasi di produzione della carta [6]

Fasi	Rifiuti prodotti
Stoccaggio materie prime	Imballaggio in metallo, legno e plastica
Disinchiostrazione	Fanghi di disinchiostrazione
Pulper	Scarti di <i>pulper</i>
Manutenzione	Oli esausti
Manutenzione	Tele e feltri
Trattamento reflui	Fanghi da depurazione chimico-fisica
Trattamento reflui	Fanghi da depurazione biologica

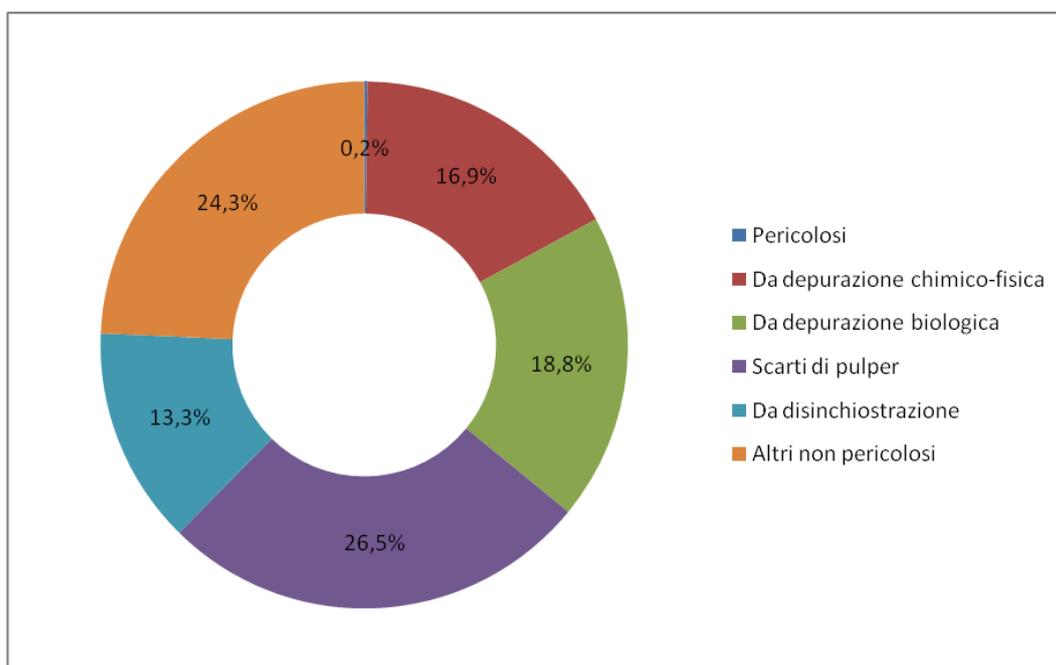


Figura 1.5 - Tipologie di rifiuti della produzione della carta [7]

ARPA Emilia Romagna ha fornito i dati relativi alle quantità di fanghi di cartiera prodotti in regione nel 2008. Le quantità sono riportate nella tabella 1.2 ed indicate in relazione ai codici CER dei rifiuti, che saranno definiti più avanti (paragrafo 1.5).

Tabella 1.2 - Quantitativi di fanghi di cartiera prodotti in Emilia Romagna (2008)

Provincia	CER	t/a
Parma	030311	232,71
	030399	20,25
	030305	6,25
	030311	5,22
Reggio Emilia	030311	8.058,63
	030399	162,61
Modena	030311	52,89
	030311	45,98
Bologna	030311	1.934,45
	030310	50,58
Ferrara	030310	2.067,40
	030311	0,71
Ravenna	030311	0,09
Forlì	030310	73,20
Tot. Regione Emilia Romagna		12.710,97

1.4. Trattamento fanghi prodotti dal processo di depurazione delle acque

I fanghi derivanti dal processo di depurazione delle acque devono essere trattati per eliminare l'acqua ancora presente in essi. L'acqua viene inviata a un bacino di sedimentazione, dove l'acqua chiarificata esce per sfioro e i solidi precipitano. Tali solidi che si sedimentano, sono appunto i fanghi.

La prima fase di trattamento fanghi è l'idrociclone. E' costituito da una parte cilindrica e una conica. I fanghi entrano in direzione tangenziale con velocità e pressione molto elevate. Il materiale più grosso ha inerzia maggiore, e tende a rimanere contro la parete, mentre il materiale fine risente della forza centrifuga e tende ad essere richiamato al centro e a risalire.

In uscita dall'idrociclone si ottiene:

- Una corrente di solidi grossi e medi
- Una corrente di acqua e finissimi

L'acqua in uscita dall'idrociclone può unirsi alla corrente di acqua chiarificata o tornare in circuito chiuso al sedimentatore.

Il trattamento fanghi prosegue con una fase di centrifugazione.

La centrifuga è costituita da una spirale, all'interno di un corpo tronco-conico, che trascina i fanghi; nella fase di centrifugazione viene liberata altra acqua.

Il fango disidratato viene inviato alla fase di pressatura, dove delle presse lo compattano.

Le presse possono essere:

- Filtropressa: è costituita da dischi o membrane che lasciano passare l'acqua, ma trattengono la fase solida; quando la pressa viene chiusa, i dischi vengono compattati, l'uno sull'altro e si ha l'uscita dell'acqua
- Nastropressa: è costituita da rulli che schiacciano acqua e fango su un nastro e l'acqua viene raccolta nella parte bassa.

In genere l'acqua in uscita dalle presse non è "pulita", ed è quindi rimandata al bacino di sedimentazione [8].

1.5. Recupero dei rifiuti

Le caratteristiche dei residui della produzione della carta, come è stato chiarito, li rendono idonei ad essere riutilizzati.

I fanghi di cartiera sono sempre più utilizzati nella produzione di altra carta, nell'industria dei laterizi, nei cementifici, nei conglomerati edilizi, nei rilevati, nei sottofondi stradali e per le operazioni di ripristino ambientale, ad esempio per la copertura di discariche o cave. Inoltre questi fanghi, sottoposti ad essiccamento, possono essere utilizzati in cartiera per la produzione di energia, contribuendo al fabbisogno energetico degli impianti produttivi e sottraendo agli impianti di smaltimento quantità rilevanti di rifiuti. La quantità di residui che finiscono in discarica è infatti in continua diminuzione [5].

In figura 1.6 sono rappresentate dunque le principali destinazioni di questi rifiuti.

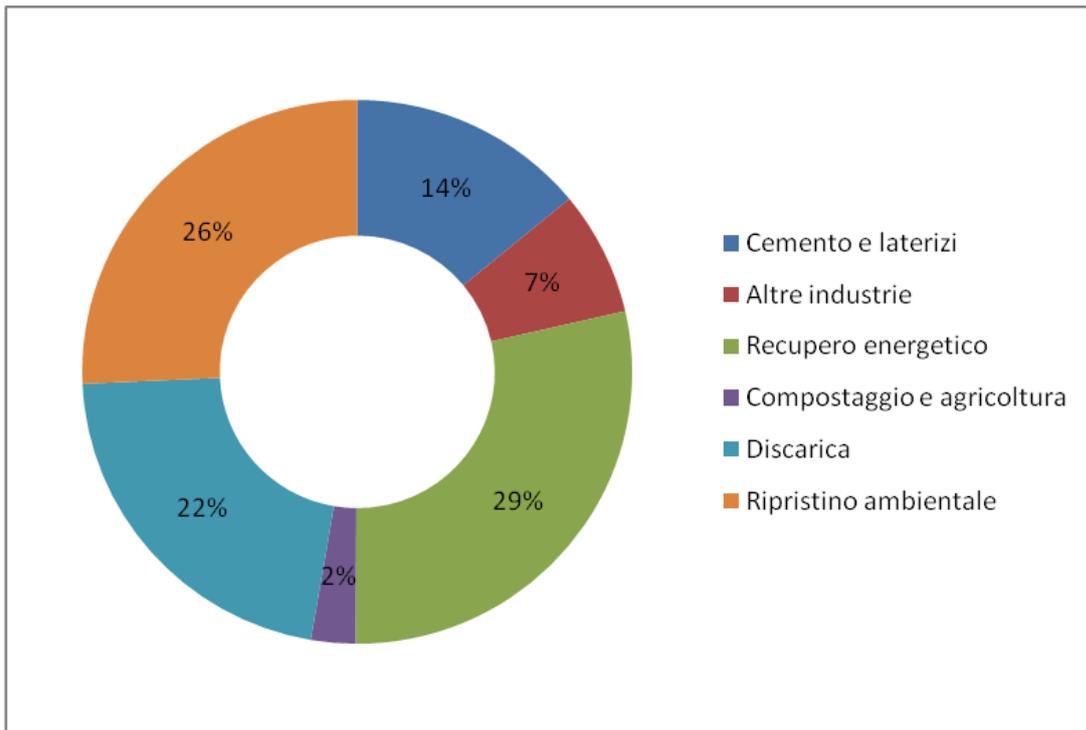


Figura 1.6 - Destinazione dei residui di cartiera [7]

Da notare come ad oggi, circa il 26% dei residui di cartiera venga impiegato per ripristini ambientali, tipologia di recupero che interessa ai fini di questo elaborato. Come è stato detto, i fanghi vengono prodotti dal processo di depurazione delle acque e dal processo di riciclo della carta da macero.

Anche a livello europeo, nella maggior parte dei Paesi Capi (*Confederation of European Paper Industries*) si è potuto osservare un crescente ricorso a opzioni più efficienti di recupero dei residui dell'industria cartaria e una costante diminuzione della quota di rifiuti inviati in discarica. In figura 1.7 è rappresentata l'evoluzione delle destinazioni di tali rifiuti dal 1990 al 2002 negli stati Capi. Tuttavia la legislazione vigente purtroppo ancora penalizza tali rifiuti e non consente un completo sfruttamento delle elevate potenzialità di queste risorse. Non tutti gli stati membri riconoscono infatti i rifiuti dell'industria cartaria come fonte di energia rinnovabile. La legislazione UE considera i residui cartari come rifiuti veri e propri quindi la loro gestione necessita di specifici permessi, rendendo in alcuni casi più semplice lo smaltimento in discarica[7].

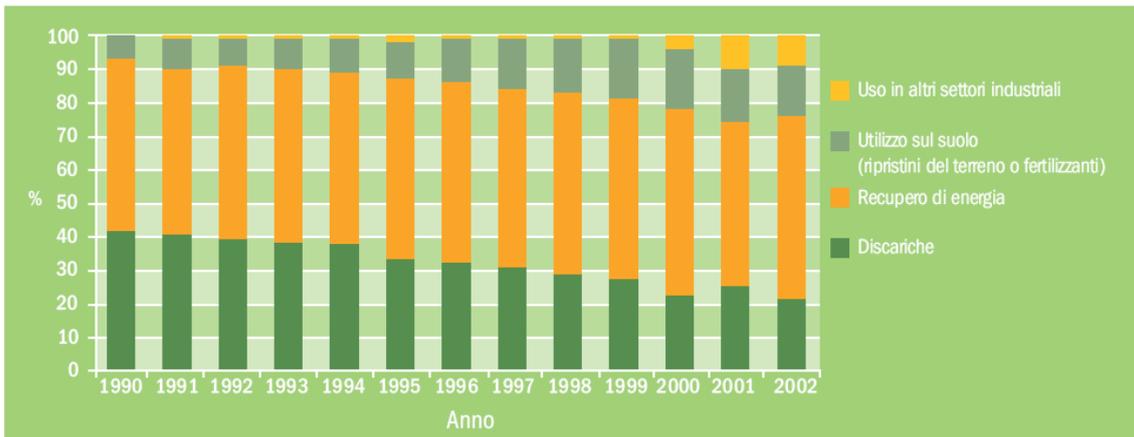


Figura 1.7 – Residui dell’industria cartaria [7]

Dal punto di vista normativo, in Italia, per questa tipologia di rifiuti si fa riferimento alla descrizione presente nell’Allegato 1 Suballegato 1: “norme tecniche generali per il recupero di materia dai rifiuti non pericolosi”, del Decreto Ministeriale del 5 febbraio 1998, ”Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22” [9], di cui si parlerà dettagliatamente nel capitolo seguente.

In primo luogo viene indicata la tipologia di fanghi e i codici CER corrispondenti:

“**fanghi da industria cartaria** [030302] [030305] [030309] [030310] [030311] [030399].”

Ad essi corrispondono:

- 03.03.02 Fanghi di recupero da bagni di macerazione (green liquor);
- 03.03.05 Fanghi prodotti dai processi di disinchiostrazione nel riciclaggio della carta;
- 03.03.09 Fanghi di scarto contenenti carbonato di calcio;
- 03.03.10 Scarti di fibre e fanghi contenenti fibre, riempitivi e prodotti di rivestimento generati dai processi di separazione meccanica;
- 03.03.11 Fanghi prodotti da trattamento in loco degli effluenti (diversi da 03.03.10);
- 03.03.99 Rifiuti non specificati altrimenti.

Viene quindi indicata la provenienza e le caratteristiche del rifiuto, ovvero rifiuti provenienti da “depurazione acque di processo e reflue delle industrie cartarie”, con caratteristica di “fango palabile”.

Il Decreto elenca inoltre le possibili attività di recupero:

- a) industria cartaria per produzione pasta di carta e di carta di bassa qualità [R3];*
- b) industria dei laterizi e dell'argilla espansa [R5];*
- c) cementifici [R5] [con esclusione del rifiuto 030311];*
- d) produzione di conglomerati cementizi [con esclusione del rifiuto 030311];*
- e) produzione di pannelli in fibra [con esclusione del rifiuto 030311] [R3];*
- f) **utilizzo per recuperi ambientali**; la percentuale di fango utilizzabile in miscela con il terreno non dovrà essere superiore al 30% in peso per fanghi al 27% minimo di sostanza secca. I fanghi dovranno avere le seguenti caratteristiche: Hg totale $\leq 1,5$ mg/kg SS, Cd totale $\leq 1,5$ mg/kg SS, Cr VI ≤ 0.5 mg/kg SS, Ni totale ≤ 30 mg/kg SS, Pb totale ≤ 40 mg/kg SS, Cu totale ≤ 150 mg/kg SS, Zn totale ≤ 500 mg/kg SS. (il recupero è subordinato all'esecuzione del test di cessione sul rifiuto tal quale secondo il metodo in allegato 3 al presente decreto, ad esclusione del parametro COD) [R10] [con esclusione dei rifiuti 030311];*
- g) utilizzo per la copertura di discariche per RSU; la percentuale di rifiuto utilizzabile in miscela con la materia prima non dovrà essere superiore al 30% in peso (il recupero è subordinato all'esecuzione del test di cessione sul rifiuto tal quale secondo il metodo in allegato 3 al presente decreto) [R5].*

Infine il Decreto elenca le caratteristiche delle materie prime e/o dei prodotti ottenuti:

- a) pasta di carta e carta di bassa qualità nelle forme usualmente commercializzate;*
- b) laterizi e argilla espansa nelle forme usualmente commercializzate;*
- c) cemento nelle forme usualmente commercializzate;*
- d) conglomerati cementizi nelle forme usualmente commercializzate;*
- e) pannelli in fibra nelle forme usualmente commercializzate.*

Nell'articolo 5 di tale decreto sono definite le attività di “recupero ambientale” come attività che “consistono nella restituzione di aree degradate ad usi produttivi o sociali attraverso rimodellamenti morfologici.”

Si precisa che tale decreto è stato sostituito dal Decreto Legislativo 3 Aprile 2006, n°152, “Norme in materia ambientale” [1]. All’articolo 240 del titolo V, parte IV di tale decreto viene definito “Ripristino e ripristino ambientale”, **“gli interventi di riqualificazione ambientale e paesaggistica, anche costituenti complemento degli interventi di bonifica o messa in sicurezza permanente, che consentono di recuperare il sito alla effettiva e definitiva fruibilità per la destinazione d’uso conforme agli strumenti urbanistici”**.

Nell’anno 2007 l’utilizzo per recuperi ambientali dei rifiuti della produzione e della lavorazione di polpa, carta e cartone ammontava a 216.903 tonnellate, rispetto ad un totale di utilizzi per recuperi ambientali di tutte le tipologie di rifiuti ammessi di 8.906.437 tonnellate [10].

Ai sensi del DM 5 febbraio 1998 il recupero **R10 (Spandimento sul suolo a beneficio dell’agricoltura e dell’ecologia)** riguarda infatti molte altre tipologie di rifiuti non pericolosi oltre ai fanghi dell’industria cartaria. Se ne riportano di seguito alcuni:

- Scorie di acciaierie, scorie provenienti dalla fusione in forni elettrici, a combustibile o in convertitori a ossigeno di leghe di metalli ferrosi e dai successivi trattamenti di affinazione delle stesse [100202] [100903] [100201]. Provenienti da fonderie di seconda fusione di ghisa e di acciaio, produzione di ferroleghe, industria siderurgica.

Tra i rifiuti ceramici e inerti troviamo ad esempio:

- Rifiuti costituiti da laterizi, intonaci e conglomerati di cemento armato e non, comprese le traverse e i traversoni ferroviari e i pali in calcestruzzo armato provenienti da linee ferroviarie, telematiche ed elettriche e frammenti di rivestimenti stradali, purché privi di amianto. [101311] [170101] [170102] [170103] [170802] [170107] [170904] [200301]. Provenienti da attività di demolizione, frantumazione e costruzione selezione da RSU e/o RAU manutenzione reti attività di produzione di lastre e manufatti in fibrocemento.
- Rifiuti di rocce da cave autorizzate [010410] [010413] [010399] [010408] [010410] [010413]. Provenienti da attività di lavorazione dei materiali lapidei.
- Sfridi di laterizio cotto ed argilla espansa [101203] [101206] [101208]. Provenienti da attività di produzione di laterizi e di argilla espansa e perlite espansa.

- Rifiuti costituiti da pietrisco di vagliatura del calcare [010102] [020499] [020799] [010410] [020402] [020701] [010308] [010408] [100299]. Provenienti da attività industriali dello zucchero, dell'alcool, del lievito e dell'estrazione, lavorazione e taglio del calcare, industria siderurgica.

Tra i fanghi, oltre a quelli da industria cartaria:

- Fanghi di dragaggio [170506]. Provenienti da attività di dragaggio di fondali di laghi, dei canali navigabili o irrigui e corsi d'acqua (acque interne), pulizia di bacini idrici.
- Fanghi e polveri da segazione e lavorazione pietre, marmi e ardesie [010410] [010413] [010410] [010413]. Provenienti da lavorazione materiali lapidei di natura calcarea.
- Fanghi costituiti da inerti [010102] [010410] [010409] [010412] [010412]. Provenienti da chiarificazione o decantazione naturale di acque da lavaggio di inerti attività estrattive.
- Fanghi da cottura e da lavaggio del legno vergine [030199]. Provenienti da industria dei segati, tranciati, sfogliati e del pannello.
- Ceneri dalla combustione di biomasse (paglia, vinacce) ed affini legno, pannelli, fanghi di cartiere [190112] [190114] [190112] [190114] [100101] [100115] [100103] [100117]. Provenienti da impianti di recupero energetico di biomasse, legno e fanghi di cartiera.

1.6. Caratterizzazione fanghi di cartiera

Per le varie tipologie dei fanghi, sono disponibili sul web banche dati specializzate. “Phyllis” [11] riporta la composizione delle “biomasse e dei rifiuti” in generale e fornisce informazioni specifiche riguardo la composizione e le caratteristiche chimico-fisiche dei fanghi di cartiera (*paper sludge*).

I fanghi vengono così classificati:

- paper de-inking sludge
- paper mill sludge cake
- paper primary sludge
- paper residue sludge
- paper residue sludge, granulates
- paper sludge
- paper-mill sludge

- primary sludge, pulp & paper
- secondary sludge, pulp & paper
- sludge
- sludge, biological sludge
- sludge, clarifier sludge
- sludge, deinking sludge
- sludge, pulp & paper

Si riportano in Allegato dettagli relativi alla loro composizione.

CAPITOLO 2

INQUADRAMENTO NORMATIVO

2.1. Normativa italiana

Il questo capitolo viene indicata la normativa di riferimento in materia di rifiuti e gestione di siti contaminati. Verrà anche data indicazione della legislazione vigente durante l'intervento di risanamento riportato nel prossimo capitolo.

2.1.1. Norme in materia di gestione dei rifiuti

Il **Decreto Legislativo 5 Febbraio 1997, n.22**, “Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CEE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio” (**Decreto Ronchi**) fino alla pubblicazione del Decreto Legislativo 3 Aprile 2006, n. 152, “Norme in materia ambientale” (chiamato anche “Testo Unico Ambientale”), ha rivestito il ruolo di legge quadro in materia di rifiuti. La sua principale finalità consiste nella riduzione della quantità di rifiuti prodotta e il loro massimo riutilizzo.

Successivamente, per quanto riguarda le procedure di riutilizzo, è stato emanato il **Decreto Ministeriale 5 febbraio 1998**, “Individuazione rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli art. 31 e 33 del D.Lgs. 5 Febbraio 1997, n°22” (Decreto Ronchi). Si precisa che nonostante il Decreto Ronchi sia stato abrogato dal Decreto Legislativo 3 Aprile 2006, n. 152, i suoi provvedimenti attuativi continuano ad applicarsi fino all'entrata in vigore dei corrispondenti provvedimenti attuativi di tale decreto.

- **Decreto Legislativo 5 Febbraio 1997, n. 22 (Decreto Ronchi), oggi abrogato dal D.L. del 3 Aprile, n. 152**

L'**articolo 31** del decreto, premesso che *“le procedure semplificate devono comunque garantire un elevato livello di protezione ambientale e controlli efficaci”*, precisa che: *“con decreti del Ministro dell'Ambiente [...] sono adottate per ciascun tipo di attività le norme, che fissano i tipi e le quantità di rifiuti e le condizioni in base alle quali [...] le attività di recupero di cui all'allegato C sono sottoposte alle procedure semplificate di cui agli articoli 32 e 33”*.

L'**articolo 33** precisa quelle sono le *“operazioni di recupero”*:

1. A condizione che siano rispettate le norme tecniche e le prescrizioni specifiche adottate ai sensi dei commi 1, 2 e 3 dell'articolo 31, l'esercizio delle operazioni di recupero dei rifiuti possono essere intraprese decorsi novanta giorni dalla comunicazione di inizio di attività alla provincia territorialmente competente.

2. Le condizioni e le norme tecniche di cui al comma 1, in relazione a ciascun tipo di attività, prevedono in particolare:

a) per i rifiuti non pericolosi:

1. le quantità massime impiegabili;

2. la provenienza, i tipi e le caratteristiche dei rifiuti utilizzabili nonché le condizioni specifiche alle quali le attività medesime sono sottoposte alla disciplina prevista dal presente articolo;

3. le prescrizioni necessarie per assicurare che, in relazione ai tipi od alle quantità dei rifiuti ed ai metodi di recupero, i rifiuti stessi siano recuperati senza pericolo per la salute dell'uomo e senza usare procedimenti o metodi che potrebbero recare pregiudizio all'ambiente;

3. La provincia iscrive in un apposito registro le imprese che effettuano la comunicazione di inizio di attività ed entro il termine di cui al comma 1 verifica d'ufficio la sussistenza dei presupposti e dei requisiti richiesti. A tal fine alla comunicazione di inizio di attività è allegata una relazione dalla quale deve risultare:

a) il rispetto delle norme tecniche e delle condizioni specifiche di cui al comma 1;

b) il possesso dei requisiti soggettivi richiesti per la gestione dei rifiuti;

c) le attività di recupero che si intendono svolgere;

d) stabilimento, capacità di recupero e ciclo di trattamento o di combustione nel quale i rifiuti stessi sono destinati ad essere recuperati;

e) le caratteristiche merceologiche dei prodotti derivanti dai cicli di recupero.

- **Decreto Ministeriale 5 febbraio 1998. Ancora in vigore. Si precisa che le parti riportate sono aggiornate con le modifiche intervenute sino ad ora, tra cui quelle apportate dal D.M. 5 aprile 2006, n. 186.**

L'articolo 1 precisa quelli che sono i "principi generali":

1. Le attività, i procedimenti ed i metodi di recupero di ciascuna delle tipologie di rifiuti individuati dal presente decreto non devono costituire un pericolo per la salute dell'uomo e recare pregiudizio all'ambiente ed in particolare non devono:

- a) creare rischi per l'acqua, l'aria, il suolo e per la fauna e la flora;*
- b) causare inconvenienti da rumori ed odori;*
- c) danneggiare il paesaggio ed i siti di particolare interesse.*

2. Negli allegati 1, 2 e 3 sono definite le norme tecniche generali che, ai fini del comma 1, individuano i tipi di rifiuto non pericolosi e fissano, per ciascun tipo di rifiuto e per ogni attività e metodo di recupero degli stessi, le condizioni specifiche in base alle quali l'esercizio di tali attività è sottoposto alle procedure semplificate di cui all'articolo 33, del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22 e successive modifiche ed integrazioni.

4. Le procedure semplificate disciplinate dal presente decreto si applicano esclusivamente alle operazioni di recupero specificate ed ai rifiuti individuati dai rispettivi codici e descritti negli allegati.

L'**articolo 5** spiega in cosa consistono le attività di "recupero ambientale" e spiega l'utilizzo dei rifiuti nelle attività di questo tipo:

1. Le attività di recupero ambientale individuate nell'allegato, consistono nella restituzione di aree degradate ad usi produttivi o sociali attraverso rimodellamenti morfologici.

2. L'utilizzo dei rifiuti nelle attività di recupero di cui al comma 1 è sottoposto alle procedure semplificate previste dall'articolo 33, del decreto legislativo 5 febbraio 1997 n. 22, a condizione che:

- a) i rifiuti non siano pericolosi;*
- b) sia previsto e disciplinato da apposito progetto approvato dall'autorità competente;*
- c) sia effettuato nel rispetto delle norme tecniche e delle condizioni specifiche previste dal presente decreto per la singola tipologia di rifiuto impiegato, nonché nel rispetto del progetto di cui alla lettera b);*
- d) sia compatibile con le caratteristiche chimico-fisiche, idrogeologiche e geomorfologiche dell'area da recuperare;*
- d-bis) in ogni caso, il contenuto dei contaminanti sia conforme a quanto previsto dalla legislazione vigente in materia di messa in sicurezza, bonifica e ripristino ambientale dei siti inquinati, in funzione della specifica destinazione d'uso del sito.*

2.1.2. Norme in materia di siti contaminati

Fino al 2006 le norme in materia di siti contaminati sono state descritte dal **Decreto Legislativo 5 Febbraio 1997, n°22**, “Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/61/CEE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio” (**Decreto Ronchi**), e dal successivo **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'articolo 17 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22, e successive modificazioni e integrazioni”. Come già precisato, il Decreto Ronchi è stato abrogato dal Decreto Legislativo 3 Aprile 2006, n°152, “Norme in materia ambientale” e la disciplina della bonifica e del ripristino ambientale dei siti inquinati oggi è dettata dal Titolo V, Parte IV di tale decreto, dagli articoli 239 al 253 e dall'articolo 257 che regola l'apparato sanzionatorio.

- **Decreto Legislativo 5 Febbraio 1997, n. 22 (Decreto Ronchi)**

Il Decreto Ronchi, all'**articolo 17** (*Bonifica e ripristino ambientale dei siti inquinati da rifiuti*) afferma:

2. Chiunque cagiona, anche in maniera accidentale, il superamento dei limiti di cui al comma 1, lettera a), ovvero determina un pericolo concreto ed attuale di superamento dei limiti medesimi, è tenuto a procedere a proprie spese agli interventi di messa in sicurezza, di bonifica e di ripristino ambientale delle aree inquinate e degli impianti dai quali deriva il pericolo di inquinamento. A tal fine:

a) deve essere data, entro 48 ore, notifica al Comune, alla Provincia ed alla Regione territorialmente competenti, nonché agli organi di controllo sanitario e ambientale, della situazione di inquinamento ovvero del pericolo concreto ed attuale di inquinamento del sito;

b) entro le quarantotto ore successive alla notifica di cui alla lettera a), deve essere data comunicazione al Comune ed alla Provincia ed alla Regione territorialmente competenti degli interventi di messa in sicurezza adottati per non aggravare la situazione di inquinamento o di pericolo di inquinamento, contenere gli effetti e ridurre il rischio sanitario ed ambientale;

c) entro trenta giorni dall'evento che ha determinato l'inquinamento ovvero dalla individuazione della situazione di pericolo, deve essere presentato al Comune ed alla Regione il progetto di bonifica delle aree inquinate.

4. Il Comune approva il progetto ed autorizza la realizzazione degli interventi previsti entro novanta giorni dalla data di presentazione del progetto medesimo e ne dà comunicazione alla Regione. L'autorizzazione indica le eventuali modifiche ed integrazioni del progetto presentato, ne fissa i tempi, anche intermedi, di esecuzione, e stabilisce le garanzie finanziarie che devono essere prestate a favore della Regione per la realizzazione e l'esercizio degli impianti previsti dal progetto di bonifica medesimo. Se l'intervento di bonifica e di messa in sicurezza riguarda un'area compresa nel territorio di più Comuni il progetto e gli interventi sono approvati ed autorizzati dalla Regione.

6. Qualora la destinazione d'uso prevista dagli strumenti urbanistici in vigore imponga il rispetto di limiti di accettabilità di contaminazione che non possono essere raggiunti neppure con l'applicazione delle migliori tecnologie disponibili a costi sopportabili, l'autorizzazione di cui al comma 4 può prescrivere l'adozione di misure di sicurezza volte ad impedire danni derivanti dall'inquinamento residuo, da attuarsi in via prioritaria con l'impiego di tecniche e di ingegneria ambientale, nonché limitazioni temporanee o permanenti all'utilizzo dell'area bonificata rispetto alle previsioni degli strumenti urbanistici vigenti, ovvero particolari modalità per l'utilizzo dell'area medesima. Tali prescrizioni comportano, ove occorra, variazione degli strumenti urbanistici e dei piani territoriali.

11-bis. Nel caso in cui il sito inquinato sia soggetto a sequestro, l'autorità giudiziaria che lo ha disposto autorizza l'accesso al sito per l'esecuzione degli interventi di messa in sicurezza, bonifica e ripristino ambientale delle aree, anche al fine di impedire l'ulteriore propagazione degli inquinanti ed il conseguente peggioramento della situazione ambientale.

13-ter. Gli interventi di messa in sicurezza, di bonifica e di ripristino ambientale previsti dal presente articolo vengono effettuati indipendentemente dalla tipologia, dalle dimensioni e dalle caratteristiche dei siti inquinati nonché dalla natura degli inquinamenti.

- **Decreto Ministeriale 25 ottobre 1999 n. 471. Ancora in vigore.**

L'articolo 1 è relativo al “campo di applicazione”:

1. Il presente regolamento stabilisce i criteri, le procedure e le modalità per la messa in sicurezza, la bonifica ed il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi dell'articolo 17, del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22, e successive modifiche ed integrazioni. A tal fine disciplina:

- a- i limiti di accettabilità della contaminazione dei suoli, delle acque superficiali e delle acque sotterranee in relazione alla specifica destinazione d'uso dei siti;*
- b- le procedure di riferimento per il prelievo e l'analisi dei campioni;*
- c- i criteri generali per la messa in sicurezza, la bonifica ed il ripristino ambientale dei siti inquinati, nonché per la redazione dei relativi progetti;*
- d- i criteri per le operazioni di bonifica di suoli e falde acquifere che facciano ricorso a batteri, a ceppi batterici mutanti, a stimolanti di batteri naturalmente presenti nel suolo.*

L'**articolo 2** introduce alcune importanti “definizioni”,

L'**Articolo 6** regola gli “Interventi di messa in sicurezza permanente e ripristino ambientale”:

1. Qualora la fonte inquinante sia costituita da rifiuti stoccati ed il progetto preliminare di cui all'articolo 10 dimostri che, nonostante l'applicazione delle migliori tecnologie disponibili a costi sopportabili, secondo i principi della normativa comunitaria, non sia possibile la rimozione dei rifiuti stessi, il Comune o, se l'intervento riguarda un'area compresa nel territorio di più comuni, la Regione, può autorizzare interventi di messa in sicurezza permanente e ripristino ambientale, eventualmente prevedendo interventi di Ingegneria naturalistica.

L'**articolo 10** riguarda “l'approvazione del progetto ed autorizzazione degli interventi di bonifica, ripristino ambientale e di messa in sicurezza permanente”.

Infine l'**articolo 11** è relativo alla “Progettazione per fasi”.

- **Decreto Legislativo 3 Aprile 2006, n°152, Titolo V, Parte IV**

Il Titolo V del Testo è stato emanato da parte del Legislatore con finalità quali:

- Riordino e coordinamento delle disposizioni di settore attraverso l'individuazione ed abrogazione delle norme incompatibili con la nuova disciplina e la predisposizione di un regime transitorio che fa salve le fonti secondarie vigenti fino all'adozione dei nuovi provvedimenti;
- Accelerazione delle operazioni di bonifica mediante snellimento delle procedure relative.

La parte relativa ai principi generali ed alla relativa applicazione della disciplina è contenuta nell'**articolo 239**:

1. Il presente titolo disciplina gli interventi di bonifica e ripristino ambientale dei siti contaminati e definisce le procedure, i criteri e le modalità per lo svolgimento delle

operazioni necessarie per l'eliminazione delle sorgenti dell'inquinamento e comunque per la riduzione delle concentrazioni di sostanze inquinanti, in armonia con i principi e le norme comunitari, con particolare riferimento al principio "chi inquina paga".

2. Ferma restando la disciplina dettata dal titolo I della parte quarta del presente decreto, le disposizioni del presente titolo non si applicano:

a) all'abbandono dei rifiuti disciplinato dalla parte quarta del presente decreto.

In tal caso qualora, a seguito della rimozione, avvio a recupero, smaltimento dei rifiuti abbandonati o depositati in modo incontrollato, si accerti il superamento dei valori di attenzione, si dovrà procedere alla caratterizzazione dell'area ai fini degli eventuali interventi di bonifica e ripristino ambientale da effettuare ai sensi del presente titolo;

b) agli interventi di bonifica disciplinati da leggi speciali, se non nei limiti di quanto espressamente richiamato dalle medesime o di quanto dalle stesse non disciplinato.

3. Gli interventi di bonifica e ripristino ambientale per le aree caratterizzate da inquinamento diffuso sono disciplinati dalle regioni con appositi piani, fatte salve le competenze e le procedure previste per i siti oggetto di bonifica di interesse nazionale e comunque nel rispetto dei criteri generali di cui al presente titolo.

Nell'**articolo 240** vengono indicate le definizioni necessarie ai fini dell'applicazione del titolo. Ne sono di seguito riportate alcune:

sito: l'area o porzione di territorio, geograficamente definita e determinata, intesa nelle diverse matrici ambientali (suolo, sottosuolo ed acque sotterranee) e comprensiva delle eventuali strutture edilizie e impiantistiche presenti;

concentrazioni soglia di contaminazione (CSC): i livelli di contaminazione delle matrici ambientali che costituiscono valori al di sopra dei quali e' necessaria la caratterizzazione del sito e l'analisi di rischio sito specifica, come individuati nell'Allegato 5 alla parte quarta del presente decreto. Nel caso in cui il sito potenzialmente contaminato sia ubicato in un'area interessata da fenomeni antropici o naturali che abbiano determinato il superamento di una o più concentrazioni soglia di contaminazione, queste ultime si assumono pari al valore di fondo esistente per tutti i parametri superati;

concentrazioni soglia di rischio (CSR): i livelli di contaminazione delle matrici ambientali, da determinare caso per caso con l'applicazione della procedura di analisi di

rischio sito specifica secondo i principi illustrati nell'Allegato 1 alla parte quarta del presente decreto e sulla base dei risultati del piano di caratterizzazione, il cui superamento richiede la messa in sicurezza e la bonifica. I livelli di concentrazione così definiti costituiscono i livelli di accettabilità per il sito;

sito potenzialmente contaminato: un sito nel quale uno o più valori di concentrazione delle sostanze inquinanti rilevati nelle matrici ambientali risultino superiori ai valori di concentrazione soglia di contaminazione (CSC), in attesa di espletare le operazioni di caratterizzazione e di analisi di rischio sanitario e ambientale sito specifica, che ne permettano di determinare lo stato o meno di contaminazione sulla base delle concentrazioni soglia di rischio (CSR);

sito contaminato: un sito nel quale i valori delle concentrazioni soglia di rischio (CSR), determinati con l'applicazione della procedura di analisi di rischio di cui all'Allegato 1 alla parte quarta del presente decreto sulla base dei risultati del piano di caratterizzazione, risultano superati;

sito non contaminato: un sito nel quale la contaminazione rilevata nelle matrici ambientali risulti inferiore ai valori di concentrazione soglia di contaminazione (CSC) oppure, se superiore, risulti comunque inferiore ai valori di concentrazione soglia di rischio (CSR) determinate a seguito dell'analisi di rischio sanitario e ambientale sito specifica;

messa in sicurezza d'emergenza: ogni intervento immediato o a breve termine, da mettere in opera nelle condizioni di emergenza di cui alla lettera t) in caso di eventi di contaminazione repentini di qualsiasi natura, atto a contenere la diffusione delle sorgenti primarie di contaminazione, impedirne il contatto con altre matrici presenti nel sito e a rimuoverle, in attesa di eventuali ulteriori interventi di bonifica o di messa in sicurezza operativa o permanente;

messa in sicurezza operativa: l'insieme degli interventi eseguiti in un sito con attività in esercizio atti a garantire un adeguato livello di sicurezza per le persone e per l'ambiente, in attesa di ulteriori interventi di messa in sicurezza permanente o bonifica da realizzarsi alla cessazione dell'attività. Essi comprendono altresì gli interventi di contenimento della contaminazione da mettere in atto in via transitoria fino all'esecuzione della bonifica o della messa in sicurezza permanente, al fine di evitare la diffusione della contaminazione all'interno della stessa matrice o tra matrici differenti. In tali casi devono essere predisposti idonei piani di monitoraggio e controllo che consentano di verificare l'efficacia delle soluzioni adottate;

messa in sicurezza permanente: l'insieme degli interventi atti a isolare in modo definitivo le fonti inquinanti rispetto alle matrici ambientali circostanti e a garantire un elevato e definitivo livello di sicurezza per le persone e per l'ambiente. In tali casi devono essere previsti piani di monitoraggio e controllo e limitazioni d'uso rispetto alle previsioni degli strumenti urbanistici;

bonifica: l'insieme degli interventi atti ad eliminare le fonti di inquinamento e le sostanze inquinanti o a ridurre le concentrazioni delle stesse presenti nel suolo, nel sottosuolo e nelle acque sotterranee ad un livello uguale o inferiore ai valori delle concentrazioni soglia di rischio (CSR);

ripristino e ripristino ambientale: gli interventi di riqualificazione ambientale e paesaggistica, anche costituenti complemento degli interventi di bonifica o messa in sicurezza permanente, che consentono di recuperare il sito alla effettiva e definitiva fruibilità per la destinazione d'uso conforme agli strumenti urbanistici;

Nell'**articolo 242** sono invece descritte le procedure operative ed amministrative.

Si riporta in figura 2.1 uno schema sintetico dell'evoluzione della normativa vigente in tema di gestione dei rifiuti e siti contaminati in Italia.

La bonifica di suoli e siti contaminati è una delle più rilevanti problematiche emergenti per gli interventi di recupero e di risanamento ambientale, e riguarda tutto il territorio nazionale.

Con il termine "sito contaminato" ci si riferisce a tutte quelle aree nelle quali, in seguito ad attività umane svolte o in corso, è stata accertata un'alterazione delle caratteristiche qualitative dei terreni, delle acque superficiali e sotterranee, le cui concentrazioni superano quelle imposte dalla normativa [1].

La caratterizzazione dei siti contaminati rappresenta le indagini (sondaggi, piezometri, analisi chimiche etc.) condotte in un sito contaminato o ritenuto potenzialmente tale, il cui scopo principale è quello di definire l'assetto geologico e idrogeologico, verificare la presenza o meno di contaminazione nei suoli e nelle acque e sviluppare un modello concettuale del sito [1].

Nelle aree interessate si rende quindi necessario intervenire e provvedere alla bonifica dei terreni o alla messa in sicurezza, al fine di prevenire il rischio di esposizione di persone a sostanze pericolose per la salute, impedire la diffusione della contaminazione nel suolo e nelle altre matrici ambientali e definire la disponibilità dell'utilizzo futuro di tali aree per nuove attività [2].

Non tutti i progetti di bonifica richiedono gli stessi oneri in termini di costi e di lavoro. La decontaminazione di un sito si impone di regola quando la necessità del risanamento è data dalla presenza di composti organici persistenti o metalli pesanti. In molti casi la decontaminazione consiste nella rimozione del materiale inquinato mediante lo scavo ed il suo smaltimento esterno. In questi casi va appurato se è possibile procedere ad una separazione dal materiale delle frazioni di rifiuti combustibili o riciclabili [3].

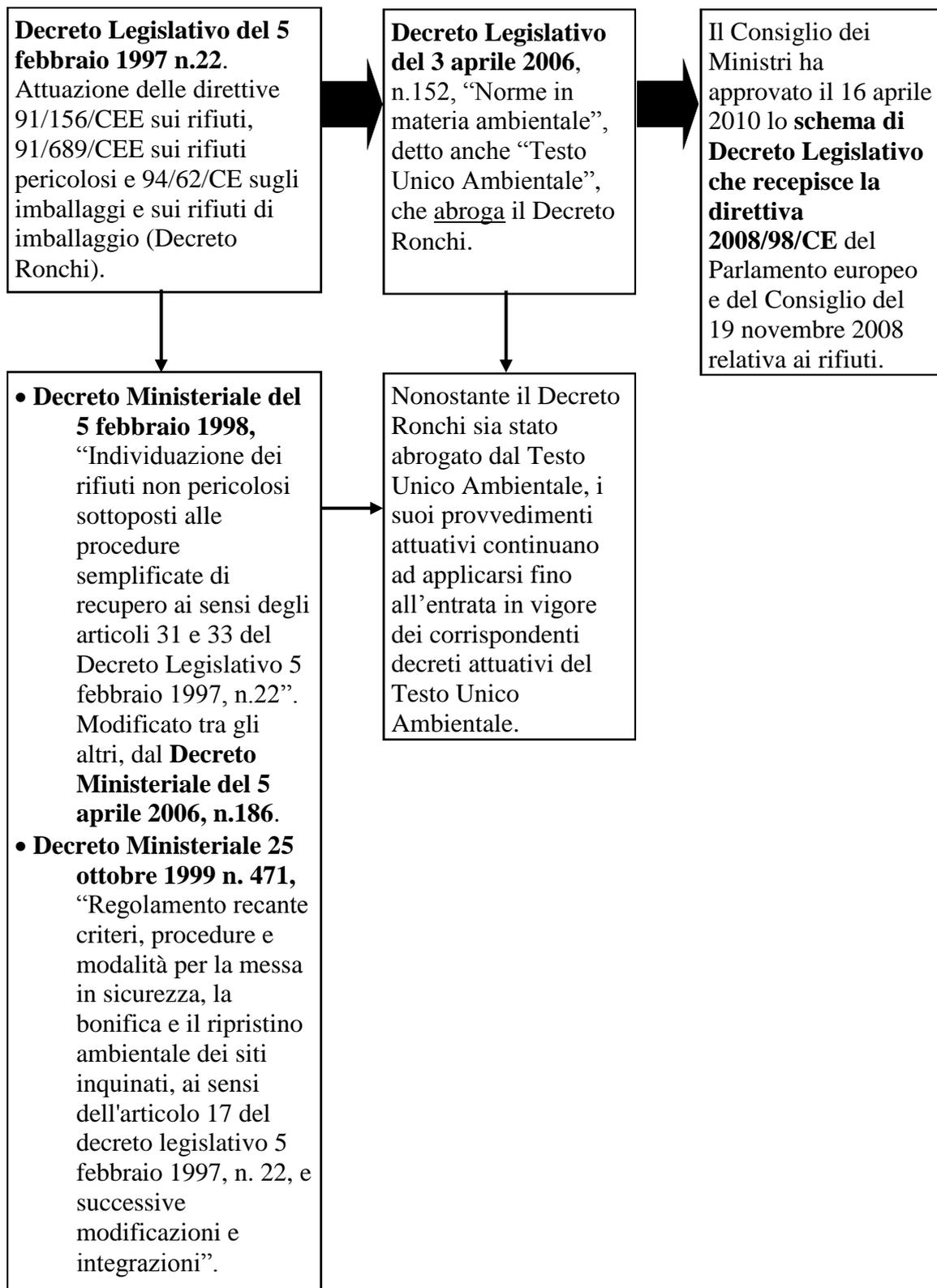


Figura 2.1 - Evoluzione della normativa vigente in Italia

2.2. Normativa europea

Attualmente in materia di rifiuti il principale riferimento normativo è rappresentato dalla **Direttiva 2006/12/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 5 aprile 2006** relativa ai rifiuti. Questa direttiva codifica e sostituisce la direttiva **75/442/CEE del Consiglio del 15 luglio 1975** relativa ai rifiuti e le sue successive modifiche. Questa codificazione si propone di chiarire e razionalizzare la legislazione in materia di rifiuti senza modificare il contenuto delle norme da applicare e rappresenta la base della legislazione europea in materia di rifiuti. Si precisa che questa direttiva è abrogata dalla **Direttiva 2008/98/CE** di cui si parlerà più avanti, a decorrere dal 12 dicembre 2010.

La **Direttiva 2006/12/CE** stabilisce il quadro normativo per il trattamento dei rifiuti nella Comunità, definisce alcuni concetti basilari, come le nozioni di rifiuto, recupero e smaltimento, e stabilisce gli obblighi essenziali per la gestione dei rifiuti, in particolare un obbligo di autorizzazione e di registrazione per un ente o un'impresa che effettua le operazioni di gestione dei rifiuti e un obbligo per gli Stati membri di elaborare piani per la gestione dei rifiuti. Stabilisce inoltre principi fondamentali come l'obbligo di trattare i rifiuti in modo da evitare impatti negativi sull'ambiente e sulla salute umana, un incentivo ad applicare la gerarchia dei rifiuti e, secondo il principio «chi inquina paga», il requisito che i costi dello smaltimento dei rifiuti siano sostenuti dal detentore dei rifiuti, dai detentori precedenti o dai produttori del prodotto causa dei rifiuti.

All' **articolo 3** viene detto che *gli stati membri adottano le misure appropriate per promuovere: in primo luogo la prevenzione o la riduzione della produzione e della nocività dei rifiuti [...] in secondo luogo: il recupero dei rifiuti mediante riciclo, reimpiego, riutilizzo o ogni altra azione intesa a ottenere materie prime secondarie o l'uso di rifiuti come fonte di energia.*

Nell'articolo 4 si legge

1. *Gli Stati membri adottano le misure necessarie per assicurare che i rifiuti siano recuperati o smaltiti senza pericolo per la salute dell'uomo e senza usare procedimenti o metodi che potrebbero recare pregiudizio all'ambiente e in particolare:*
 - *senza creare rischi per l'acqua, l'aria, il suolo e per la fauna e la flora;*
 - *senza causare inconvenienti da rumori od odori;*
 - *senza danneggiare il paesaggio e i siti di particolare interesse.*

2. *Gli Stati membri adottano inoltre le misure necessarie per vietare l'abbandono, lo scarico e lo smaltimento incontrollato dei rifiuti.*

Articolo 5

1. *Gli Stati membri, di concerto con altri Stati membri qualora ciò risulti necessario od opportuno, adottano le misure appropriate per la creazione di una rete integrata e adeguata di impianti di smaltimento, che tenga conto delle tecnologie più perfezionate a disposizione che non comportino costi eccessivi. Questa rete deve consentire alla Comunità nel suo insieme di raggiungere l'autosufficienza in materia di smaltimento dei rifiuti e ai singoli Stati membri di mirare al conseguimento di tale obiettivo, tenendo conto del contesto geografico o della necessità di impianti specializzati per determinati tipi di rifiuti.*

2. *Tale rete deve permettere lo smaltimento dei rifiuti in uno degli impianti appropriati più vicini, grazie all'utilizzazione dei metodi e delle tecnologie più idonei a garantire un alto grado di protezione dell'ambiente e della salute pubblica.*

Nell'allegato IIB a tale direttiva vengono elencate le operazioni di recupero, tra cui troviamo R10: "Spandimento sul suolo a beneficio dell'agricoltura o dell'ecologia".

Oggi la **Direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 19 novembre 2008**, relativa ai rifiuti ha abrogato le direttive 75/439/CEE relativa ai rifiuti, la Direttiva 91/689/CEE relativa ai rifiuti pericolosi e la Direttiva 2006/12/CE.

In Italia, il consiglio dei Ministri ha approvato il 16 aprile 2010 lo schema di Decreto Legislativo che recepisce la Direttiva. Il provvedimento apporterà sostanziali modifiche alla parte IV del D.lgs. 152/2006 con la modifica di alcune definizioni come "rifiuto", "sottoprodotto", "combustibili da rifiuti" (cdr), "materie secondarie" e di alcuni aspetti come la responsabilità nella gestione dei rifiuti, il riutilizzo di terre e rocce da scavo e l'introduzione di specifiche norme sul Sistema per il Controllo della Tracciabilità dei Rifiuti (SISTR) [4].

La **direttiva 2008/98/CE stabilisce misure volte a proteggere l'ambiente e la salute umana prevenendo o riducendo gli impatti negativi della produzione e della gestione dei rifiuti, riducendo gli impatti complessivi dell'uso delle risorse e migliorandone l'efficacia.**

Sono esclusi dall'ambito di applicazione della direttiva gli effluenti gassosi, i rifiuti radioattivi, i materiali esplosivi in disuso, le materie fecali, le acque di scarico, i

sottoprodotti di origine animale, le carcasse di animali morti per cause diverse dalla macellazione e i rifiuti risultanti dalle risorse minerali.

Nell'**articolo 4** viene definita la "Gerarchia dei rifiuti":

1. *La seguente gerarchia dei rifiuti si applica quale ordine di priorità della normativa e della politica in materia di prevenzione e gestione dei rifiuti:*
 - a) *Prevenzione;*
 - b) *Preparazione per il riutilizzo;*
 - c) *Riciclaggio;*
 - d) *Recupero di altro tipo, per esempio il recupero di energia; e*
 - e) *Smaltimento.*
2. *Nell'applicare la gerarchia dei rifiuti [...] gli Stati Membri adottano misure volte a incoraggiare le opzioni che danno il miglior risultato ambientale complessivo [...]*

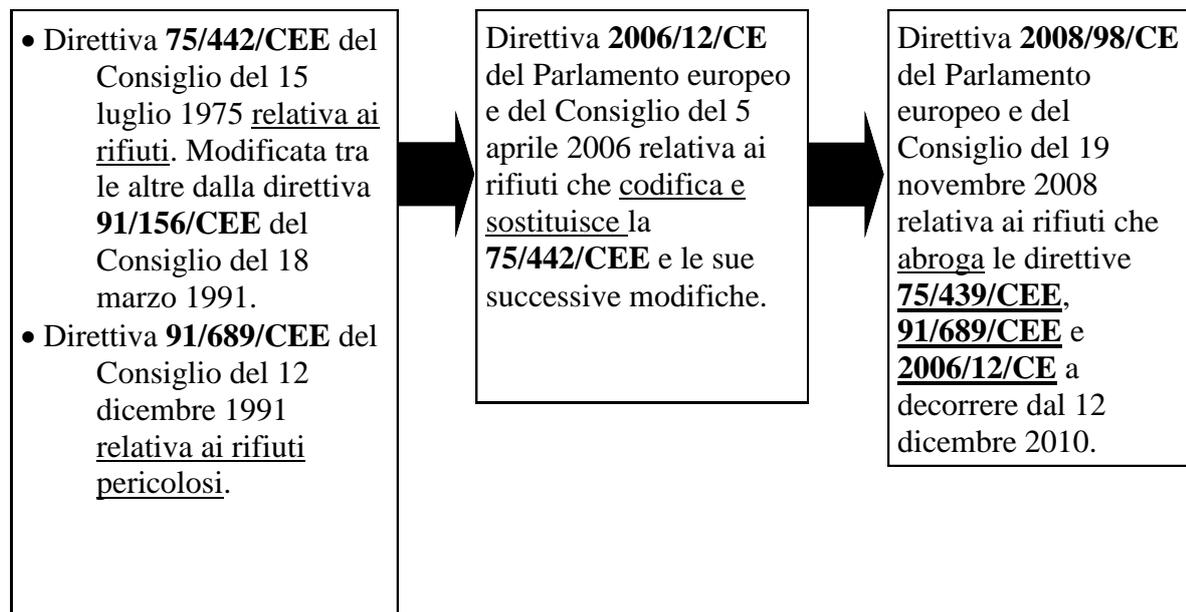
Uno dei punti salienti della direttiva è la definizione di "sottoprodotto", nell'articolo 5

1. *Una sostanza od oggetto derivante da un processo di produzione il cui scopo primario non è la produzione di tale articolo può non essere considerato rifiuto ai sensi dell'articolo 3, punto 1, bensì sottoprodotto soltanto se sono soddisfatte le seguenti condizioni:*
 - a) *È certo che la sostanza o l'oggetto sarà ulteriormente utilizzata/o;*
 - b) *La sostanza o l'oggetto può essere utilizzata/o direttamente senza alcun ulteriore trattamento diverso dalla normale pratica industriale;*
 - c) *La sostanza o l'oggetto è prodotta/o come parte integrante di un processo di produzione e*
 - d) *L'ulteriore utilizzo è legale, ossia la sostanza o l'oggetto soddisfa, per l'utilizzo specifico, tutti i requisiti pertinenti riguardanti i prodotti e la protezione della salute e dell'ambiente*

e non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o la salute umana.

Nell'allegato 2 tra le opzioni di recupero vi è **R10: "trattamento in ambiente terrestre a beneficio dell'agricoltura e dell'ecologia"**. La definizione di R10 è stata dunque modificata.

Si riporta in figura 2.2 uno schema sintetico dell'evoluzione della normativa vigente a livello Europeo.



2.2 - Schema dell'evoluzione della normativa a livello Europeo

CAPITOLO 3

IL CASO: FONDO COLOMBAROTTO

3.1. Introduzione

Questo capitolo riporta un rapido *excursus* dell'intervento di messa in sicurezza e bonifica di un sito oggetto di ripristino ambientale mediante l'impiego di fanghi di cartiera che, effettuato non correttamente, ha portato alla produzione di un'ingente quantità di biogas (metano e CO₂). La metodologia descritta è basata su una tecnologia innovativa brevettata (Amek S.c.r.l. Dom. Ital. N. RM2008A000500. *Process for methane production and emissions reduction from landfills and waste recovery sites* (2008)) e permette di stabilizzare i fanghi di cartiera accelerando la degradazione della componente cellulosa e di mitigare l'impatto ambientale tramite bioconversione del metano in CO₂.

Sono anche riportati i risultati del monitoraggio mensile tutt'ora in corso sulla concentrazione nel suolo di biogas (metano e CO₂) e ossigeno.

Per la scrittura di questo capitolo si è fatto riferimento ai contenuti di tre tesi di laurea, in particolare, le tesi di Modarelli (2008) e Ruffilli (2009) per quanto riguarda le descrizioni dell'intervento e i risultati ottenuti e la tesi di Salvatore (2008) relativamente al monitoraggio delle emissioni di biogas effettuato in una fase successiva all'intervento vero e proprio. Per un maggior approfondimento dell'argomento si rimanda dunque alla lettura di tali elaborati.

Il sito in esame è un'ex area di cava denominata "Fondo Colombarotto". È situato nel Comune di Imola, in località Piratello ed è stato oggetto di attività estrattiva di materiale argilloso negli anni ottanta.

Dal 13/6/2003 al 13/12/2004 l'area è stata interessata da un ripristino ambientale effettuato ai sensi del D.M. 5.2.98 per una superficie di 49.000 m², che aveva previsto l'utilizzo di fanghi provenienti da industria cartaria per 60.000 tonnellate, ed era stato autorizzato dall'ente provinciale per attività di recupero rifiuti come R10 "spandimento sul suolo a beneficio dell'agricoltura e dell'ecologia".

In riferimento alla classificazione fatta da "Phyllis", riportata in precedenza, i fanghi utilizzati sono:

1. Fanghi di cartiera (*paper sludge*);
2. Fanghi dai residui di carta (*paper residue sludge*);
3. Fanghi dai residui di carta, granulati (*paper residue sludge, granulates*);
4. Fanghi da chiarificatore (*sludge, clarifier sludge*);
5. Fanghi di disinchiostrazione (*sludge, deinking sludge*).

Nel Dicembre 2005 si sono verificate, a distanza di una settimana l'una dall'altra, due deflagrazioni all'interno di uno scantinato in un'abitazione di campagna distante circa 80 m dall'area di ex cava.

Nel Gennaio 2006, sono stati effettuati accertamenti per determinare l'origine del metano che ha causato le esplosioni. Le verifiche svolte sotto il controllo di ARPA E.R. hanno confermato che la loro origine era da attribuire alla produzione e migrazione di biogas dal "Fondo Colombarotto". In seguito sono state ordinate dal Comune di Imola ed eseguite sotto il controllo di ARPA E.R. delle verifiche tecniche sia nell'area di ripristino che nell'intorno, con l'installazione di sonde per la ricerca di biogas e con campioni con carotaggi [1]

Si è appurato che:

1. I fanghi conferiti appartenevano alle tipologie autorizzate;
2. In diversi punti i fanghi non erano stati miscelati con il terreno secondo le percentuali volumetriche stabilite dalla norma di riferimento;
3. La profondità di tombamento era eterogenea, anche di molto superiore a quella dichiarata ed arrivava fino a circa -9 m dal p.c.

In figura 3.1 è riportata una foto satellitare del Fondo Colombarotto, di cui è stato evidenziato il perimetro.

Sono state misurate elevate concentrazioni di gas metano all'interno dell'area di ripristino e a circa 100 metri di distanza, verso diversi bersagli sensibili. Il tombamento dei fanghi ha portato ad un accelerato processo di degradazione anaerobica della sostanza organica contenuta (prevalentemente cellulosa), determinando la produzione di una grande quantità di biogas.



Figura 3.1 - Il Fondo Colombarotto [1]

Occorre evidenziare come, ad oggi, casi di esplosioni causate da biogas siano stati riscontrati solo per discariche e non per ripristini ambientali con fanghi di cartiera. Inoltre, nonostante il ripristino ambientale fosse stato effettuato non correttamente in alcuni punti, i campionamenti eseguiti non hanno riscontrato nessun superamento delle concentrazioni massime sulle matrici acqua e suolo. Non si è quindi ricaduti nell'ambito della normativa vigente sui siti inquinati (DM 471/99), ma gli interventi condotti ai fini del risanamento dell'area sono stati eseguiti ricorrendo a procedure amministrative frutto di una valutazione sito specifica e non di una procedura standardizzata [1].

I fanghi di cartiera costituiscono una biomassa ad elevato contenuto organico, essendo formati soprattutto da materiali cellullosici e fibre di legno e sono molto utilizzati per ripristini ambientali a causa della loro stabilità in condizioni aerobiche. Ma durante le analisi di laboratorio effettuate per risolvere l'”inconveniente ambientale”, è stato scoperto che non c'è corrispondenza tra la loro stabilità in condizioni aerobiche ed anaerobiche. Sono infatti notoriamente molto stabili rispetto ad una degradazione aerobica, ovvero la degradazione aerobica è molto lenta, ma, al tempo stesso, sono facilmente degradabili per via anaerobica portando, nel tempo, alla produzione di metano. Nel caso in questione, data l'elevata quantità di fanghi presente, vi è stata

un'ingente produzione di biogas, essendo questo un prodotto finale delle reazioni di respirazione anaerobica.

La degradazione anaerobica è stata inoltre favorita dalla presenza di un cappellaccio argilloso e dall'assenza di inibenti (es. ammoniaca).

Per la messa in sicurezza del sito e la sua rinaturalizzazione, non essendoci tecnologie di riferimento sono state adottate nuove metodologie di *bioremediation*, in particolare un intervento innovativo di tipo fisico-meccanico e biologico. Il tipo di trattamento è sito specifico ed è basato sulla biostabilizzazione dei fanghi di cartiera [1].

Tale tecnologia innovativa sviluppata ha importanti vantaggi economico/ambientali e richiede l'intervento umano solo nella fase di preparazione, senza richiedere l'uso né di acqua né di energia elettrica. Alcuni di questi vantaggi sono:

- Minimizzazione dell'impatto acustico;
- Minimizzazione delle emissioni in atmosfera;
- Riduzione dell'impatto visivo al termine delle operazioni nel sito;
- Mitigazione dell'effetto serra;
- Riduzione dei costi di implementazione della tecnologia e gestionali;
- Minimizzazione degli inconvenienti per gli abitanti;
- Accelerato recupero del sito per l'agricoltura [2].

3.2. I gas serra e il metano: cenni

I gas ad effetto serra sono dei tipici costituenti gassosi dell'atmosfera, sia naturali che antropogenici, che assorbono ed emettono le radiazioni ad una specifica frequenza rispetto allo spettro delle radiazioni ad infrarosso emesso dalla superficie della Terra, dall'atmosfera e dalle nuvole. Il vapore acqueo (H_2O), il biossido di carbonio (CO_2), l'ossido nitroso (N_2O), il metano (CH_4) e l'ozono (O_3) sono i principali gas ad effetto serra naturalmente presenti nell'atmosfera terrestre. Secondo quanto definito dal Protocollo di Montreal, a questi composti si aggiungono una serie di altri gas ad effetto serra prodotti dall'uomo, come gli alogeno-carburi ed altre sostanze contenenti cloruri e alogenuri [3].

Secondo quanto definito dal protocollo di Kyoto, sono definiti gas ad effetto serra il biossido di carbonio (CO_2), l'ossido nitroso (N_2O), il metano (CH_4), l'esafluoruro di zolfo (SF_6), gli idrofluorocarburi (HFCs) ed i perfluorocarburi (PFCs).

Le concentrazioni globali in atmosfera del diossido di carbonio, del metano e dell'ossido nitroso stanno aumentando notevolmente come conseguenza delle attività

umane. Una delle principali conseguenze dell'aumento delle emissioni dei gas ad effetto serra nell'atmosfera è il cambiamento climatico.

Il "Global Warming Potential" (GWP, potenziale di riscaldamento globale) si riferisce al contributo di un gas al riscaldamento globale, come risultato dell'emissione di un'unità del gas rispetto ad un'unità di un gas di riferimento, il biossido di carbonio, al quale è convenzionalmente assegnato un valore pari a 1. Il GWP rappresenta l'effetto combinato del tempo di permanenza in atmosfera di ogni gas e la relativa efficacia specifica nell'assorbimento della radiazione infrarossa emessa dalla Terra. I GWP sono calcolati dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) e sono utilizzati come emissioni di CO₂ equivalente. Il metano ha un GWP pari a 21 (considerando un orizzonte temporale di 100 anni). Quindi, 1 kg di metano ha lo stesso effetto sul cambiamento climatico di 21 kg di biossido di carbonio. Un chilogrammo di metano deve quindi essere contabilizzato come 21 kg di CO₂ equivalenti [3].

Il metano è dunque un gas ad effetto serra. E' costituito da un atomo di carbonio e quattro di idrogeno con formula chimica CH₄. E' considerato il secondo gas ad effetto serra per ordine di importanza, preceduto soltanto dal biossido di carbonio.

Le fonti di emissione del metano possono essere classificate in fonti naturali ed in fonti antropogeniche. La principale fonte antropogenica di metano è rappresentata dalle discariche (circa il 34% negli U.S.A.); esso è generato dalla decomposizione in condizioni anaerobiche dei rifiuti. L'emissione di metano è fortemente influenzata dall'umidità del rifiuto e dal sistema di gestione del gas praticato nella discarica.

La criticità ambientale del biogas (metano e CO₂) generato in discarica è legata sostanzialmente alla presenza di emissioni superficiali e di migrazioni laterali al corpo della stessa, nonché alla presenza di odori molesti. Le emissioni diffuse possono essere altamente impattanti sull'ambiente. Ciò è dovuto al fatto che il biogas presenta nella sua composizione gas ad effetto serra, gas tossici e gas infiammabili [3].

Il biogas può formare una miscela esplosiva quando si combina con l'aria secondo certe proporzioni. Il livello di concentrazione secondo il quale un gas può potenzialmente esplodere è chiamato limite esplosivo. Il limite esplosivo viene considerato in un *range* che va da un minimo (LEL - Limite Esplosivo Inferiore) ad un massimo (UEL - Limite esplosivo Superiore) di percentuale di combustibile in aria. Il LEL e l'UEL sono espressi come percentuale in volume di un gas nell'aria. Per concentrazioni inferiori al LEL e superiori all'UEL, un gas non esplosione. Il rischio può invece esistere se un gas è presente nell'aria con una concentrazione compresa tra i due limiti ed è presente una

fonte di accensione. I componenti più comuni del biogas prodotto in discarica sono: il Metano, il Diossido di Carbonio, il Diossido di Azoto, l'Ossigeno, l'Ammoniaca, il Solfuro di Idrogeno e Composti Organici Non Metanici (NMOCS). Tra questi il metano è il componente più pericoloso. Diventa esplosivo quando si trova ad avere una concentrazione compresa tra il 5% in volume nell'aria (LEL) ed il 15% (UEL). All'interno della discarica le concentrazioni di metano sono attorno al 50%, il metano dunque inverosimilmente esplose all'interno della stessa. Non appena migra e si diluisce, la miscela di gas metano può raggiungere livelli esplosivi. L'esplosione necessita di ossigeno non presente nelle zone di produzione del metano, poiché i processi biologici che producono questo gas richiedono un ambiente strettamente anaerobico. Altri costituenti del biogas sono infiammabili (ad esempio l'ammoniaca e il solfuro di idrogeno), ma sono difficilmente presenti con valori superiori al loro LEL [1]. In figura 3.2. è riportata la composizione del biogas prodotto in discarica.

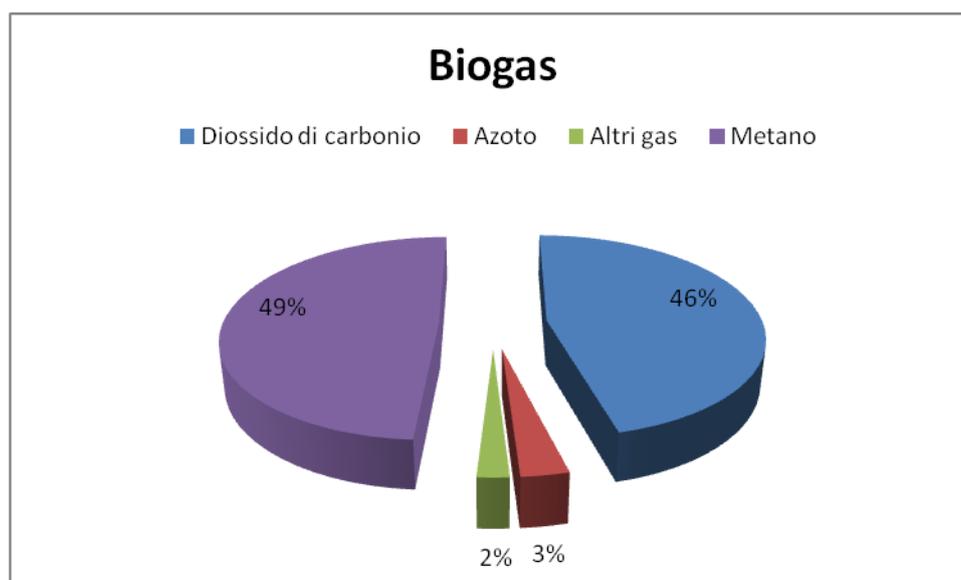


Figura 3.2 - Composizione media del biogas prodotto in discarica [1]

3.3. Caratterizzazione chimico-fisica dei fanghi del sito “Fondo Colombarotto” e analisi di stabilità

Campioni di fango sono stati analizzati per la sostanza secca, la sostanza volatile (come perdita alla calcinazione), la conducibilità, pH, TKN, azoto nitrico ed ammoniacale, il

carbonio organico ed il suo frazionamento in accordo con i metodi ufficiali di analisi dei suoli ed i metodi ufficiali dei fertilizzanti.

Per le analisi per cui è richiesto il campione essiccato all'aria, si è proceduto in essiccazione in stufa ventilata ($T \leq 40^\circ\text{C}$) e successiva macinazione e setacciatura. Poiché parte del campione era rappresentato da fibre non macinabili, le analisi sono state eseguite su entrambe le componenti.

I risultati della caratterizzazione chimico-fisica sono riportati in tabella 3.1 [1].

Tabella 3.1 - Parametri chimico-fisici sul tal quale [1].

<i>Parametri chimico-fisici</i>	<i>Fango tal quale</i>
Sostanza Secca SS (Residuo a 105 °C)	41,5 %
pH	7,3
Conducibilità	0,52 dS/m
Sostanza Volatile (Perdita a 550 °C)	22,5 %
Carbonio Organico Totale (TOC)	8,88 %
Azoto Totale TKN	0,08 %
Azoto ammoniacale	0,01 %
Azoto nitrico	1,95 mg/kg
C/N	107

Tabella 3.2 - Parametri chimico-fisici sulla sostanza secca [1].

<i>Parametri chimico-fisici su SS</i>	<i>Sostanza secca</i>	<i>Setacciato (< 500 µm)</i>	<i>Non setacciato (>500 µm)</i>
Sostanza Volatile (Perdita a 550 °C)	54,2 %	49,4 %	67,3 %
Carbonio Organico Totale (TOC)	21,4 %	19,5 %	26,6 %
Carbonio Organico Estraibile (TEC)		2,96 %	
Acidi umici e fulvici		1,92 %	

I valori riscontrati sono coerenti con le caratterizzazioni dei fanghi di cartiera descritti in precedenza, per fanghi al termine di processi produttivi. Le concentrazioni di C e di N sul tal quale sono leggermente inferiori ai dati di letteratura. L'umidità al 58,5% è congruente con le diverse tipologie di fanghi utilizzati.

Dalle analisi chimico-fisiche si nota la presenza macroscopica di parti fibrose, indicativa di una matrice organica a stadio iniziale di degradazione, tenendo anche conto di un valore delle concentrazioni di carbonio e sostanza volatile più elevate nella parte fibrosa. Da sottolineare anche l'elevato valore di C/N, molto lontano dai valori ottimali 15-35 per la biostabilizzazione aerobica /compostaggio [1].

La sola caratterizzazione chimico-fisica dei fanghi non dà conto della possibile evoluzione e del comportamento degli stessi e quindi non è sufficiente a determinare le scelte di un intervento *in situ*. Sono stati quindi utilizzati anche metodi respirometrici di laboratorio per la determinazione sia della stabilità aerobica, mediante la misura dell'**Indice Respirometrico Dinamico (IRD)**, che della stabilità anaerobica, mediante misura del **Potenziale Biochimico di Metanazione (BMP)**.

L'indice respirometrico (IRD) è un parametro analitico fondamentale per la valutazione del processo di trattamento di biostabilizzazione aerobica delle biomasse, utilizzato e sviluppato nel settore dei *compost*. Il monitoraggio temporale della stabilità biologica (aerobica) del fango di cartiera, sottoposto a trattamento, permette di valutare il grado di decomposizione della sostanza organica fermentescibile in prodotti biologicamente stabili. Il test tende a riprodurre in laboratorio le condizioni che si verificano nella realtà del trattamento condotto sulle matrici organiche, permettendo quindi di gestire nel tempo la tipologia di intervento applicata *in situ*.

La metodologia per la determinazione del BMP invece è stata sviluppata come stima della biodegradabilità anaerobica per valutare la resa di metanizzazione di una matrice organica e quindi l'impiego per la produzione energetica.

Le due metodologie per il monitoraggio, della biodegradabilità in condizioni aerobiche ed anaerobiche, sono state applicate in parallelo.

L'Indice Respirometrico, inteso come IRDP, è espresso in Norma Tecnica UNI, come consumo orario di ossigeno per unità di biomassa del campione $\left(\frac{mg_{O_2}}{kgSV \cdot h} \right)$ con SV =

Solidi Volatili. Di conseguenza, per una omogeneità dell'unità di misura, anche i valori di produzione specifica di metano sono espressi in funzione dei solidi volatili $\left(\frac{Nm^3_{CH_4}}{t SV} \right)$. Il test di biometanazione (BMP) fornisce la misura della quantità massima

di gas metano (espressa come CH_4/SV), producibile dalla sostanza organica, contenuta nella fase solida monitorata.

I fanghi di cartiera hanno evidenziato un materiale caratterizzato da un'elevata stabilità

$IRD < 500 \left(\frac{mg_{O_2}}{kgSV \cdot h} \right)$ in condizioni aerobiche.

Diversamente i risultati del potenziale di biometanazione $183-178 \left(\frac{Nm^3_{CH_4}}{t SV} \right)$,

caratterizzano lo stesso materiale come potenzialmente reattivo in condizioni anaerobiche, con valori ripetibili tra gli stessi campioni [1].

3.4. Cronologia degli interventi e dei monitoraggi effettuati

- **Gennaio 2006/giugno 2006**

E' stato approvato l'intervento di risanamento con costi a carico della azienda C.A.R., autrice del ripristino; Si è intervenuti in due tempi: con la messa in sicurezza di emergenza (nel frattempo il sito era sottoposto a sequestro da parte della Procura della Repubblica) e con la pianificazione della messa in sicurezza permanente. Poiché lo scavo ed il conferimento in discarica di 60.000 tonnellate di fanghi, a cui vanno aggiunte paragonabili quantità di terreno ad essi miscelato, risultavano estremamente difficoltosi sia in termini di tempi e di costi, sia in termini ambientali sanitari, si è cercato in relazione con la Procura della Repubblica, di garantire una rapida messa in sicurezza e di studiare la fattibilità di un risanamento almeno parziale *in situ* [1].

- **Gennaio 2006 - Messa in sicurezza di emergenza**

Il Comune di Imola in accordo con gli altri Enti ha ordinato di provvedere alla messa in sicurezza del sito.

Per la messa in sicurezza di emergenza dell'area dell'ex-cava sono stati realizzati una trincea perimetrale profonda 7 metri dotata di geotessile per interrompere od almeno contenere la migrazione di gas verso le abitazioni limitrofe e una barriera di pozzi di aspirazione del biogas (SVE - *Soil Vapour Extraction*) esterna all'area di ripristino.

- **Giugno 2006 - Messa in sicurezza permanente**

Per la messa in sicurezza permanente del sito e la rinaturalizzazione dello stesso è stato invece avviato un intervento di tipo fisico-meccanico e biologico all'interno dell'area, finalizzato anche al recupero ai fini agronomici dell'area di ex cava.

L'intervento persegue i seguenti obiettivi:

- Riduzione della formazione di metano, riducendo la potenzialità della produzione di metano dal fango;

- Riduzione della presenza di metano, con allontanamento del gas già formato;
- Recupero del sito per uso agronomico [2].

3.4.1. Tipologia di intervento di biostabilizzazione e recupero dell'area

Non essendo noti identici inconvenienti ambientali, è emersa la mancanza di una metodologia di risanamento di riferimento. Le condizioni locali sono diverse dalle bonifiche “convenzionali”, sia perché il metano non è incluso tra i contaminanti, sia perché non si può esprimere l'efficacia del trattamento semplicemente come percentuale di riduzione rispetto alle condizioni iniziali. Infatti, col procedere del tempo, il metano si forma per via della degradazione anaerobica e la concentrazione presente è il risultato della differenza tra il metano prodotto e quello allontanato istante per istante.

L'intervento effettuato appartiene alle Tecniche di Bonifica *in situ*, ed in particolare è collocato all'interno delle Tecniche Combinate, poiché si configura come trattamento fisico-meccanico e trattamento biologico:

- Si tratta di un trattamento biologico in quanto prevede esclusivamente l'uso di:
 - **compost “tailored”** (su misura);
 - **miscele enzimatiche di origine vegetale,**

entrambi prodotti secondo una tecnologia italiana brevettata (Amek s.c.r.l.);

- Si tratta di un trattamento fisico-meccanico in quanto l'uso di *compost* a densità minore e a maggiore porosità crea una discontinuità all'interno del volume da decontaminare ed una conseguente via preferenziale per il flusso del biogas [2].

Si ricorda che la biorimediazione *in situ* (*in situ bioremediation*), consiste nell'uso di microrganismi indigeni, eterotrofi, aerobici ed anaerobici, per degradare contaminanti con lo scopo finale di ottenere prodotti chimici innocui [4].

Il trattamento biologico realizzato, basato sull'attenuazione naturale, contiene elementi propri della *biostimulation* e della *bioremediation*. Infatti, nella *biostimulation*, vengono introdotti nel suolo nutrienti sottoforma di fertilizzanti organici (*compost*), che aumentano la popolazione microbica indigena, mentre nel caso in esame vengono usate anche delle sostanze attivanti come nella *bioremediation*, per coadiuvare ed accelerare la degradazione dei contaminanti ambientali ad uno stadio di inerzia, svolta comunque dai microrganismi già presenti nel suolo, in particolare dai microrganismi microaerofili.

L'inserimento nel filone del trattamento biologico avviene anche per la particolare tipologia di *compost* utilizzato: si tratta di un *compost* "tailored", prodotto per il trattamento di contaminanti specifici in siti specifici, in questo caso arricchito di microrganismi che degradano la cellulosa. In questo modo si affiancano le proprietà di un qualsiasi *compost* di qualità ad elevato grado di maturazione, con le caratteristiche specifiche per la risoluzione del problema in esame.

L'adozione di un *compost* "tailored" determina anche un effetto positivo sulle condizioni generali di formazione del suolo contribuendo, in particolare, al ripristino in tempi relativamente brevi di una qualità di terreno vegetale paragonabile a quello originale preesistente: si tratta infatti di un materiale stabile ad elevato contenuto di sostanza organica, con la qualifica di ammendante e substrato [2].

3.4.2. Attuazione dell'intervento di stabilizzazione e recupero dell'area

- **Giugno 2006**

È stato realizzato direttamente *in situ* un **primo intervento in scala pilota** il 26 Giugno 2006, rappresentante una sorta di test di fattibilità per l'intervento sperimentale e che ha interessato un'area di circa 130 m², rispetto ad un'area complessiva di 49.000 m².

La tecnica fisico-biologica proposta è stata sviluppata secondo tre tipologie di intervento:

- **Trincee "Biofiltro"**, che fungono da camino convettore, una via preferenziale per la fuoriuscita del biogas ed al tempo stesso consentono, grazie al *compost* "tailored", la trasformazione biochimica del metano in CO₂, favorita e catalizzata dai materiali utilizzati. Nello scavo è stato introdotto fino al piano campagna *compost* "tailored" e miscele enzimatiche selezionate.
- **Trincee "Biopile"**, nel cui scavo è stato introdotto una miscela di *compost* "tailored", le miscele enzimatiche ed il fango estratto durante lo scavo stesso, ricoperto con circa 1 m del cappellaccio originario. In questo modo si diminuisce la pressione litostatica agente sul materiale tombato e si favorisce quindi il degasamento, ma anche, data la maggiore porosità del *compost* rispetto al cappellaccio di copertura, l'instaurarsi di condizioni di microaerofilia, vantaggiose per il processo di biostabilizzazione aerobica. L'obiettivo di questo tipo di trincee è l'attivazione di fermentazioni non metanogene, cioè ridurre la produzione di metano dei fanghi, accelerando la loro degradazione aerobica.

➤ **Biopile esterno**, una parte fango estratto è stato miscelato con *compost* “*tailored*” in una proporzione opportunamente definita sulla base delle caratteristiche chimiche del materiale tombato, additivato con le miscele enzimatiche e sottoposto ad un processo di compostaggio, in cumulo non rivoltato. Al termine del processo di biostabilizzazione e maturazione, il materiale così ottenuto è stato utilizzato *in situ* per il recupero agricolo dell’area [2].

- **Settembre 2006**

Nel Settembre 2006, in virtù dei risultati positivi riscontrati ed in previsione dell’inagibilità dell’area nel periodo invernale è stato deciso, concordemente con ARPA E.R. e Comune di Imola, di estendere l’intervento sperimentale al 70% dell’area, al fine di ottenere risultati su scala più ampia e per contribuire alla rapida messa in sicurezza del sito. Sono state realizzate 41 trincee delle tipologie sopra dette, trincee di dimensioni maggiorate rispetto all’intervento pilota, per tenere conto delle profondità dei focolai individuati.

La profondità media è di 5-5,5 metri dal piano campagna, l’area superficiale di ciascuna è di circa 15 m².

Tutte le tipologie di trincee adottate hanno risposto positivamente, evidenziando funzioni diverse ed integrabili tra loro; perciò sono state tutte utilizzate nell’intervento sperimentale complessivo.

Il biorecupero ha il “limite” della difficile previsione dei tempi necessari per il completamento dell’intervento, che comunque è notoriamente tra il medio ed il lungo termine.

- **Ottobre 2006/Novembre 2007**

Realizzazione del progetto di risanamento dell’intera area.

- **Maggio 2007**

L’intervento fisico-biologico è stato completato su tutta l’area interna al fondo, dopo l’approvazione del progetto da parte della Conferenza dei Servizi a seguito del dissequestro dell’area.

- **Ottobre 2007/Novembre 2007**

Per completare l’intervento interno all’area sono state realizzate nell’Ottobre-Novembre 2007 la regimazione superficiale, per ridurre al massimo l’infiltrazione in profondità delle acque meteoriche, e la copertura vegetale.

- **Aprile 2009**

Riconsegna per uso agricolo del sito

- **Dicembre 2007/Dicembre 2009**

- Interventi di manutenzione ordinaria (per esempio, il livellamento del *compost* nelle trincee);
- Interventi di manutenzione straordinaria.

- **Dicembre 2009/Dicembre 2010**

Sono previsti **12 mesi** (eventualmente prorogabili) **di monitoraggio postrisoluzione dell'inconveniente** per verificare la irreversibilità della biostabilizzazione dei fanghi [2].

Nella figura 3.3 è riportata una foto del Fondo Colombarotto dopo l'intervento effettuato.



Figura 3.3 - Fondo Colombarotto dopo l'intervento per la messa in sicurezza permanente e recupero agronomico [1]

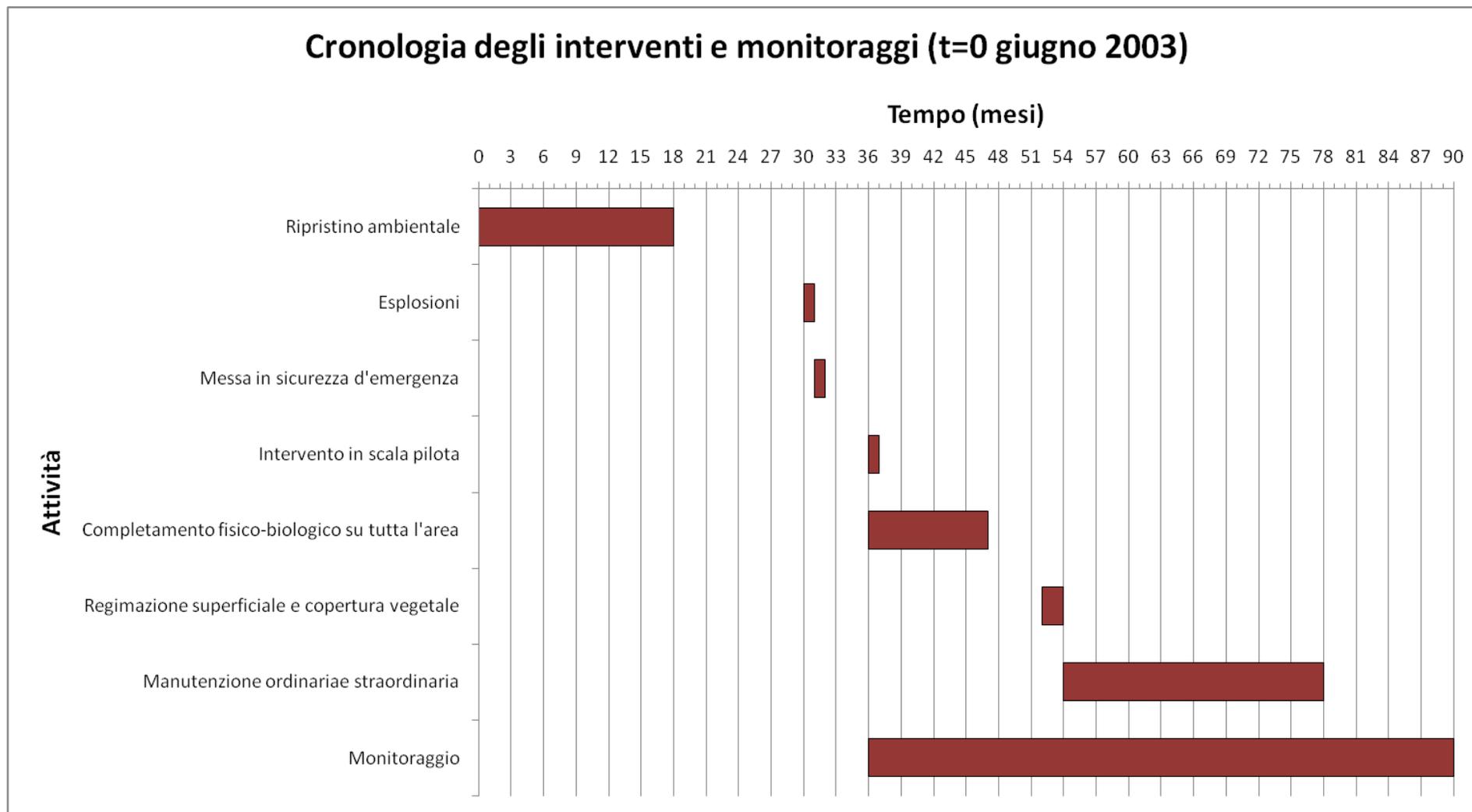


Figura 3.4 - Programma degli interventi e dei monitoraggi effettuati di 90 mesi, con t=0 giugno 2003

3.4.3. Monitoraggio del biogas

Contemporaneamente agli interventi di messa in sicurezza permanente del sito, è stato condotto un programma di monitoraggio delle fasi gas, liquida e solida, mediante cui verificare, nel corso del tempo, i risultati della tecnica di bonifica applicata.

Per il monitoraggio della fase gas sono misurate periodicamente le concentrazioni di CH₄, CO₂ e O₂: infatti il metano è l'indicatore principale della pericolosità del biogas ed attraverso il rapporto con la CO₂ si possono mettere in luce eventuali modifiche nei processi fermentativi, così come la concentrazione di O₂, associata a quella del metano, indica di nuovo la pericolosità ma anche la modifica delle condizioni di stabilizzazione. Tali concentrazioni sono state misurate attraverso un Analizzatore di Gas Portatile: GA2000 PLUS (*Landfill and Environmental Equipment, Geotechnical Instruments, UK*), messo a disposizione dalla LabService Analytica Srl.

Per quanto riguarda i punti di monitoraggio, tali concentrazioni sono misurate *in situ* in:

- a) **Piezometri**, fessurati a profondità definite. Tali piezometri sono costituiti da sonde realizzate con tecnologia GeoProbe a distruzione di nucleo della lunghezza di 6 metri, forati ad una profondità compresa tra -3 e -5 metri dal p.c., con un diametro compreso tra 1" ed un 1" ¼, raccogliendo in tal modo il gas prodotto e diffuso a quel livello. Si ricorda che i primi due metri sono occupati dal capellaccio di materiale argilloso.
- b) **Biofiltri**: una trincea biofiltro consiste in una sezione trapezoidale scavata nel suolo e riempita di *compost* additivato di enzimi al fondo della trincea stessa. In ogni biofiltro sono stati collocati due tubi, alle profondità di 6 metri, forati per il metro finale ed aperti nella parte inferiore, in cui eseguire le misure.
- c) Su alcuni biofiltri, infine, sono stati posizionati anche dei punti di monitoraggio superficiali ("**surface box**") per la misura della concentrazione del biogas nei primi centimetri di *compost* [2].

Da giugno 2006, fino ad agosto 2009 si sono susseguite le seguenti fasi:

- Monitoraggio dei piezometri dell'intervento pilota, C, da giugno 2006
- Monitoraggio interno all'area
 - dei piezometri, G (intervento al 70% dell'area), da ottobre 2006
 - dei piezometri, G (completamento dell'intervento), da agosto 2007
- Monitoraggio dei biofiltri, M e B, da luglio 2007

In particolare sono state misurate le concentrazioni di CH₄, CO₂ ed O₂ in 21 piezometri interni all'area e in 29 biofiltri [2].

3.4.4. Risultati

- **Piezometri**

I risultati di 38 mesi di monitoraggio della fase gas possono così essere riassunti:

- Alcuni piezometri hanno mantenuto un'elevata presenza di biogas (circa 50%) relativa alla concentrazione di CH₄ e CO₂ durante i primi 12-20 mesi di monitoraggio; alcuni di essi poi mostrano abbassamenti dei valori dopo 12 mesi dal completamento dell'intervento (G9, G1). In seguito mostrano un abbassamento dei valori del metano, con punte sotto al LEL: si nota anche un rapporto piuttosto costante di 1:1 fra CH₄ e CO₂.
- Altri piezometri mantengono un livello basso, pressoché nullo, di biogas (G2, G4).
- Infine, certi piezometri presentano andamenti differenti, in relazione al trattamento subito, mostrando un abbassamento nella concentrazione di metano, alcuni al di sotto del LEL (G3) [2].

Per dare un'idea dell'andamento complessivo della concentrazione del biogas interna all'area, si ritiene utile riportare l'andamento delle concentrazioni medie di metano, biossido di carbonio ed ossigeno nei 21 piezometri C+G fino a marzo 2010 (figura 3.1).

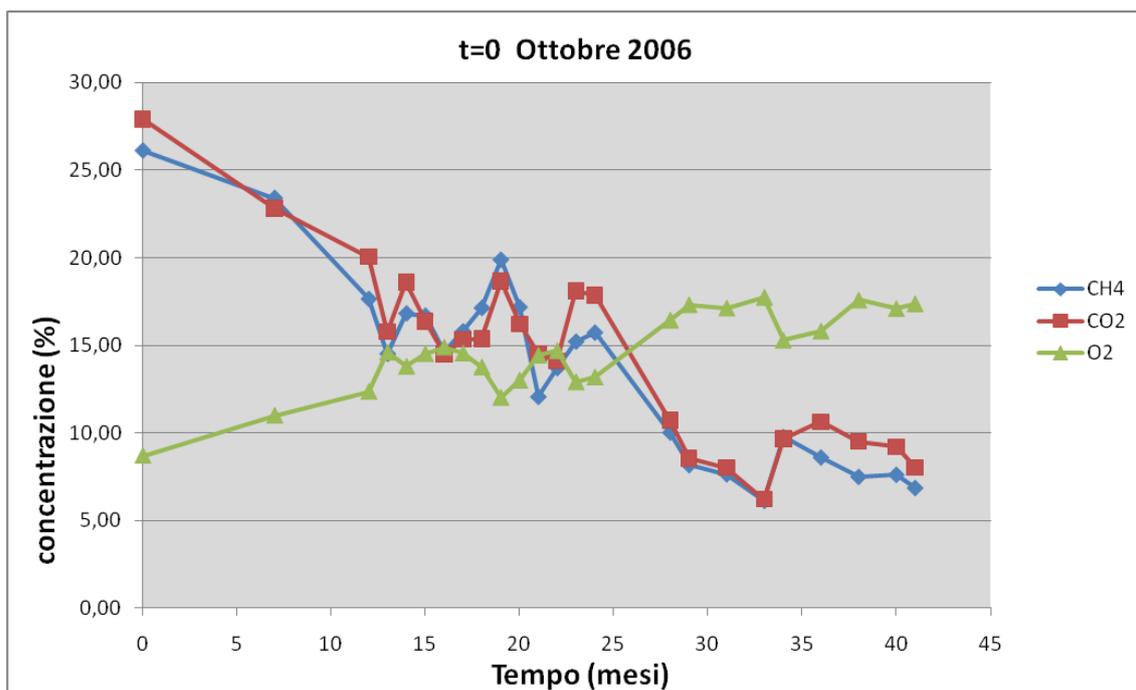


Figura 3.5 - Andamento delle concentrazioni di metano CH₄, biossido di carbonio CO₂ ed ossigeno O₂ nei primi 41 mesi di monitoraggio

E' possibile notare una sostanziale riduzione delle concentrazioni di CH₄ e CO₂ (circa 60%), nonché una progressiva crescita di O₂ nei mesi indagati.

In particolare si distinguono 3 fasi principali:

- Una prima fase iniziale di diminuzione di metano ed anidride carbonica
- Una seconda fase di oscillazione attorno ad un valore intermedio
- Una terza fase di riduzione ulteriore delle concentrazioni di metano ed anidride carbonica e soprattutto di inversione tra ossigeno e metano/anidride carbonica (l'ossigeno ha una concentrazione superiore a metano e anidride carbonica).

• Biofiltri B ed M

- I biofiltri B1, B9, B21, B22 hanno avuto bisogno di un certo tempo di carica (dell'ordine di qualche mese) per raggiungere livelli significativi di metano; gli altri biofiltri hanno registrato valori elevati di concentrazione al loro fondo già dalle prime misure;
- Si registra un accumulo di metano pari al 50% nei biofiltri B7, B11, B15, B17, B19, B24. Alcuni biofiltri sono a zero (B16), altri presentano un andamento altalenante B8, B9, B10, B12, B18, B23. Invece certi biofiltri mostrano un trend calante (B20, B21, B22, B23).
- Ci sono delle differenze sostanziali tra i risultati delle misure effettuate sul fondo dei biofiltri e quelle in superficie, legate al fenomeno della bioconversione microbico/enzimatica. Per esempio si osserva come B7 si caratterizza per una concentrazione di CH₄ pari a zero nei primi centimetri di *compost*, pur presentando una concentrazione di metano del 50% a quota 6 metri di profondità
- Le "surface box" mostrano valori nulli, o comunque sotto al LEL per il CH₄; inoltre presentano dei rapporti CO₂/CH₄ sempre maggiori di due e talvolta molto alti.

Le misure effettuate nei biofiltri confermano il loro ruolo previsto in fase progettuale, ossia quello di realizzare, nel loro fondo, un'efficace azione di bioconversione del metano e di costruire delle zone di confinamento controllato del biogas [2].

- **BMP**

Nella zona di trattamento si evidenzia inoltre la riduzione del “potenziale” di produzione di metano (BMP) da parte dei fanghi trattati:

Tabella 3.3 - Potenziale biochimico di metanazione di campioni di fango prima e durante il processo per unità di solidi volatili [5].

Campione	BMP (CH ₄ m ³ /t SV)
t=0	183
t=50 gg	110
t=240 gg	103
t=412 gg	40,4

3.5. Emissioni di biogas

Nel 2008 è stato effettuato un monitoraggio delle emissioni diffuse di metano nel sito. L’interesse verso una quantificazione delle emissioni di metano in atmosfera è giustificato dal fatto che, come è stato già precisato, si tratta di un gas ad effetto serra. E’ stata applicata una metodologia di monitoraggio appresa in letteratura e utilizzata per misurare le emissioni di biogas nelle discariche.

Innanzitutto occorre chiarire il concetto di “emissioni diffuse”. Nelle discariche sono presenti emissioni diffuse ed emissioni convogliate. Si definisce “emissione convogliata” l’emissione gassosa introdotta nell’atmosfera attraverso un sistema di captazione, che prevede l’aspirazione del gas prodotto, il quale è successivamente convogliato in una rete di trasporto e portato ad un impianto di trattamento che brucia il biogas trasformandolo in energia. Poiché le emissioni convogliate subiscono un trattamento di combustione, di fatto comportano il rilascio di CO₂ e di vapore acqueo.

Si definisce, invece, “emissione diffusa”, l’emissione gassosa in atmosfera per cui non è tecnicamente possibile il convogliamento. Le emissioni diffuse sono quindi quelle che causano l’immissione diretta di biogas in atmosfera. Elevate emissioni diffuse possono essere legate ad una scarsa efficienza del sistema di captazione della discarica [3].

3.5.1. Misura delle emissioni di metano mediante flux box

Dal momento che non è stato definito un metodo ufficiale per la determinazione delle emissioni diffuse in Italia, è stata presa in considerazione la normativa tecnica dell’Agenzia per l’Ambiente Inglese (EA *Enviromental Agency*): “Guidance for monitoring Landfill Gas Surface Emissions”. In essa viene illustrata una tecnica che permette di effettuare delle misure di emissioni superficiali di metano tramite *flux box*.

Si tratta di una metodologia semplice, quantitativa e ripetibile in una serie di locazioni. La *flux box* è uno strumento usato per il campionamento nel monitoraggio delle emissioni diffuse, è formata da una camera di misura ed un sistema di condizionamento. In tale sistema una ventola a basso numero di giri (posta a 10 cm dalla superficie della discarica) ed un ramo di riciclo permettono di condizionare la camera di misura della sonda. Definito un tempo di campionamento, in genere dell’ordine di qualche minuto, si esegue la misura dall’apposita valvola, utilizzando un detector a fiamma ionizzabile (FID - *flame ionisation detector*).

Il FID è un rilevatore distruttivo e non selettivo utilizzato per il rilevamento gascromatografico dei composti organici, con un’elevata sensibilità verso gli idrocarburi. La presenza di altri atomi oltre al carbonio ed all’idrogeno, come ossigeno, azoto o alogeni riduce la sensibilità dello strumento. Inoltre il FID non può rilevare gas quali l’azoto, il monossido di carbonio, il diossido di carbonio e il vapor d’acqua.

La procedura prevede uno studio preliminare (*Desk-study*) in cui sono definite le caratteristiche di interesse del sito da monitorare, seguito da un’ispezione del sito (*Walkover survey*).

La valutazione quantitativa delle emissioni superficiali di gas richiede necessariamente una precedente individuazione dei punti del sito in cui i flussi risultano essere più significativi. Questi ultimi sono normalmente localizzati mediante l’ispezione del sito in cui è utilizzato il FID. Gli obiettivi principali di tale fase sono l’individuazione delle crepe attraverso cui può preferibilmente passare il flusso di biogas e la definizione delle priorità di intervento al fine di eliminare eventuali sorgenti significative di metano. Inoltre, l’ispezione deve fare particolare attenzione alle discontinuità che sono già state individuate nella fase di studio e all’eventuale individuazione di altri punti singolari.

Laddove il FID identifica delle emissioni di metano particolarmente elevate, possono essere designati come punti di interesse nel successivo lavoro di monitoraggio. E’ bene tener presente tuttavia che l’ispezione del sito può essere affetta da elementi di

interferenza o incertezza. Le emissioni in un'area estesa possono infatti essere influenzate ad esempio dalle condizioni meteorologiche e dalla pressione barometrica. Inoltre la turbolenza dell'aria, le caratteristiche topografiche e della superficie possono influenzare la concentrazione locale del gas sulla superficie.

Una volta definita una mappatura dei punti di misura, segue la fase di monitoraggio mediante *flux-box*.

Il metodo della *flux box* prevede la definizione di una serie di punti rappresentativi di monitoraggio in ciascuna zona o discontinuità. Si precisa che per “zona” si intende un'area abbastanza estesa del sito, generalmente omogenea e uniforme, invece per “discontinuità” si intende un'area piccola e definita o un'installazione di proprietà visibilmente differenti dal resto della zona e dalla quale solitamente le emissioni di metano risultano maggiori. La definizione dei punti di monitoraggio è basata su una serie di considerazioni scientifiche al fine di assicurare una distribuzione spaziale di monitoraggio pragmatica. Si distinguono due tipi di zone

- Zone con area > 5000 m²
- Zone con area < 5000 m²

In entrambe il numero minimo di punti di monitoraggio in una zona è 6. Al fine di rendere rappresentativo il monitoraggio, tali punti dovrebbero essere distribuiti regolarmente in una zona. Una volta individuati, l'area dovrebbe essere divisa in una griglia di maglie regolari. Il numero delle misure di flusso dipende quindi dall'area della zona da monitorare seguendo delle specifiche formule definite dall'U.S.EPA (*United States Environmental Protection Agency*) [3].

3.5.2. Misura delle emissioni nel sito Fondo Colombarotto

La metodologia utilizzata si basa su quanto già definito per le discariche, ma il monitoraggio è stato adattato allo specifico sito in esame.

Nel corso delle prove sperimentali, è stata utilizzata la *flux box* e la dotazione strumentale della *LabService Analytica Srl*.

Innanzitutto è stato messo a punto il metodo di misura più idoneo per la stima delle emissioni diffuse di metano. Sono state realizzate differenti prove su uno stesso punto di misura, utilizzando metodologie differenti (misure in continuo e discontinuo). La scelta è caduta sulle misure in continuo in quanto hanno mostrato una maggiore manualità e affidabilità rispetto a quelle in discontinuo.

Dopo di che è stata eseguita una mappatura del Fondo Colombarotto al fine di definire il numero delle posizioni di monitoraggio necessarie affinché i risultati ottenuti dalle misure di emissioni fossero considerati attendibili. Una stima dell'area da monitorare risulta di 45.000 m². L'area è schematizzabile come un rettangolo di lati 300 m x 145 m, corrispondente ad un'area di 43500 m². Si stima inoltre una superficie relativa alle trincee biofiltro di circa 800 m². Da ciò, applicando la formula dell'U.S. EPA deriva un numero di maglie di 37.

Si possono distinguere l'area relativa ai biofiltri ed il resto dell'area interna di caratteristiche omogenee. Essendo l'area complessiva dei biofiltri inferiore a 5000 m², deriva un numero di punti di misura pari a 6 che è il numero minimo di locazioni necessarie per ciascuna area di caratteristiche omogenee, affinché il risultato sia statisticamente attendibile.

Per quanto concerne la presenza di discontinuità, in una prima fase di ispezione del sito non è stata individuata, nell'area da monitorare, alcuna discontinuità classificabile come tale. Il terreno presentava esclusivamente delle crepe superficiali e poco profonde, che non costituivano un canale preferenziale nella fuoriuscita del biogas.

Da quanto appena discusso discendono i seguenti punti di misura:

- 37 nell'area suolo, identificati da T1-T36
- 6 nell'area biofiltri identificati da B8, B11, B16, B14, B20, B25

Con area suolo = area totale – area biofiltri [3].

- **Primo monitoraggio completo: 17 giugno 2008**

- Area suolo: Nella stragrande maggioranza dei punti di misura, non sono stati rilevati valori significativi nel flusso di CH₄, in quanto sono stati misurati valori di concentrazione compresi tra 0 e 3 ppm. Dei 36 punti di monitoraggio dell'area solamente 4 hanno mostrato un flusso di metano in uscita: T2, T14, T26, T29.

Rispettivamente i valori di flusso² non nulli riscontrati sono:

T2: 0,00781 mg/m²s

T14: 0,0071 mg/ m²s

T26: 0,00852 mg/ m²s

T29: 0,00284 mg/ m²s

² Tali valori di flusso sono stati ottenuti tramite conversione delle misure discrete di concentrazioni. La conversione è stata effettuata mediante la procedura definita dalla normativa inglese.

- Area biofiltri sono stati misurati flussi positivi di CH₄ in 5 dei 6 punti. B8
 B11, B16, B20, B25A.
 B8: 0,143 mg/ m²s
 B11: 0,043 mg/ m²s
 B16: 0,15 mg/ m²s
 B20: 0,036 mg/ m²s
 B25A: 0,434 mg/ m²s

Le emissioni diffuse rilevate in ciascuno dei quattro punti dell'area suolo sono al di sotto dei livelli di guardia, previsti per le discariche provvisorie ricoperte, definito nella normativa della dell'Agenzia per l'Ambiente Inglese (EA Enviromental Agency): "Guidance for monitoring Landfill Gas Surface Emissions".

Non avendo altri riferimenti normativi si è deciso infatti di associare la condizione del Fondo Colombarotto ad una discarica provvisoria, in quanto non dotata di una copertura permanente. Tale livello di guardi è pari a $1 \cdot 10^{-1}$ mg/(m²s). Il valore massimo è infatti in T26: 0,00852 m²s [3].

Emissioni totali nel sito

Per l'area suolo la zona di influenza, relativa a ciascun punto di misura, risulta essere di 1175,7 m² (43.500 m²/37). Le emissioni di CH₄ da ciascuna zona monitorata sono calcolate moltiplicando il flusso misurato in ciascuna zona per l'area della stessa. Ne discende che le emissioni complessive nell'area suolo, calcolati dalla sommatoria delle emissioni in ciascuna area risultano essere pari a 30,882 mg/s ovvero 0,974 t/anno. In tabella 3.4. è indicato il contributo di ciascun punto di misura alle emissioni totali dell'area suolo.

Per l'area biofiltri, invece, la zona relativa a ciascun punto di misura può essere schematizzabile come un rettangolo di 3x5 m e quindi di area pari a 15 m² . In tabella 3.5 è riportato il contributo di ciascun biofiltro alle emissioni totali dall'area.

Tabella 3.4 Contributo di ciascun punto di misura alle emissioni totali dell'area suolo [3].

	T2	T14	T26	T29	Tot area suolo
Emissioni CH₄ (mg/s)	9,18	8,35	10,012	3,34	30,882

Tabella 3.5 Contributo di ciascun biofiltro alle emissioni totali dall'area biofiltri [3].

	B8	B11	B16	B20	B25A	Tot area biofiltri
Emissioni CH₄ (mg/s)	2,145	0,65	2,25	0,54	6,51	12,1

Si sottolinea come le emissioni complessive di CH₄, relative all'area biofiltri presentino un contributo significativamente superiore a quanto osservato nell'area suolo, in quanto relative ad una "zona" di area totale considerevolmente più piccola. Questo è testimonianza del convogliamento preferenziale del biogas [3].

- Secondo monitoraggio completo: **29 settembre 2008**
 - Area suolo: Nella maggioranza dei punti di misura, non sono stati rilevati valori positivi di flusso di CH₄. Solamente 5 hanno mostrato un flusso di metano in uscita: T2, T14, T15, T26, T33.
Rispettivamente il valore di flusso per ciascuna locazione è:
T2: 0,00142 mg/ m²s
T14: 0,00142 mg/ m²s
T15: 0,00497 mg/ m²s
T26: 0,0142 mg/ m²s
T33: 0,0064 mg/ m²s
 - Area biofiltri sono stati misurati flussi positivi di CH₄ in tutti e 6 i punti:
B8: 0,34 mg/ m²s
B11: 0,02 mg/ m²s
B14: 0,18 mg/ m²s
B16: 0,084 mg/ m²s
B20: 0,04 mg/ m²s
B25: 0,358 mg/ m²s

Emissioni totali nel sito

Per quanto riguarda l'area suolo, le emissioni totali risultano pari a 33,3 mg/s ossia 1,05 t/anno (tabella 3.6). Questo risultato è molto simile a quanto ottenuto nelle prove di giugno.

Per l'area biofiltri, le emissioni totali risultano pari a 15,33 mg/s, ovvero 0,483 t/anno (tabella 3.7) Si riscontra un maggior contributo dei biofiltri B8 e B25, le cui emissioni complessivamente costituiscono circa i 2/3 delle emissioni totali dell'area biofiltri.

Tabella 3.6 Contributo di ciascun punto di misura alle emissioni totali dell'area suolo [3].

	T2	T14	T15	T26	T33	Tot area suolo
Emissioni CH₄ (mg/s)	1,6	1,67	5,84	16,7	7,52	33,3

Tabella 3.7 Contributo di ciascun biofiltro alle emissioni totali dell'area biofiltri [3].

	B8	B11	B14	B16	B20	B25	Tot area biofiltri
Emissioni CH₄ (mg/s)	5,1	0,3	2,7	1,26	0,6	5,37	15,33

I risultati ottenuti nell'area suolo confermano in linea di massima quanto ottenuto a giugno. Anche in questo caso in ciascun punto di misura dell'area suolo sono stati rispettati i livelli di guardia della normativa inglese di riferimento.

Relativamente all'area biofiltri, dal confronto dei risultati ottenuti nei due monitoraggi si osserva che, tranne B11 e B25, nel monitoraggio di settembre il contributo di ciascun biofiltro alle emissioni totali risulta essere maggiore rispetto a quello di giugno. Il risultato è positivo in quanto segnala un'azione più efficace dei biofiltri [3].

CAPITOLO 4

POSSIBILI APPLICAZIONI DELLA METODOLOGIA SVILUPPATA

4.1. Introduzione

L'innovativa metodologia di *bioremediation* che è stata dettagliatamente descritta nel capitolo precedente è stata sviluppata per applicazioni specifiche a matrici ad alto contenuto di sostanza organica, quali sono i fanghi di cartiera.

L'obiettivo di questo capitolo consiste nel mostrare le ulteriori possibili applicazioni di questa metodologia e le sue potenzialità di sviluppo futuro. In particolare, potrebbe essere utilizzata in altri siti di ripristino ambientale con fanghi di cartiera in cui siano stati riscontrati problemi di produzione incontrollata di biogas, analogamente a quanto avvenuto al Fondo Colombarotto, oppure, una possibile ulteriore applicazione riguarda l'uso nelle discariche chiuse, seppur con i dovuti adattamenti.

Per quanto riguarda l'utilizzo della metodologia in altri siti di stoccaggio di fanghi di cartiera, bisogna considerare che "inconvenienti" come quello descritto hanno cominciato a verificarsi solo negli ultimi anni. Infatti, è relativamente recente la possibilità di recuperare alcune tipologie di rifiuti non pericolosi attraverso il loro utilizzo in ripristini ambientali. In particolare, come è stato già precisato, questa modalità di recupero è stata autorizzata per la prima volta nel 1997, con il Decreto Ronchi.

Nel paragrafo 4.2 sarà brevemente descritto un caso avvenuto di recente in provincia di Savona, in cui è stata accertata la presenza di un'ingente quantità di biogas in un sito di ripristino effettuato utilizzando varie tipologie di rifiuti, prevalentemente fanghi di cartiera.

Per quanto concerne la possibile estensione del campo di applicazione alle discariche, invece, si parte dall'analogia che è possibile evincere tra il concetto di ripristino effettuato tramite rifiuti e le discariche. Il possibile obiettivo desiderato è quello di utilizzare questa tecnologia in discariche chiuse per accelerare il processo di degradazione dei rifiuti e migliorare, di conseguenza, il monitoraggio delle discariche nella fase post-operativa.

Naturalmente ci si rivolgerebbe a discariche contenenti rifiuti biodegradabili.

4.2. Siti di ripristino con fanghi di cartiera: “Fossa di Lavagnin”

Tramite ricerche effettuate sul web [1-8], svolte ai fini della stesura di questo elaborato è stato possibile individuare un altro sito in cui si sta presentando una situazione simile a quella avvenuta al Fondo Colombarotto.

Il sito in esame è la cava di Serpentino, denominata “Fossa di Lavagnin”, un sito di proprietà privata situato nel comune di Pontinvrea (Savona).

Nel 2008 la Regione Liguria e la Provincia di Savona hanno approvato un progetto finalizzato al ripristino ambientale della ex-cava. Questa esigenza è nata dal fatto che si riteneva che l'area in questione potesse costituire un pericolo per l'ambiente poiché vi era il rischio che dalle rocce a cielo aperto dell'ex-cava potesse essere liberato amianto.

Per effettuare il ripristino sono stati usati diversi materiali di scarto, provenienti dal nord Italia e dalla toscana, tra cui inerti prodotti dall'edilizia, rifiuti di rocce di cave autorizzate, scorie di acciaieria e soprattutto vari tipi di fanghi, tra cui fanghi dell'industria cartaria. Il trasporto in cava ha riguardato 60 mila metri cubi di materiale.

Il primo a lanciare l'allarme della possibile presenza di biogas nel sottosuolo è stato l'attuale sindaco, il quale, attraverso un'ordinanza, ha dato mandato all'ARPAP l'agenzia regionale di protezione ambientale del piemonte, sezione provinciale di Alessandria, di effettuare i carotaggi.

Nel giugno 2010, alla presenza dei Carabinieri di Pontinvrea e del Corpo della forestale dello Stato, sono stati effettuati i carotaggi ed installati i piezometri in tre punti dell'area.

I risultati hanno rivelato la presenza di biogas in quantità superiore al consentito (che è del 30% nelle discariche dei rifiuti solidi urbani), con un valore massimo del 76% in uno dei punti più critici. In fondo ai piezometri collocati si è inoltre raccolta una certa quantità di acqua che presenta diversi livelli di temperatura a seconda della profondità.

Questi risultati hanno destato notevole preoccupazione per la salute dei cittadini, in relazione ai pericoli di esplosione del biogas e di contaminazione tramite percolato del torrente Erro da cui il sito di ripristino dista appena 500 metri. Questa situazione è aggravata dalla permeabilità del substrato roccioso sottostante il rifiuto stoccato che potrebbe facilitare la migrazione del biogas e l'inquinamento della falda acquifera.

Sono di seguito riportati i risultati delle misurazioni effettuate da Arpa in data 14 giugno 2010 nei tre pozzi, in relazione alla concentrazione di CH₄, CO₂ e O₂ (Tabella 4.1).

Pozzo	CH ₄ %	CO ₂ %	O ₂ %	Note
S1	21.6	1.7	15.9	Boccaforo
	75.6	7.6	0.5	1 m
	75.1	7.5	0.3	2 m
	75	7.9	0.3	3 m
	74.9	7.9	0.2	4 m
	74.7	7.9	0.2	5 m
	69.1	9.1	0.1	6 m
	68.5	10.1	0.1	7 m
	69	10.1	0.1	8m livello 8.54 m
S2	0.5	0	20.5	Boccaforo
	4.5	0.1	18.8	0.9 m livello 0.92 m
S3	3.3	0.8	20.1	Boccaforo
	72.7	24.6	0.5	1 m
	73.1	34.2	0.3	2 m
	73.3	23.9	0.2	3 m
	73.6	23.4	0.1	4 m
	75.3	22	0.1	5 m
	75.7	21.7	0.1	6 m
	75.9	21.6	0	7 m
	76	21.7	0	8 m
	76.2	21.5	0	9 m
	76.1	21.3	0	10 m livello 10.28 m

Tabella 4.1 - Risultato delle misurazioni di CH₄, CO₂ e O₂ effettuate nella “Fossa di Lavagnin” [7]



Figura 4.1 - Fossa di Lavagnin [8]

Alla luce di tali dati, ad oggi è in corso un dibattito su come procedere. L'attività è stata sospesa e l'intenzione sembra essere quella di rimuovere i rifiuti dall'area e conferirli in discarica, ma non è ancora stata presa una decisione definitiva in merito.

4.3. Applicazione a discariche

Le discariche costituiscono una fonte di emissioni potenzialmente contaminanti, in particolare emissioni di biogas e formazione di percolato. Il percolato è il liquido che si origina prevalentemente dall'infiltrazione di acqua nella massa dei rifiuti o dalla decomposizione degli stessi [9]. Per molti rifiuti, soprattutto la frazione organica dei RU (Rifiuti Urbani), i residui restano attivi per decenni e producono liquami (percolato) potenzialmente inquinanti per terreno e falde acquifere tramite il loro processo di decomposizione anaerobica [10]. I rifiuti in discarica, dunque, causano emissioni ad alto contenuto di CH_4 e CO_2 , due gas serra. Come già precisato, il metano ha un GWP pari a 21, mentre al biossido di carbonio è convenzionalmente assegnato un valore pari a 1. Quindi 1 kg di metano ha lo stesso effetto sul cambiamento climatico di 21 kg di biossido di carbonio.

Una moderna discarica deve presentare sistemi di captazione di tali gas, in particolare del metano che può essere usato anziché disperso in atmosfera, deve inoltre essere

realizzata secondo una struttura a barriera geologica in modo da isolare i rifiuti dal suolo e in grado di riutilizzare il biogas prodotto per generare energia. Se la discarica è progettata e costruita correttamente i rifiuti devono comunque rimanere sotto osservazione per almeno 30 anni dopo la sua chiusura [11].

Diversi studi sperimentali hanno dimostrato come la massima produzione di biogas si rileva dopo circa un anno dalla chiusura della discarica per poi tendere a ridursi drasticamente dopo circa 8 anni. Questo andamento è legato al fatto che la componente organica a rapida biodegradazione tende ad esaurirsi [12].

Le discariche, in particolare quelle “unlined”, cioè non confinate, contenenti rifiuti biodegradabili, presentano caratteristiche simili ai siti di ripristino con fanghi di cartiera. La presenza di sostanza organica e di condizioni anaerobiche determina infatti la produzione di biogas.

A partire da questa considerazione, si sta valutando la possibilità di estendere ed adattare la tecnologia utilizzata nel Fondo Colombarotto alle discariche di questo tipo.

E' utile, a questo riguardo, conoscere le metodologie più innovative a livello europeo utilizzate per ridurre le emissioni di metano dalle discariche quando la concentrazione del gas è troppo bassa per poterlo utilizzare per il recupero di energia. Tale condizione si è verificata anche per la produzione di biogas da fanghi di cartiera nel Fondo Colombarotto.

Dunque, dopo una breve descrizione dei riferimenti legislativi italiani relativi a questo tema, verranno riportati i punti salienti della “Technical Guideline for Biocovers”, una linea guida sviluppata in Austria da un gruppo composto da scienziati, ingegneri, gestori di discariche e rappresentanti legali, sotto la supervisione della “Austrian Association for Management of Contaminated Sites (AAMCS)” e la direzione di M. Huber-Humer, autore dell'articolo [13]. I contenuti di questo documento rappresentano un primo passo nella definizione di standard e criteri omogenei a livello europeo per la costruzione di *biocover* in discariche per l'ossidazione del metano, nonché per le caratteristiche che deve possedere il *compost* utilizzato.

4.3.1. Legislazione italiana

Sono di seguito riportati gli aspetti normativi relativi alla gestione delle discariche, con particolare attenzione alle prescrizioni relative alla gestione della fase post-operativa delle stesse.

Per questo argomento si fa riferimento al **Decreto Legislativo 13 gennaio 2003, n. 36**, "Attuazione della direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti". Ai sensi di tale decreto, la "discarica" è definita come *area adibita a smaltimento dei rifiuti mediante operazioni di deposito sul suolo o nel suolo, compresa la zona interna al luogo di produzione dei rifiuti adibita allo smaltimento dei medesimi da parte del produttore degli stessi, nonché qualsiasi area ove i rifiuti sono sottoposti a deposito temporaneo per più di un anno. Sono esclusi da tale definizione gli impianti in cui i rifiuti sono scaricati al fine di essere preparati per il successivo trasporto in un impianto di recupero, trattamento o smaltimento, e lo stoccaggio di rifiuti in attesa di recupero o trattamento per un periodo inferiore a tre anni come norma generale, o lo stoccaggio di rifiuti in attesa di smaltimento per un periodo inferiore a un anno.*

Gli **articoli 12 e 14** si occupano rispettivamente della "Procedura di chiusura" e della gestione operativa e post-operativa.

Nell'**allegato 1** vengono definiti i "criteri costruttivi e gestionali degli impianti di discarica" e in particolare il paragrafo 2 è dedicato agli impianti per rifiuti non pericolosi e per rifiuti pericolosi.

Nel paragrafo 2.2 per quanto riguarda la "protezione delle matrici ambientali" si legge:

Al fine di garantire l'isolamento del corpo dei rifiuti dalle matrici ambientali, la discarica deve soddisfare i seguenti requisiti tecnici;

- *sistema di regimazione e convogliamento delle acque superficiali;*
- *impermeabilizzazione del fondo e delle sponde della discarica;*
- *impianto di raccolta e gestione del percolato;*
- *impianto di captazione e gestione del gas di discarica (solo per discariche dove sono smaltiti rifiuti biodegradabili);*
- *sistema di copertura superficiale finale della discarica.*

Deve essere garantito il controllo dell'efficienza e dell'integrità dei presidi ambientali (sistemi di impermeabilizzazione, di raccolta del percolato, di captazione gas, etc.), e il mantenimento di opportune pendenze per garantire il ruscellamento delle acque superficiali.

Il paragrafo 2.3 è dedicato al "controllo delle acque e gestione del percolato", in cui si dice che *il percolato e le acque di discarica devono essere captati, raccolti e smaltiti*

per tutto il tempo di vita della discarica, secondo quanto stabilito nell'autorizzazione, e comunque per un tempo non inferiore a 30 anni dalla data di chiusura definitiva dell'impianto.

Il paragrafo 2.4 riguarda la “protezione del terreno e delle acque”, in cui si fa riferimento alla Copertura superficiale finale (2.4.3):

La copertura superficiale finale della discarica deve rispondere ai seguenti criteri:

- *isolamento dei rifiuti dall'ambiente esterno;*
- *minimizzazione delle infiltrazioni d'acqua;*
- *riduzione al minimo della necessità di manutenzione;*
- *minimizzazione dei fenomeni di erosione;*
- *resistenza agli assestamenti ed a fenomeni di subsidenza localizzata;*

La copertura deve essere realizzata mediante una struttura multistrato costituita, dall'alto verso il basso, almeno dai seguenti strati:

- 1. strato superficiale di copertura con spessore maggiore o uguale a 1 m che favorisca lo sviluppo delle specie vegetali di copertura ai fini del piano di ripristino ambientale e fornisca una protezione adeguata contro l'erosione e di proteggere le barriere sottostanti dalle escursioni termiche;*
- 2. strato drenante protetto da eventuali intasamenti con spessore maggiore o uguale a 0,5 m in grado di impedire la formazione di un battente idraulico sopra le barriere di cui ai successivi punti 3) e 4);*
- 3. strato minerale compattato dello spessore maggiore o uguale a 0,5 m e di conducibilità idraulica di maggiore o uguale a 10^{-8} m/s o di caratteristiche equivalenti, integrato da un rivestimento impermeabile superficiale per gli impianti di discarica di rifiuti pericolosi;*
- 4. strato di drenaggio del gas e di rottura capillare, protetto da eventuali intasamenti, con spessore maggiore o uguale a 0.5 m;*
- 5. strato di regolarizzazione con la funzione di permettere la corretta messa in opera degli strati sovrastanti.*

Poiché la degradazione dei rifiuti biodegradabili, incluse le componenti cellulosiche, comporta la trasformazione in biogas di circa un terzo della massa dei rifiuti, la

valutazione degli assestamenti dovrà tenere conto di tali variazioni, soprattutto in funzione alla morfologia della copertura finale.

La copertura superficiale finale come sopra descritta deve garantire l'isolamento della discarica anche tenendo conto degli assestamenti previsti ed a tal fine non deve essere direttamente collegata al sistema barriera di confinamento.

La copertura superficiale finale della discarica nella fase di post esercizio può essere preceduta da una copertura provvisoria, la cui struttura può essere più semplice di quella sopra indicata, finalizzata ad isolare la massa di rifiuti in corso di assestamento.

Detta copertura provvisoria deve essere oggetto di continua manutenzione al fine di consentire il regolare deflusso delle acque superficiali e di minimizzarne l'infiltrazione nella discarica.

La copertura superficiale finale deve essere realizzata in modo da consentire un carico compatibile con la destinazione d'uso prevista.

Infine il paragrafo 2.5 si occupa del “controllo dei gas”, si dice che *Le discariche che accettano rifiuti biodegradabili devono essere dotati di impianti per l'estrazione dei gas che garantiscano la massima efficienza di captazione e il conseguente utilizzo energetico.*

Nell'**allegato 2** sono invece descritti i “piani di gestione operativa, di ripristino ambientale, di gestione post operativa, di sorveglianza e controllo, finanziario”. In particolare nel paragrafo 5.4 si parla delle emissioni gassose e qualità dell'aria:

Per le discariche dove sono smaltiti rifiuti biodegradabili e rifiuti contenenti sostanze che possono sviluppare gas o vapori deve esser previsto un monitoraggio delle emissioni gassose, convogliate e diffuse, della discarica stessa, in grado di individuare anche eventuali fughe di gas esterne al corpo della discarica stessa. A tal proposito il Piano deve definire livelli di guardia relativamente alla presenza del gas di discarica all'esterno della discarica, anche nel suolo e nel sottosuolo, nonché contenere un piano d'intervento da realizzare ed attivare in caso di superamento degli stessi.

I parametri di monitoraggio sul gas di discarica devono comprendere almeno CH₄, CO₂, O₂, con regolarità mensile, altri parametri quali; H₂, H₂S, polveri totali, NH₃, mercaptani e composti volatili in relazione alla composizione dei rifiuti. Si deve provvedere, inoltre, a caratterizzare quantitativamente il gas di discarica [...].

4.3.2. “Technical Guideline for Biocovers”

Questo paragrafo è stato scritto facendo riferimento all’articolo “Biocover Construction and monitoring-implementation criteria and processes” [13], che riporta gli elementi essenziali della linea guida per *biocover* che si può trovare in lingua originale al sito www.altlastenmanagement.at [14].

Come già anticipato questa linea guida si propone di sviluppare uno standard omogeneo per la costruzione di *biocover*. Infatti prima della stesura di questo documento in Europa non esistevano specifici standard tecnici su questo tema.

Come prima cosa, occorre chiarire il concetto di *biocover*: si tratta di una copertura applicata alle discariche progettata in modo tale da potenziare l’ossidazione del metano (trasformazione da CH₄ a CO₂) e che permette, di conseguenza, di ridurre le emissioni del gas da discariche attive o chiuse.

I criteri sviluppati per la costruzione e il monitoraggio di *biocover* sono stati stabiliti sulla base di prove sul campo e dati ottenuti dalle prime applicazioni di *biocover* e *biowindow* sia in discariche chiuse di recente sia in vecchie discariche. Infatti anche se la linea guida si focalizza principalmente sulla *remediation* di vecchie discariche può essere applicata anche a discariche chiuse di recente e discariche costituite da rifiuti che hanno subito un trattamento meccanico biologico e aventi quindi già un basso potenziale di emissione di gas.

Nella legislazione austriaca ci sono tre direttive che influenzano l’implementazione del *biocover*: la direttiva austriaca sui *compost* (BGB1. II 292/2001); la direttiva austriaca sulle discariche (BGB1 II 39/2008, oggi modificata) e la “Austrian law on remediation of inherited waste” (ALSAG, BGB1, n. 299/1989, modificata da BGB1. I n. 40/2008).

Prima della modifica, la ALSAG prevedeva una *landfill tax* sulla copertura delle discariche realizzate con materiali derivante da rifiuti, inclusi i *waste composts*. Era necessario pagare per ogni tonnellata di rifiuto usato per la costruzione del *biocover*. Oggi, con la modifica attuata, i *biocovers* sono esenti da tasse, ma solo se costruiti in

pieno accordo con i criteri stabiliti nella direttiva austriaca sulle discariche. Le indicazioni riguardo le caratteristiche della copertura e del contenuto organico del materiale applicato sono molto severe.

La direttiva austriaca sulle discariche prevede che le discariche (eccetto quelle per materiali di scavo o inerti) debbano essere coperte con uno strato per prevenire infiltrazioni di acque meteoriche nei rifiuti e la conseguente generazione di liquami. Nonostante ciò, la recente modifica prevede la possibilità di coprire le discariche contenenti rifiuti biodegradabili con una copertura temporanea permeabile (per al massimo 20 anni) per accelerare il processo di degradazione dei rifiuti. Queste coperture devono anche mitigare le emissioni di metano (agendo come *biocover*), emissioni per cui la direttiva pone valori limite: un valore medio di 5 kg CH₄/m² l'anno per tutto il sito e rispettivamente, i singoli punti caldi non dovrebbero eccedere i 10 kg CH₄/m² l'anno. Inoltre, l'uso di *compost* prodotto da rifiuti solidi urbani per il *biocover* non è consentito. A causa di una legislazione in continuo cambiamento e che prevede forti restrizioni, i *biocover* sono oggi applicati in poche discariche. Attualmente in Austria *biocover/biowindow* costituiti da materiali di rifiuto e *compost* sono applicati in due vecchi siti e circa cinque discariche chiuse. In alcuni casi il *biocover* rappresenta l'unico modo per ridurre le emissioni di metano e in alcuni siti è affiancato a sistemi di estrazione del gas.

I costi stimati per la costruzione di *biocover* in Austria sono di circa 22-33 euro per metro quadrato (inclusa la pianificazione e la supervisione) e dipendono in larga parte dal tipo e dalla disponibilità del materiale applicato (*compost*). I costi di costruzione per *biowindows* integrato nella copertura esistente sono più alti. Vanno dai 150 ai 250 euro al metro quadrato (inclusa la rimozione della copertura esistente per le finestre) [13].

4.3.2.1. Condizioni per l'applicazione del biocover

Prima della progettazione e la successiva costruzione del *biocover* in un sito, è necessario che siano soddisfatti alcuni requisiti per verificare se rappresenta una soluzione fattibile.

Dovrebbero essere svolte le seguenti attività:

- Studio dettagliato dei dati sulla produzione del gas (ad esempio dati sull'estrazione del gas, se esistono, documentazione relativa alla storia dei rifiuti

in ingresso, determinazione della concentrazione di gas, misure delle emissioni, migrazione del gas, ecc.)

- Prelievo del rifiuto per le analisi (ad esempio contenuto organico, parametri di reattività, potenziale di produzione del gas, contenuto d'acqua ecc)
- Studio della superficie della discarica (se e quale tipo di copertura già esiste), vegetazione ecc.
- Studio dell'area circostante (uso previsto dell'area, proprietà private, ecc)

All'interno della linea guida è stato inserito un "albero delle decisioni", che costituisce un utile strumento di supporto per coloro che dovranno verificare se il *biocover* rappresenta la soluzione migliore per ridurre le emissioni di metano nello specifico sito. Viene presa in considerazione la produzione/emissione di gas, la forma della discarica, la generazione di percolato ecc. In figura 4.1 è riportato questo strumento.

Un aspetto significativo che viene preso in considerazione nell'albero decisionale, riguarda la forma della discarica, in particolare le pendenze. Sulla base di precedenti esperienze, *biocovers* sono stati applicati su pendenze di 1:3 1:10 senza problemi. Quando si usa *compost* sulle pendenze è conveniente avere una struttura grossa e ben strutturata; ma bisogna considerare anche i processi di degradazione e mineralizzazione della materia organica che una struttura più fine porta nel lungo periodo. Il materiale usato per il *biocover* deve potenziare l'attività microbica dell'ossidazione del metano e fornire ottime condizioni tutto l'anno [13].

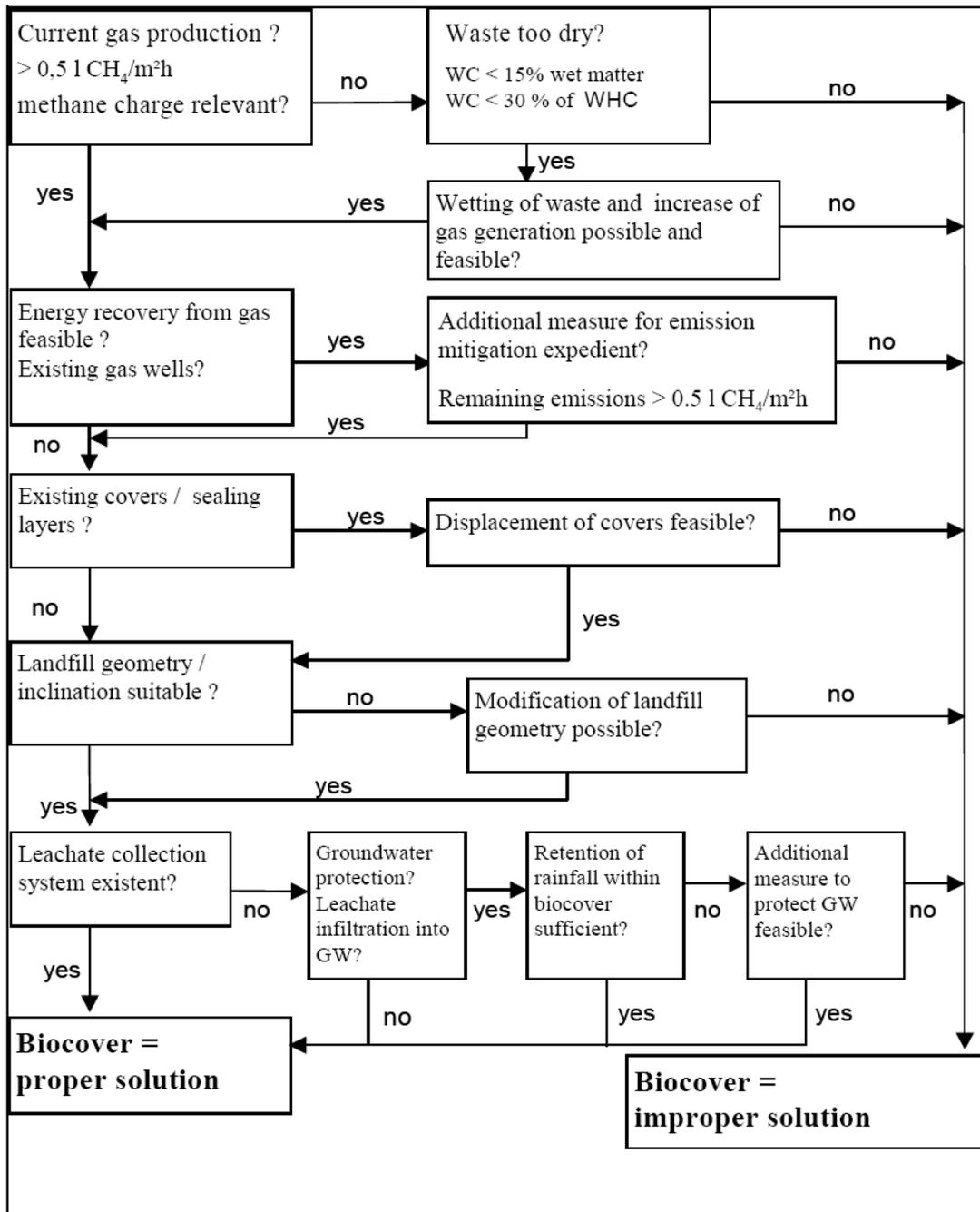


Figura 4.1 - Albero delle decisioni per l'applicazione del *biocover* (GW= groundwater)[13]

4.3.2.2. Requisiti costruttivi e criteri per biocovers

Il *biocover* è solitamente formato da uno spesso strato di distribuzione del gas, che consente di bilanciare i flussi di gas, posto sotto un substrato che serve ad aumentare l'attività microbica e garantire le migliori condizioni tutto l'anno. Tramite un *biocover* è possibile avere una copertura totale della discarica, così che il carico di gas può essere

disperso su una grande superficie mentre, localmente, i carichi risultano essere più bassi.

Le *biowindows* sono invece delle parti relativamente piccole della copertura della discarica con *compost* sistemate in sezioni separate integrate nella copertura impermeabile della discarica. Le *biowindows* possono essere sufficienti ad esempio quando le emissioni sono abbastanza basse, ma vi è il rischio di sovraccarico di metano e il conseguente pericolo di collasso del sistema. Il dimensionamento di un *biowindows/biocover* è quindi essenziale per la sua efficacia.

Come valore di riferimento, il carico desiderato di metano per m^2 in *biocover/biowindows* dovrebbe essere minore di $4 \text{ l CH}_4/\text{m}^2\text{h}$ per garantire una sufficiente mitigazione delle emissioni (fino al 100%).

Tradizionalmente i *biocovers* sono sistemi permeabili al gas e all'acqua. Ma quando si usa il *compost* per lo strato di ossidazione, i *biocovers* forniscono una grande capacità di ritenzione di acqua e, insieme alla vegetazione, possono agire in modo da minimizzare il percolato. Per ridurre ulteriormente la generazione di liquame, i *biocovers* possono essere usati insieme a capillari barriere sulle parti in pendenza della discarica. In figura 4.2 è riportato uno schema del *biocover* [13].

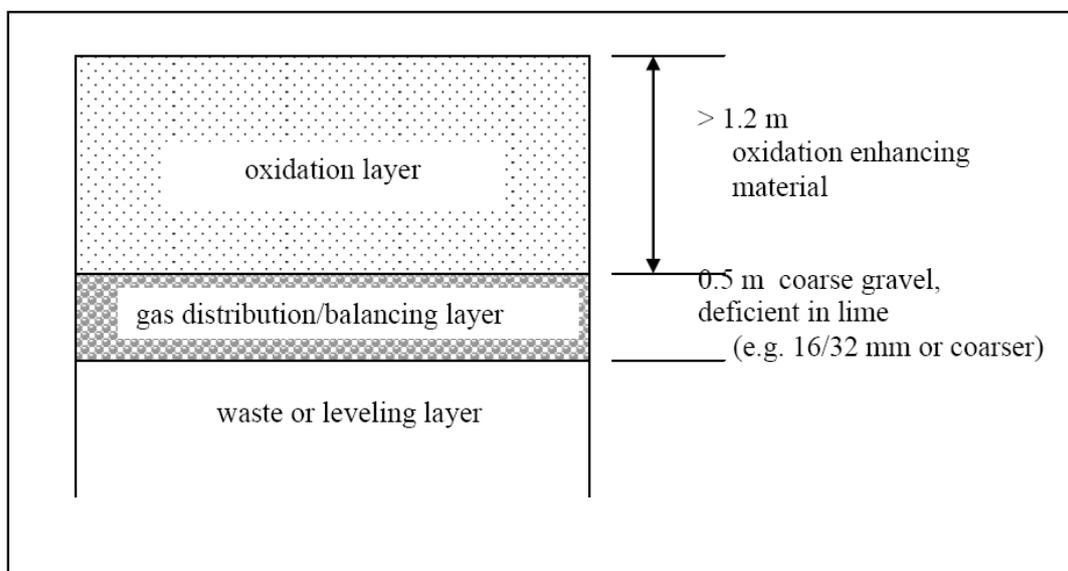


Figura 4.2 - Schema di un *biocover* per le condizioni climatiche tipiche del centro Europa, basato su esperienze in Austria [13].

➤ ***Requisiti per lo strato di distribuzione del gas (gas distribution/balancing layer)***

L'applicazione di uno strato di distribuzione del gas sotto lo strato di ossidazione serve per ottenere un'omogenea fornitura del gas e il suo rallentamento. Sulla base delle esperienze, questo strato dovrebbe essere spesso almeno 0,3-0,5 m e formato da un materiale stabile e spesso che permetta al gas della discarica di migrare facilmente e distribuirsi uniformemente. Sono stati ottenuti buoni risultati con una grossa ghiaia priva di limo (è preferibili una grandezza minima della particella di 16/32 mm e una granulometria di 32/64 o più).

In alternativa, possono essere applicati altri materiali per la costruzione di questo strato, prestando attenzione alla stabilità chimica (l'ambiente è ricco di CO₂) e fisica di lungo periodo. Gli strati non dovrebbero essere separati da geotessile per il rischio di intasamento. La sezione raccomandata per uno strato di distribuzione del gas è 0,5 m, in questo modo è possibile garantire un sufficiente spessore per una distribuzione del gas senza ostacoli anche nel caso in cui particelle fini si dovessero infiltrare dallo strato sovrastante nella parte più alta dello strato di distribuzione del gas [13].

➤ ***Requisiti per lo strato di ossidazione (oxidation layer)***

In generale, un'alta capacità di ossidazione è principalmente associata a substrati spessi, porosi e ben strutturati, spesso ricchi di materia organica. Dalle esperienze condotte in Austria è stato dimostrato che *compost* maturi sono substrati adatti per favorire i processi di ossidazione del metano. La più importante caratteristica del *compost* è l'alto contenuto di materia organica che genera condizioni favorevoli per i microrganismi, così come una grande superficie specifica, un'alta capacità di ritenzione di acqua combinata con un'adeguata porosità e una consistenza adatta allo scambio di gas, bassa conducibilità termica e, di conseguenza, buon isolamento termico.

Per favorire l'ossidazione del metano i substrati dovrebbero possedere le seguenti proprietà:

- Una soddisfacente permeabilità a ossigeno e metano, una consistenza che fornisca stabilità nel lungo periodo e adeguata porosità.
- Un alto contenuto di materia organica stabile. Materiali ricchi di contenuto organico sono scarsamente comprimibili, spesso forniscono alta porosità e producono un buon effetto di isolamento termico. La temperatura prodotta

dall'attività microbica può essere trattenuta molto meglio in un substrato spesso piuttosto che in uno sottile, fornendo isolamento dalle fluttuazioni delle temperature atmosferiche. Ciò permette un'ossidazione del metano più indipendente da temperature esterne basse o variabili.

- Riguardo l'utilizzo di materiali di rifiuto o *composts* per realizzare lo strato di ossidazione, parametri essenziali risultano la maturità e la stabilità della materia organica che vanno controllati prima dell'utilizzo. Con un *compost* fresco possono essere presenti concentrazioni eccessive di NH_4 (inibitore dell'ossidazione del metano) o potrebbero ancora prevalere processi di trasformazione dell'azoto, che conducono a prodotti metabolici intermedi tossici come il nitrito; inoltre, nei *compost* freschi, la scarsità di ossigeno e la competizione tra la respirazione del materiale di *compost* sono seguiti dalla formazione di sostanze esopolimeriche (che potrebbero ostruire i pori e limitare la fornitura di gas). Nei materiali di *compost* la concentrazione di ammonio dovrebbe essere minore di 350 ppm di sostanza secca, nitrito non individuabile e l'attività di respirazione a 7 giorni (RA_7) del *compost* non dovrebbe essere superiore a 8 mg O_2/g di sostanza secca (determinato in accordo con il test austriaco standardizzato dell'attività di respirazione).

Buoni risultati sono stati ottenuti con l'additivazione di cippato (biomassa legnosa) in percentuale maggiore al 30 vol%. Un esempio di un materiale appropriato di *compost* è dato dai fanghi da depurazione anaerobicamente stabilizzati compostati (50% fanghi disidratati e 50% w/w cippato), ideale per la distribuzione delle particelle [13].

➤ ***Dimensionamento e requisiti costruttivi***

Il substrato dovrebbe essere posizionato senza compattazione artificiale, per ottenere sufficiente porosità e soddisfacente permeabilità all'ossigeno e al metano.

Il materiale dovrebbe essere posizionato a medio contenuto di umidità usando una scavatrice ma bisogna fare attenzione a non passare ripetutamente sullo strato di ossidazione con attrezzature pesanti.

Per la progettazione dello strato di ossidazione, dovrebbero essere presi in considerazione molti fattori, per esempio la profondità di penetrazione dell'ossigeno, la stabilità, le proprietà di isolamento termico, il tipo di vegetazione voluta e la destinazione d'uso. Lo spessore minimo del substrato dipende dal clima. Per le

condizioni tipiche del centro Europa dovrebbe essere almeno 1,2 m allo stadio iniziale. Lo spessore massimo è determinato principalmente dal tipo di vegetazione voluto e dalla porosità del materiale, per poter ottenere sufficiente fornitura di ossigeno fino alla profondità dello strato di distribuzione. Lo spessore massimo di uno strato di ossidazione costituito da un *compost* spesso e maturo è di 2-2,5 m; invece per un *compost* fresco, fine e con maggior attività di respirazione basale (necessità di ossigeno), la dimensione massima è minore.

I materiali adatti a favorire l'ossidazione del metano, garantiscono anche le condizioni per la ricostruzione della vegetazione, senza il bisogno di un ulteriore strato per sostenere la crescita delle piante.

Tutti i passi dovrebbero essere accompagnati da una completa documentazione e monitoraggio [13]

4.3.2.3. Monitoraggio e criteri per il controllo dell'efficienza

Le performance del *biocover* dovrebbero essere costantemente valutate e monitorate. La linea guida descrive un approccio concettuale che consiste in un dettagliato test di approvazione iniziale nel primo anno dopo l'applicazione, seguito da un programma di monitoraggio durante gli anni seguenti. Il test di approvazione iniziale combina una valutazione qualitativa e una quantificazione delle emissioni residue. In accordo con la direttiva austriaca sulle discariche la superficie del *biocover* deve essere esaminata su base trimestrale per il possibile rilascio di metano effettuando una mappatura delle emissioni tramite FID, basata su griglia.

Su aree piatte e omogenee, la griglia dovrebbe essere al massimo 20x20 m; sulle pendenze e parti eterogenee del *biocover* dovrebbe essere infittita a 10x10 m. Le aree attorno alle installazioni e i punti caldi nel *biocover* devono essere controllati a fondo. Usando i dati provenienti dalla mappatura tramite FID, le emissioni (CH₄ e CO₂) dovrebbero essere quantificate almeno due volte l'anno. Il test iniziale dovrebbe essere svolto da una persona/istituzione indipendente e autorizzata. Una volta che il *biocover* ha passato il test di approvazione iniziale nel primo anno, il programma di monitoraggio può essere ridotto ad uno l'anno e la griglia può essere allargata a 30 x 30 m sulle aree piatte, omogenee e chiaramente indisturbate. Le aree attorno alle installazioni, le parti chiaramente disturbate e i punti caldi nel *biocover*, dovrebbero essere controllati

separatamente. Misure quantitative dovrebbero essere effettuate solo se scoperte emissioni di metano.

Oltre all'approccio descritto, la temperatura e i profili di concentrazione del gas dovrebbero essere controllati dentro il *biocover* per ottenere prove della zonazione dell'attività metanotrofica.

Come criterio di accettazione, se un *biocover* ha passato il test di approvazione e mostra efficienza soddisfacente, dovrebbero essere soddisfatti specifici valori obiettivo. Da una parte i criteri possono combaciare con quelli forniti dalla direttiva austriaca sulle discariche per la mitigazione delle emissioni di metano in coperture temporanee, dall'altra parte, i valori obiettivo per *biocover* possono anche essere ricavati da analogie con ecosistemi naturali (per produzione di metano, come paludi). Riguardo alla direttiva austriaca, un tasso medio di emissione per le discariche di $5 \text{ kg CH}_4/\text{m}^2 \text{ l'anno}$, è definito come limite. Riguardo all'analogia con sistemi naturali (le emissioni riportate sono tra $0,03 - 0,56 \text{ l CH}_4/\text{m}^2\text{d}$), le emissioni residue da *biocover* dovrebbero stare in questo *range* non andando oltre i $0,2 \text{ kg CH}_4/\text{m}^2 \text{ l'anno}$. Questo valore presenta una netta discrepanza (più di un ordine di grandezza) con il valore limite determinato dalla direttiva. Comunque entrambi gli approcci e i criteri sono presenti nella linea guida [13].

CAPITOLO 5

CONSIDERAZIONI ECONOMICHE E DI IMPATTO AMBIENTALE DELLA TECNOLOGIA

5.1. Introduzione

Nel momento in cui si è dovuta ricercare una soluzione per l'”inconveniente ambientale” avvenuto al Fondo Colombarotto, sono state prese in considerazione le possibili soluzioni e tecnologie di *bioremediation* già note che potessero garantire condizioni di messa in sicurezza permanente.

Una volta studiate le caratteristiche del sito, la scelta dell'alternativa più adatta è risultata ristretta alle seguenti possibilità:

- Rimozione dei fanghi miscelati col terreno e successivo trattamento/smaltimento in un impianto autorizzato;
- *Bioventing*;
- *Biopile on site* e rimozione dei fanghi miscelati col terreno.

Sarebbe stato possibile anche applicare tali tecniche simultaneamente nelle diverse porzioni dell'area caratterizzate da specifiche peculiarità [1].

Obiettivo di questo capitolo è fornire indicazioni di natura economica e di impatto ambientale delle diverse tecniche applicabili a casi analoghi a quello in esame e di effettuare a tale riguardo un confronto con la tecnologia innovativa sviluppata da Amek S.c.r.l. e utilizzata per il risanamento del sito.

Verrà inoltre presentato il metodo del *Life Cycle Assessment* e il suo utilizzo per le tecnologie di bonifica ambientale. L'azienda ha infatti intenzione di effettuare un LCA della tecnologia, tramite cui sarà possibile svolgere uno studio dettagliato degli impatti ambientali e che permetterà un confronto preciso e quantitativo con le altre tecnologie. Sulla base degli studi svolti sull'argomento verrà indicato qualitativamente ciò che dovrebbe essere considerato per effettuare un LCA della tecnologia di Amek.

5.2. Possibili soluzioni alternative

➤ Rimozione dei fanghi miscelati con il terreno

Questa opzione consiste nell'escavazione e rimozione dei fanghi mescolati con il terreno e il loro successivo conferimento in discarica. Intuitivamente risulta essere l'alternativa più onerosa in termini economici, in quanto è necessario considerare i costi dello scavo, che sarà naturalmente proporzionale alla quantità di materiale da rimuovere, e i costi di conferimento in discarica, precisando che le discariche accettano fanghi in quantità limitata giornalmente e a un costo molto alto.

Nel caso in esame sono state stoccate circa 60.000 tonnellate di fanghi.

Considerando:

- 60.000 tonnellate di fanghi da rimuovere;
- Una capacità di scavo di circa 40 tonnellate/h;
- Un costo orario per i mezzi movimento terra (compreso l'addetto) di circa 50-80 €/h;
- E un costo di conferimento in discarica di circa 80-120 €/tonnellata.

Si ottiene per il Fondo Colombarotto:

Tempo impiegato per lo scavo: $60.000 [t]/40 [t/h] = 1500 \text{ h}$ (con un solo escavatore).

Considerando 8 h/g per circa 220 giorni lavorativi l'anno, il tempo impiegato per rimuovere tutto il materiale risulta pari a circa 1 anno. E' però necessario precisare che la quantità di fanghi che è possibile rimuovere ogni giorno dipende dalla disponibilità giornaliera delle discariche ad accettare fanghi, dunque il tempo impiegato nella pratica sarebbe stato molto maggiore.

Inoltre, sono stati considerati solo le 60.000 tonnellate di fanghi da rimuovere. In realtà, come prescritto dalla normativa, il fango è utilizzato in miscela con il terreno (non dovrebbe essere superiore al 30% in peso). A questo valore andrebbe quindi aggiunta la quantità di terreno mescolato con i fanghi che viene conferito anch'esso in discarica. Nonostante ciò, poiché il ripristino non è stato effettuato rispettando le proporzioni indicate dalla normativa, non è possibile calcolare con esattezza la quantità totale di materiale da rimuovere. Dunque si precisa che i costi di seguito calcolati dovranno essere considerati come previsioni ottimistiche.

Costo scavo: $1500 [h] \times 70 [€/h] = 105.000 \text{ €}$

Costo conferimento in discarica: $60.000 [t] \times 100 [€/t] = 6.000.000 \text{ €}$

Inoltre, è necessario considerare i costi del trasporto in discarica, non calcolabili in quanto dipendenti dalla distanza. E' possibile che vi sia la necessità di trasportare il materiale anche molto lontano, a seconda della disponibilità ad accettare i fanghi.

Dunque i costi sono eccessivamente alti, impraticabili nel caso in esame. Di contro la durata dell'intervento è relativamente bassa.

Dal punto di vista ambientale, questa possibilità comporta un impatto acustico e visivo molto alto, cattivi odori ed emissioni in atmosfera durante tutto il tempo degli scavi [1].

➤ **Bioventing**

Il *bioventing* è una tecnica biologica di risanamento di siti contaminati. Consiste nell'abbattimento naturale di tutti quei composti biologicamente degradabili, con l'ausilio di microrganismi presenti nel suolo e mediante la fornitura di ossigeno, convertendo le condizioni da anaerobiche ad aerobiche [2]. E' un processo di aerazione *in situ* del suolo per stimolare l'attività biologica e garantire la *bioremediation*. Tipicamente è applicata al sottosuolo non saturo tramite iniezione di ossigeno sottoforma di aria. I sistemi di *bioventing* sono progettati per massimizzare la biodegradazione e minimizzare la volatilità. Il *bioventing* impiega dei flussi di aria piuttosto bassi, sufficienti a fornire l'ossigeno necessario all'attività microbica. La tecnologia dispone di pozzi di iniezione per l'introduzione dell'aria [3].

Il processo si può applicare a idrocarburi petroliferi, solventi non clorurati, alcuni pesticidi e altri composti organici. La tecnologia di *bioventing* è influenzata dalla permeabilità e dalla velocità di respirazione *in situ* del suolo. Importanti parametri da considerare sono le dimensioni granulometriche del terreno e l'umidità che influenzano in modo determinante la permeabilità all'aria. La combinazione di alta umidità e granulometria fine della matrice sono sfavorevoli alla buona riuscita della bonifica con questa tecnica. Per una buona attività batterica il pH del suolo deve variare nell'intervallo 6-8; alti valori di umidità riducono la permeabilità e l'ossigeno presente nel suolo, mentre livelli troppo bassi di umidità inibiscono l'attività microbica [2].

Il costo di questa tecnologia è piuttosto basso così come l'impatto ambientale, con impatto acustico ed emissioni in atmosfera causati da soffianti. La durata è, infine, piuttosto lunga [1].

In figura 5.1 è rappresentato un disegno esplicativo di questa tecnica.

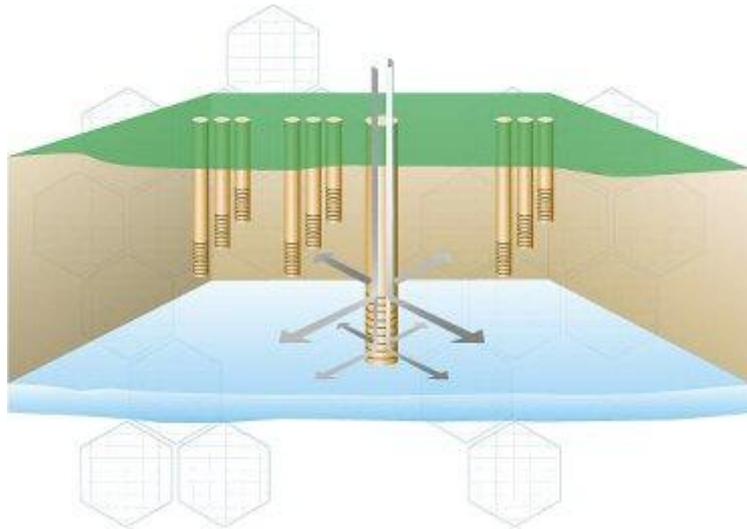


Figura 5.1 - Bioventing [3]

Per quel che riguarda i costi, in base a dati reperiti sul web [3], si può indicare un valore tra i 10 e i 60 €/m³.

I costi dipendono notevolmente dalla grandezza del sito. In fatti per siti molto grandi possono essere raggiunti costi al m³ molto bassi, anche inferiori ai 10 €. Al contrario, costi altissimi (anche maggiori dei 60 € al m³ indicati) possono essere associati a siti molto piccoli.

Di seguito è riportata una tabella che illustra i costi in maniera più dettagliata per la *remediation* di un sito con circa 5000 m³ di suolo contaminato e una concentrazione media di JP-4 di 3000 mg/kg (l'intervento ha previsto 4 pozzi di iniezione ad una profondità di circa 5 metri) [3].

E' necessario precisare che questi valori sono puramente indicativi e non sono direttamente confrontabili con quelli riportati negli altri casi, ma hanno lo scopo di dare un' indicazione di massima. Infatti i costi variano in relazione a molte variabili, tra cui il tipo di contaminante e le caratteristiche del sito.

Tabella 5.1 – Costi tipici per il *bioventing* [3]

Attività	Costi (\$)
Visita sito/pianificazione	5.000
Piano di lavoro	5.000
Test pilota	27.000
Approvazione	3.000
Costruzione <i>full-scale</i>	
Progetto	7.500
Trivellazione/campionamento	15.000
Installazione/avviamento	5.000
Monitoraggio di 2 anni	8.500
Elettricità (2 anni)	2.800
Campionamento del suolo a due anni	13.500
Totale	92.300

➤ ***Biopile on site***

E' una tecnologia *ex situ* che prevede l'escavazione del terreno contaminato e il successivo mescolamento con ammendanti, attuando un processo di compostaggio in pile statiche areate. Si formano cumuli di terreno contaminato che vengono disposti su di una rete di tubazioni forate attraverso le quali viene introdotta l'aria e elementi nutrienti. Qualora siano presenti sostanze volatili, la biopila può essere ricoperta con teli impermeabili. Attraverso opportuni fori si possono controllare e captare i gas prodotti: l'aerazione avviene per aspirazione per avere anche un controllo delle emissioni volatili. Il controllo dell'umidità può avvenire tramite l'immissione di aria satura di vapore d'acqua o impiegando un impianto di irrigazione. Le sostanze nutrienti possono essere aggiunte al terreno prima della costruzione dell'impianto stesso; può essere presente un sistema di drenaggio per far circolare l'acqua raccolta [2].

L'aria estratta è trattata tramite biofiltro.

Tale tecnica può essere utilizzata per composti organici volatili non alogenati, derivati del petrolio, composti organici volatili alogenati, composti organici semi-volatili alogenati, pesticidi. L'umidità se troppo alta riduce la diffusione dell'ossigeno, se bassa riduce l'attività dei microrganismi, il pH deve essere compreso tra 6,5 e 8,5. Se c'è alta

piovosità è necessario predisporre gli opportuni drenaggi [2]. In figura 6.2 è rappresentato un disegno di questa tecnica.

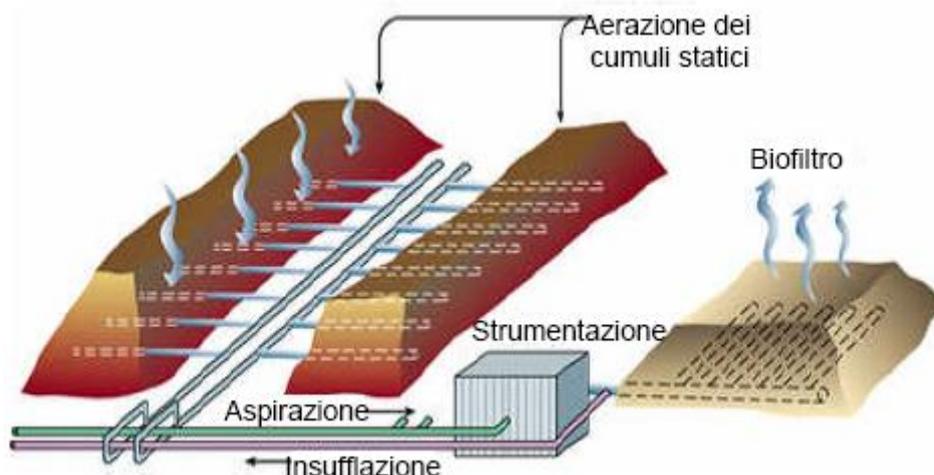


Figura 5.2 - Biopile [4]

Questa soluzione comporta un alto impatto ambientale: impatto acustico, cattivi odori ed emissioni in atmosfera durante gli scavi e a causa del ventilatore. I costi sono alti, superiori al *bioventing*. In base a dati reperiti sul web [5], si tratta di circa 60 - 90 euro/t per terreni contaminati da composti alogenati volatili e semi volatili, 40 - 65 euro/t per quelli contaminati da composti non alogenati volatili e semi volatili. I costi possono aumentare per terreni inquinati dai composti semivolatili più pesanti a causa del prolungarsi del trattamento.

Il tempo necessario è medio (più della prima soluzione ma meno della seconda).

➤ **Tecnologia di Amek S.c.r.l.**

La tecnologia è stata dettagliatamente descritta nel capitolo 3. E' di seguito riportata una stima dei costi che sono stati sostenuti per il risanamento del Fondo Colombarotto. Lo scopo è dare un'indicazione di quelle che sono le principali voci di costo da considerare in un intervento di questo tipo precisando che, essendo sito-specifico, potranno variare in relazione alle differenti caratteristiche. Inoltre, trattandosi della prima applicazione della tecnologia il livello di efficienza e di standardizzazione delle attività è piuttosto basso.

Le principali voci di costo da considerare sono:

- Progettazione e caratterizzazione iniziali
- Costruzione trincee
- *Compost tailored* (“su misura”)
- Principi attivi
- Monitoraggio
- Piezometri
- Campionamenti (comprese le analisi)
- Manutenzione

L'area del Colombarotto è di circa 49.000 m². E' stata considerata una profondità di circa 6 metri corrispondente alla profondità delle trincee e dunque un volume di 294.000 m³, arrotondabili a 300.000 m³ di suolo contaminato. L'area è caratterizzata dalla presenza di un fosso nella parte centrale.

Le trincee hanno una dimensione di circa 5x3 metri e sono distanti tra loro circa 20 metri (da centro a centro).

Per l'intervento sono state costruite 107 trincee, di cui 5 sono state realizzate per l'intervento in scala pilota.

Caratterizzazione iniziali: Per le caratterizzazioni iniziali comprese le analisi si possono considerare circa **50.000 euro**

Tempo scavo trincee: per fare una trincea: scavo, riempimento col *compost* (mescola) e chiusura servono circa 2 ore considerando una profondità di 6 metri (se aumenta la profondità aumenterà anche il tempo).

Per fare 107 trincee servono dunque $107 \cdot 2 \text{ [h]} = 214 \text{ h}$. considerando 8 h/g, sono circa 27 giorni, quindi poco più di un mese lavorativo.

Costo scavo trincee: il costo di tutti i tipi di mezzi movimento terra (escavatore e pala) compreso l'uomo è di circa 50-80 €/h, si considera che le macchine non lavorano contemporaneamente.

Risulta $214 \text{ [h]} \cdot 70 \text{ [€/h]} = \mathbf{14.980 \text{ €}}$

Costo *compost* e principi attivi: al Fondo Colombarotto sono serviti 5000 tonnellate di *compost* con un costo di circa 50 €/t (costo comprensivo dei principi attivi).

Quindi risulta $5000 \text{ [t]} \cdot 50 \text{ [€/t]} = \mathbf{250.000 \text{ €}}$

Costo trasporto materie prime: il *compost* è prodotto a Carpi, i principi attivi ad Imola da Amek. Il costo di trasporto è di circa 10-15 €/t. Per 5000 tonnellate di *compost*:

$5000 \text{ [t]} \cdot 13 \text{ [€]} = \mathbf{65.000 \text{ €}}$

Costo piezometri: circa **15.000 €**

Costo monitoraggio: Il monitoraggio viene effettuato una volta al mese per un totale di 20 h/mese di lavoro. Considerando un costo di 35-40 €/h e un periodo di monitoraggio di 5 anni:

$20 \text{ [h/mese]} * 60 \text{ mesi} = 1200 \text{ h}$, $1200 \text{ [h]} * 40 \text{ [€/h]} = 48.000 \text{ €}$

A cui risulta plausibile aggiungere circa 5000 € (1000 €/anno) di costi aggiuntivi per le elaborazioni dei risultati, le relazioni, eventuali interventi di manutenzione delle attrezzature di monitoraggio e l'ammortamento dello strumento di misura.

Risulta un totale di circa **53.000 €**

Campionamenti: finora ne sono stati fatti due, circa 2.000 € l'uno a cui dovrà esserne aggiunto un terzo, per un totale si circa 6.000 €. Per le analisi dei campioni, invece sono stati necessari circa 20.000 euro. Tot: **26.000 €**

Il costo totale risulta circa:

$50.000 + 14.980 + 250.000 + 53.000 + 15.000 + 65.000 + 26.000 = \mathbf{473.980 \text{ €}}$

I costi relativi progettazione iniziale e manutenzione non sono stati considerate, in quanto non è stato possibile calcolarli.

Tale valore va considerato in relazione al grande volume di suolo da trattare. Come già precisato si tratta di circa 300.000 m³ considerando una profondità di solo 6 metri, anche se in alcuni punti i fanghi sono stati stoccati a profondità molto maggiori. Considerando una densità del terreno di 1200 kg/m³, si ottiene un peso di 360.000 tonnellate.

Le voci di costo più rilevanti risultano essere quelle per il *compost* e gli enzimi e il loro trasporto.

Per quanto riguarda l'impatto ambientale, sicuramente bisogna considerare i cattivi odori e le emissioni in atmosfera durante gli scavi per costruire le trincee, che, però, rispetto al caso del *biopile* e della rimozione dei fanghi hanno una durata molto ridotta, appena un mese. L'impatto visivo è medio durante il periodo degli scavi e pressoché nullo nella fase post-trattamento. Infine la durata è difficilmente prevedibile anche perché nel caso in esame l'intervento non è ancora terminato ma per questo tipo di bonifica tipicamente è medio-lunga.

5.3. LCA - *Life Cycle Assessment*

5.3.1. *Introduzione*

Il metodo *Life Cycle Assessment* (LCA) rappresenta uno degli strumenti fondamentali per l'attuazione della IPP (*Integrated Product Policy* - Politica integrata dei prodotti) e lo strumento operativo principale del "Life Cycle thinking" [6]. Si tratta di "un procedimento oggettivo di valutazione di carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale" [7]. Questo approccio viene definito "dalla culla alla tomba" (*from cradle to grave*).

La valutazione dei carichi ambientali del ciclo di vita di un prodotto o servizio avviene attraverso la contabilizzazione di tutti i consumi di materie prime, acqua e fonti energetiche (input) e di tutte le emissioni gassose, liquide e solide, di rifiuti e di altri rilasci (output). Vengono considerati anche i "risparmi ambientali" dovuti alla produzione evitata di materiali ed energia grazie al riuso, riciclo o alla termovalorizzazione del prodotto considerato [8].

Dalla definizione emerge come il concetto di valutazione, alla base del metodo, sia strettamente collegato con quello di confronto e dovrebbe quindi essere inteso come una comparazione il più possibile esaustiva tra due o più prodotti, sistemi, metodi ecc.

La normativa di riferimento è la serie ISO 14040:

- **UNI EN ISO 14040**: 2006, "Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento"
- **UNI EN ISO 14044**: 2006, "Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida"
- **ISO 14047**: 2003, "Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Esempi di applicazione delle ISO 14042".
- **ISO 14048**: 2002, "Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Modello per la documentazione della qualità del dato".
- **ISO 14049**: 2000, "Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Esempi di applicazione delle ISO 24042 per la definizione dell'obiettivo, dello scopo e dell'analisi dell'inventario".

Condurre un LCA completo, dalla culla alla tomba appunto, può risultare eccessivamente oneroso in termini di tempo e denaro. Sono quindi stati individuati metodi per semplificare la metodologia senza rinunciare alle caratteristiche fondamentali di uno studio completo e senza perdere l'accuratezza e l'attendibilità dei risultati.

Le strategie semplificative possono riguardare la limitazione degli obiettivi, la limitazione della quantità di dati richiesti o il restringimento dei confini del sistema [8].

5.3.2. Metodologia

La norma ISO 14040 definisce la metodologia LCA come composta da quattro fasi principali:

- 1. Definizione degli obiettivi e dei confini del sistema** (*Goal and scope definition*).
- 2. Redazione e analisi dell'inventario** (*Life Cycle Inventory - LCI*) – compilazione di un inventario completo dei flussi in ingresso (materiali, energia, risorse naturali) e in uscita (emissioni in aria, acqua e suolo, rifiuti) che siano rilevanti per il sistema definito.
- 3. Valutazione degli impatti ambientali** (*Life cycle impact assessment - LCIA*) – valutazione dei potenziali impatti ambientali diretti e indiretti, associati a questi input e output e della loro significatività.
- 4. Interpretazione dei risultati e analisi di miglioramento** (*Interpretation and improvement analysis*) – analisi dei risultati delle due fasi precedenti e definizione delle possibili linee di intervento [8].

5.3.2.1. Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio

In questa fase vengono dichiarati gli obiettivi e le motivazioni dello studio, le applicazioni previste, i destinatari dello studio e la descrizione del sistema oggetto dello studio e relativi confini.

Per la scelta dei confini del sistema, si ritiene utile riportare le definizioni di sistema di prodotto e unità di processo fornite dalla norma ISO 14040.

- **Sistema di prodotto:** si intende un insieme di unità di processo interconnesse da flussi di prodotti intermedi che rappresentano una o più funzioni definite (il termine funzione indica una caratteristica prestazionale del sistema). La descrizione di un sistema di prodotti comprende le unità di processo, i flussi elementari e i flussi di prodotti che oltrepassano i confini del sistema, nonché i flussi intermedi dentro il sistema.
- **Unità di processo:** sono la più piccola parte di un sistema di prodotto per la quale sono stati raccolti i dati nel corso della Valutazione del Ciclo di Vita. Sono collegate tra loro da flussi di prodotti intermedi (materiali di base, semilavorati) e/o rifiuti da trattare e sono collegate con altri sistemi di prodotti e con l'ambiente da flussi elementari in input (materie prime, energia) e in output (radiazioni, emissioni in aria, acqua, suolo).

La descrizione delle unità di processo considerate è importante per definire da una parte dove ha inizio ogni sistema di prodotti in termini di ricevimento di materie prime e prodotti intermedi, dall'altra per la definizione della natura delle trasformazioni e delle operazioni che si svolgono al suo interno. Inoltre, poiché una unità di processo genera a sua volta altre entità in uscita come risultato delle sue attività, il suo confine sarà determinato dal livello di dettaglio richiesto per soddisfare l'obiettivo dello studio.

Infine, poiché il sistema considerato è un sistema fisico, ogni unità di processo deve considerare le leggi di conservazione di massa ed energia e perciò la validità della descrizione dell'unità di processo potrà essere controllata proprio attraverso un bilancio di massa ed energia.

Per una descrizione chiara di un sistema di prodotti è molto utile l'uso di un **diagramma di flusso** di processo, che permetta di illustrare le unità di processo considerate.

Nella descrizione del campo di applicazione di una LCA si deve specificare con chiarezza quali sono le funzioni del sistema in analisi, ovvero le caratteristiche prestazionali del sistema di prodotti o dei sistemi nel caso di studi comparativi.

Al fine di quantificare le tali funzioni si utilizza l'unità funzionale, definita dalla norma ISO 14040 come:

“Prestazione quantificata di un sistema di prodotto da utilizzare come unità di riferimento in uno studio di Valutazione del Ciclo di Vita. Lo scopo principale dell'unità funzionale è di fornire un riferimento a cui legare i flussi in entrata ed in uscita. Questo riferimento è necessario per consentire la comparabilità dei risultati della

LCA, che risulta critica quando si valutano sistemi differenti perché ci si deve assicurare che il confronto venga fatto su base comune”.

L'unità funzionale costituisce il riferimento a cui tutti i dati dello studio in ingresso e in uscita saranno normalizzati permettendo anche il confronto tra diversi sistemi, perciò essa deve essere chiaramente definita e misurabile.

In alternativa ad uno studio completo, nel caso in cui non ci fosse sufficiente tempo, dati o risorse, si può decidere di escludere delle unità di processo dalla composizione del modello. In questo caso qualunque decisione di eliminare fasi del ciclo di vita, processi o flussi in ingresso o in uscita deve essere chiaramente indicata e giustificata [8].

5.3.2.2. Analisi di inventario - LCI

La redazione dell'inventario (*Life Cycle Inventory* – LCI) è il cuore di un'analisi LCA. In questa fase vengono riportati tutti i flussi di energia e di materia del sistema/prodotto in esame normalizzati all'unità funzionale. Questi flussi sono espressi in unità fisiche (unità di massa e di energia) e comprendono l'utilizzo di risorse e di energia e tutti i rilasci in aria, in acqua e nel suolo associati al sistema.

Nell'inventario devono essere inclusi i dati raccolti per ognuna delle unità di processo comprese nei confini del sistema. La qualità dei dati raccolti ed usati nella fase di inventario è propedeutica alla qualità finale dello studio LCA, per questo motivo tali dati dovrebbero rispondere a criteri di completezza, precisione, rappresentatività, coerenza e riproducibilità. Un metodo di valutazione semplice consiste nell'effettuare un bilancio di massa per ogni processo, tenendo conto del fatto che l'ammontare degli input deve essere pari al rilascio degli output. E' necessario descrivere dettagliatamente la qualità dei dati per poter successivamente operare confronti fra studi su sistemi analoghi [8].

Durante la raccolta dovrebbe essere utilizzato un consistente numero di fonti come altre analisi LCA, banche dati internazionali o disponibili in software, dati provenienti dalla letteratura, *proceedings* di convegni e congressi, informazioni disponibili in internet e dati raccolti sul campo presso aziende e industrie.

I dati misurati direttamente dall'autore presso siti industriali sono definiti dati primari, quelli ricavabili da letteratura, banche dati o da database presenti nel software utilizzato per l'analisi sono dati secondari (di cui è bene controllare la fonte e la data di

pubblicazione). Infine, sono detti dati terziari quelli provenienti da stime o da valori medi.

Ad oggi, il problema della qualità dei dati rappresenta sicuramente il punto critico della metodologia del ciclo di vita, poiché esistono troppi dati di natura confidenziale e differenze consistenti tra banche dati su uguali processi produttivi [8].

➤ **Allocazione dei flussi e dei rilasci**

Una analisi di inventario si basa sulla capacità di correlare delle unità di processo all'interno di un sistema con flussi elementari di materiali ed energia. Tuttavia nella realtà sono davvero pochi i processi industriali che producono un solo flusso in uscita o che sono fondati sulla linearità tra materie prime in ingresso e in uscita. Nella maggior parte dei casi, infatti, i processi industriali comportano più di un prodotto e alcuni prodotti intermedi o di scarto possono essere riciclati e riutilizzati come se fossero materie prime. Di conseguenza i flussi di materiali ed energia, nonché i rilasci nell'ambiente ad essi associati, dovranno in alcuni casi essere allocati all'interno del sistema prodotto. Tale processo dovrà essere documentato e giustificato per ognuna delle unità di processo considerate e dovrà essere condotto secondo procedure chiaramente definite.

Le procedure di allocazione, che dovrebbero approssimare meglio possibile le relazioni che sussistono tra i flussi in ingresso e in uscita, possono basarsi sulle proprietà fisiche o sul valore economico dei vari prodotti. Comunque, se possibile, il processo di allocazione dovrebbe essere sempre evitato [8]

➤ **Interpretazione dei risultati e limitazioni dell'analisi di inventario**

L'interpretazione dei risultati di una LCI deve avvenire in accordo con l'obiettivo ed il campo di applicazione dello studio e dovrà comprendere:

- una valutazione della qualità dei dati e un'analisi di sensibilità dei flussi in ingresso e in uscita significativi nonché delle scelte metodologiche adottate, con lo scopo di poter valutare l'incertezza dei risultati;
- l'identificazione delle limitazioni dello studio sempre mediante una valutazione della qualità dei dati e un'analisi di sensibilità;

- una verifica del fatto che le definizioni del sistema e dell'unità funzionale siano appropriate;

- una verifica del fatto che la definizione dei confini del sistema sia appropriata.

E' necessario ricordare sempre che i risultati dell'interpretazione di una analisi di inventario si riferiscono a dati in ingresso e in uscita e non direttamente agli impatti sull'ambiente, anche per questo una LCI non dovrebbe essere utilizzata come base per fare dei confronti [8].

5.3.2.3. Valutazione degli impatti ambientali

➤ Definizione e finalità

Lo scopo di questa fase è di valutare la portata degli impatti ambientali del sistema trasformando ogni flusso di sostanze della tabella di inventario in un contributo agli impatti stessi mediante gli indicatori di impatto.

Questa valutazione possiede come matrice di base l'inventario dell'oggetto in esame, cioè il complesso bilancio materiale ed energetico in uscita dalla LCI, e permette di ottenere risultati di più immediata comprensione che permetteranno di definire i miglioramenti ambientali da apportare al sistema dello studio.

Nelle suddette norme ISO si legge:

“Il fine della LCIA è valutare i risultati dell'analisi dell'inventario del ciclo di vita (LCI) di un sistema di prodotto, per comprendere meglio la loro significatività ambientale.”

Generalmente le ISO adottano la metodologia denominata “a fase multipla” che consiste nell'associare quantitativamente tutti i consumi delle risorse e i rilasci ambientali a determinate categorie d'impatto (eutrofizzazione delle acque, formazione di smog fotochimico, impoverimento dell'ozono stratosferico, ecc.) che saranno successivamente stimate assegnando loro un peso fino a giungere alla determinazione dell'indicatore ambientale finale, somma degli indicatori delle singole categorie d'impatto [8].

Tale approccio si articola in quattro momenti principali:

i. classificazione;

ii. caratterizzazione;

iii. normalizzazione;

iv. ponderazione.

Per la ISO i primi due momenti sono obbligatori, mentre la normalizzazione e la ponderazione rappresentano elementi facoltativi da essere utilizzati in funzione dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio LCA.

i. Classificazione

Durante la classificazione si identificano le categorie d'impatto attribuendo le emissioni inquinanti e i consumi di materie prime, energia ed acqua alle specifiche categorie da essi provocati [8].

ii. Caratterizzazione

Nella fase di caratterizzazione si moltiplica la quantità di una certa sostanza (informazione presente nell'inventario) per la sua relativa attitudine o incidenza a provocare quella determinata categoria d'impatto. Generalmente questa incidenza riguarda una sostanza presa a riferimento, emblematica per quella categoria. Ad esempio, per l'effetto serra, la sostanza di riferimento è l'anidride carbonica (CO₂), e si esprimono i contributi di tutti i gas serra in kg di CO₂ equivalente. L'impatto totale sull'effetto serra del prodotto analizzato sarà dato dalla somma di tutti i contributi dei gas serra espressi in kg di CO₂ equivalenti.

Grazie alla classificazione e alla caratterizzazione si riduce notevolmente il numero di voci dell'inventario giungendo ad un numero limitato (in genere si considerano da otto a dieci effetti ambientali) che rappresenta il "profilo ambientale" (o "eco-profilo") dell'analisi.

Prima di passare al terzo momento vengono di seguito approfondite le categorie d'effetto ambientale maggiormente considerate negli studi LCA [8].

➤ Categorie di impatto

Si considerano principalmente le seguenti categorie d'impatto:

- diminuzione delle risorse (abiotiche e biotiche);
- cambiamenti climatici in riferimento al riscaldamento globale
- impoverimento dell'ozono stratosferico;
- acidificazione del suolo;
- formazione di smog fotochimico;
- arricchimento in nutrienti (eutrofizzazione);

- tossicità umana;
- eco-tossicità;
- uso del territorio.

Queste categorie devono essere considerate soltanto effetti ambientali potenziali.

Ciascun effetto ambientale è inoltre caratterizzato da una diversa e specifica sfera di influenza (globale, regionale o locale), come rappresentato in tabella 5.1. In particolare, esistono alcuni effetti, come l'eutrofizzazione, la tossicità ecologica e umana, ecc. che presentano una forte dipendenza dalle condizioni del corpo ricevente. E' in questo senso che deve muoversi la ricerca della metodologia LCA, tentando di diminuire le incertezze dovute alla variabilità geografica degli ecosistemi [8].

Tabella 5.1. - Principali effetti ambientali e scala di influenza [8].

SCALA	EFFETTO
Globale	Effetto serra
	Impoverimento dell'ozono stratosferico
	Diminuzione delle risorse non rinnovabili
Regionale	Acidificazione del suolo
	Eutrofizzazione
	Formazione di smog fotochimico
	Tossicità cronica (ambientale e umana)
Locale	Tossicità acuta (ambientale e umana)
	Degradazione dell'area
	Disturbi di tipo fisico (traffico, rumori)

iii. Normalizzazione

Terminate le fasi di classificazione e caratterizzazione e ottenuto l'eco-profilo, si passa alla normalizzazione. Le norme ISO la definiscono così:

“Calcolo dell'entità dei risultati di indicatore di categoria in rapporto all'informazione di riferimento.”

Infatti, una volta quantificati i differenti indicatori, risulta ancora complesso interpretare l'effettiva grandezza delle varie categorie d'impatto, essendo espresse in unità di misura diverse. Normalizzare vuol dire allora dividere la quantità calcolata di una categoria d'impatto per la quantità totale della stessa categoria che si verifica in uno specifico

arco temporale e in una determinata zona. Si ottengono così degli indici sintetici, grazie ai quali si può effettivamente comprendere a quale categoria d'impatto il sistema contribuisce maggiormente. I risultati normalizzati mostrano i problemi ambientali generati dal ciclo di vita di un prodotto secondo il loro "ordine di grandezza". Solo con la normalizzazione si iniziano a capire le fasi ambientalmente critiche del sistema in esame o si possono iniziare ad operare confronti tra prodotti che hanno a monte tecnologie produttive differenti.

La suddetta norma ISO definisce questa fase "opzionale" per le numerose incertezze legate all'individuazione della validità di un impatto circoscritto nel tempo e nello spazio; incertezze dovute essenzialmente alla carenza di dati statistici [8].

iv. Ponderazione

La ponderazione o pesatura (*weighting across impact categories*) è definita dalle norme ISO nel seguente modo:

"La ponderazione è il processo di conversione dei risultati di indicatore delle diverse categorie d'impatto mediante fattori numerici basate sulle scelte dei valori. Essa può comprendere l'aggregazione dei risultati di indicatore ponderati."

In questa fase si attribuisce un peso di importanza ai diversi effetti causati dal sistema, in modo che possano essere comparati tra loro per effettuare successivamente una ulteriore aggregazione dei dati.

Con la pesatura si determina alla fine un indice assoluto, il cosiddetto eco-indicatore, che esprime in modo complessivo le prestazioni ambientali del sistema. Questo indice sarà ottenuto dalla relazione:

$$I = \sum w_i \times E_i$$

dove:

E_i è l'effetto normalizzato della generica categoria d'impatto,

w_i è il peso attribuito alla rispettiva categoria d'impatto [8].

5.3.2.4. Interpretazione dei risultati

La parte conclusiva di uno studio LCA è l'interpretazione che ha lo scopo di riassumere e discutere i risultati dell'inventario e della valutazione d'impatto. Viene definita nel seguente modo:

"L'interpretazione del ciclo di vita è un procedimento sistematico volto alla identificazione, qualifica, verifica e valutazione delle informazioni contenute nei"

risultati del LCI e/o LCIA di un sistema di prodotto, nonché alla loro presentazione in forma tale da soddisfare i requisiti dell'applicazione descritti nell'obiettivo e nel campo di applicazione dello studio."

Questa fase si prefigge di analizzare e riportare i risultati in modo trasparente, di giungere alle conclusioni e di spiegare le limitazioni del sistema/prodotto dello studio.

Nella suddetta ISO questa fase comprende i tre stadi seguenti:

1. identificazione dei fattori ambientali significativi, sulla base dei risultati dell'inventario e della valutazione d'impatto, al fine di proporre eventuali opzioni di miglioramento,
2. valutazioni, cioè verifica della completezza di input e output, della sensibilità e della coerenza dei risultati,
3. conclusioni, raccomandazioni e redazione di un rapporto finale.

Infine la fase di miglioramento completa il ciclo di analisi e permette di indirizzare il sistema verso un reale obiettivo di eco-sostenibilità, nonché di eco-efficienza.

A livello organizzativo e progettuale, il miglioramento della produzione, attuato sulla base di uno studio LCA, richiede un grande sforzo, infatti risulta complicato scegliere tra le varie alternative applicabili al sistema o scegliere l'alternativa che massimizza l'efficienza energetico - ambientale totale [8].

5.3.3. Software per LCA

La rapida divulgazione della metodologia LCA è stata accompagnata dallo sviluppo di numerosi software che consentono di agevolare l'utente nella costruzione del modello da studiare offrendo fogli di calcolo e visualizzazioni grafiche che ne facilitano l'interpretazione e le conclusioni.

Qualsiasi software LCA, anche se con caratteristiche e livelli di complessità differenti, ha la funzione di supportare l'utente nelle seguenti tre fasi di analisi:

- **Inventario:** essendo la fase più impegnativa, un software LCA ha il vantaggio di offrire una notevole quantità di dati disponibili pertinenti a svariati settori e con ottimi livelli di qualità. Si cerca così di limitare la soggettività nella scelta delle fonti informative.

- **Analisi degli impatti:** la valutazione degli impatti viene effettuata grazie ai differenti modelli di calcolo presenti in questi strumenti. L'utente può scegliere il metodo di valutazione più appropriato al suo studio realizzando anche comparazioni tra i diversi metodi. Inoltre c'è anche la possibilità di considerare soltanto alcune categorie d'impatto oppure solo alcuni specifici stadi del ciclo di vita.
- **Interpretazione:** la fase conclusiva viene agevolata grazie al supporto di svariate visualizzazioni grafiche; inoltre alcuni software consentono anche analisi di sensibilità, simulazione di scenari alternativi ed elaborazioni statistiche dei risultati.

Attualmente sono disponibili approssimativamente 35-40 software per analisi LCA, differenti tra loro in prestazioni e campi di applicazione [8].

5.4. LCA per le tecnologie di bonifica

5.4.1. Introduzione

Il *Life Cycle Assessment* sta diventando uno strumento molto diffuso anche per le decisioni riguardanti la bonifica dei siti contaminati. La bonifica di un sito contaminato riduce un problema ambientale locale ma, allo stesso tempo, le attività di *remediation* effettuate al fine di risolvere tale problema possono causare effetti negativi per l'ambiente in scala locale, regionale e globale. L'LCA può quindi essere usato per valutare il *trade off* tra questi due effetti e per confrontare differenti scenari in termini del corrispondente "peso" ambientale. L'approccio a questo tipo di intervento è oggi sempre più legato alla necessità di scegliere la soluzione ambientalmente preferibile invece che effettuare valutazioni basate esclusivamente su considerazioni tecniche ed economiche [9].

Effettuando ricerche sul web e da bibliografia scientifica è stata osservata la presenza di un numero limitato di studi sull'argomento; diversamente da quanto accade per alcune tipologie di prodotti, non esistono dunque standard consolidati derivanti da una vasta letteratura per analisi LCA di tecnologie di risanamento.

Una *review* del 2009 [9] riporta indicazione degli articoli scritti nei 12 anni precedenti sull'argomento. Dalla lettura di tale *review* è stato possibile evincere come solo pochi studi siano stati condotti per le tecnologie di *remediation in situ*, mentre la maggior

parte si concentra sulla *remediation ex situ*. Questo perché quest'ultima è stata applicata più frequentemente rispetto a quella *in situ*, sviluppata invece solo in tempi recenti.

Nella maggior parte degli articoli si sottolinea l'importanza di valutare sia gli impatti primari che secondari della bonifica. Gli impatti primari riguardano la contaminazione residua durante e dopo l'intervento e variano in relazione alle differenti tecnologie e alle rispettive performance di efficienza e durata della bonifica. Invece, gli impatti secondari riguardano le risorse usate e le emissioni in altri stadi del ciclo di vita del processo di risanamento.

Generalmente l'unità funzionale utilizzata negli studi è basata sul volume del suolo (o la falda acquifera) contaminato da trattare. Questo perché la definizione dell'unità funzionale, in particolare nel caso in cui sia necessario condurre un LCA comparativo, deve essere preferibilmente basata sugli input piuttosto che sugli output del trattamento poiché l'efficienza di *remediation* varia. Da ciò deriva la necessità di valutare gli impatti primari della contaminazione residua nella valutazione degli impatti.

Nonostante la standardizzazione dell'LCA da parte dell'ISO, molti aspetti dell'analisi riguardano scelte fatte dall'analizzatore specialmente per quanto riguarda la parte relativa alla valutazione dell'impatto, per cui sono disponibili molti metodi. I risultati e le conclusioni spesso non sono dunque confrontabili [9].

Come è stato detto la *review* si rivolge a tecnologie di bonifica:

- *Ex situ* (*on site* o *off site*)
- *In situ*

➤ **Definizione degli obiettivi e dei confini del sistema e analisi dell'inventario**

Gli studi si dividono in due gruppi in base al principale obiettivo dell'LCA:

- 1) LCA come supporto alla decisione → ***Prospective***
- 2) LCA di una o più tecniche → ***Retrospective***

L'LCA *Prospective*, utilizzato come supporto alle decisioni, sarà meno approfondito in quanto basato su un minor numero di dati.

Tutti gli articoli pongono grande attenzione ai *core components* del progetto di *remediation* in termini di costruzione e attività operative *on site*, così come attività *ex situ* di trattamento del suolo e/o conferimento in discarica.

In genere il trasporto dei materiali, delle attrezzature ed, eventualmente, del suolo sono inclusi nello studio. Nel caso di conferimento in discarica, le emissioni di queste ultime non sono generalmente considerate.

Una semplificazione comune fa sì che la costruzione dei macchinari e veicoli sia esclusa poiché possono essere riutilizzati.

Per il trattamento *ex situ* del suolo, tutti i materiali per la costruzione degli impianti di trattamento *single-use* sono considerati, invece per quanto riguarda gli impianti permanenti, solo parte degli impatti della costruzione sono allocati al progetto di *remediation*, in base alla loro capacità totale e alla presunta vita utile.

Le attività di monitoraggio (trasporto delle persone e analisi di laboratorio) sono esplicitamente esclusi in alcuni casi. In uno degli studi è incluso il trasporto dei campioni per le analisi ma non le analisi di per sé per il loro ruolo minore.

Tutti gli studi si focalizzano sulla raccolta di dati specifici per i processi di primo piano mentre usano dati medi per i processi meno specifici come la produzione di elettricità, diesel, acciaio ecc. Le analisi *retrospective* basano i loro dati sulle informazioni dei *reports* finali del progetto, da consulenti e appaltatori.

Gli studi prospettici invece contano su modelli sito specifici e dimensionamenti usando strumenti di simulazione e modelli analitici [9].

➤ **Valutazione degli impatti**

In nove degli articoli vengono considerate alcune o tutte le categorie convenzionali di impatto ma, specialmente gli studi più vecchi, si focalizzano solo su poche categorie selezionate, combinate con categorie aggiuntive importanti nello specifico caso, ad esempio l'uso del terreno, odori e/o rumori.

Diamond et al. [10], invece, includono un numero di impatti collegati al sito da inserire in una struttura generale per la gestione del ciclo di vita della bonifica del sito inquinato. Questi impatti sito specifici coprono cambiamenti fisici del sito in seguito alle attività di *remediation* ovvero cambiamenti nei parametri della qualità del suolo così come danni all'habitat e disturbi all'uomo.

Le emissioni relative alle categorie di impatti: riscaldamento globale, impoverimento dell'ozono stratosferico, formazione di smog fotochimico, acidificazione del suolo e arricchimento in nutrienti, sono trattati in maniera piuttosto simile negli studi che li considerano, riflettendo l'alto consenso su come modellare questi impatti. Le maggiori differenze sono trovate nei modelli applicati per quantificare l'eco-tossicità e la tossicità umana.

➤ **Risultati**

I consumi *on site* di diesel ed elettricità sono generalmente la più grande causa di impatti ambientali. Un altro grande contributo è il trasporto di suolo nel caso di sistemi *off site*, in cui è incluso anche il conferimento in discarica.

Il consumo di materiali come metalli e plastica generalmente contribuiscono poco alla valutazione. Inoltre la produzione di carbone attivo per il trattamento della falda acquifera contaminata è stata trovata molto significativa per gli studi che l'hanno considerata. Un altro materiale importante per la valutazione è l'asfalto usato per pavimentare il sito di trattamento del suolo [9].

Diamond et al. [10] riportano uno schema (Figura 5.3) di quelli che sono i classici stadi di un intervento di bonifica, con i relativi confini e flussi in ingresso e uscita.

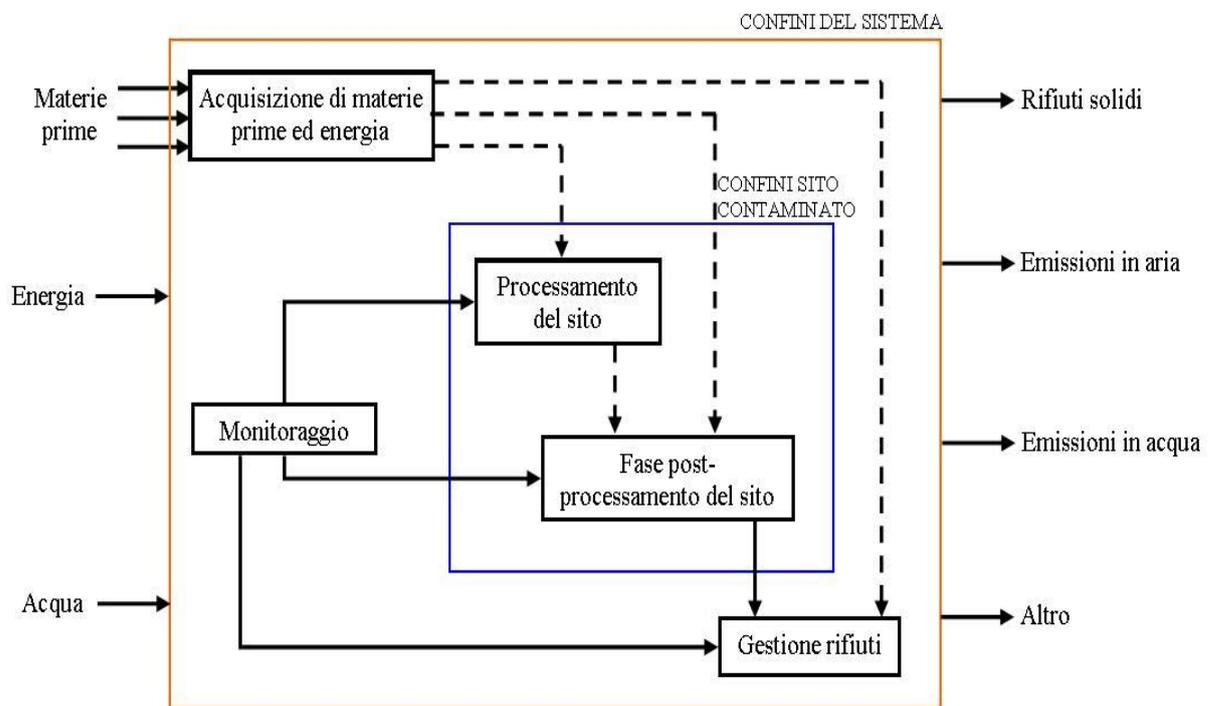


Figura 5.3 – Stadi di un intervento di bonifica [10]

Gli stadi rappresentati sono l'acquisizione delle materie prime e dell'energia, il trattamento del sito e la fase successiva al trattamento. I sottostadi del ciclo di vita che possono essere associati ad ogni stadio sono trasporto, distribuzione, gestione dei rifiuti e monitoraggio.

La fase di processamento del sito include il trattamento del suolo contaminato e si considera concluso quando il suolo contaminato è stato trattato e esposto ad una opzione

di *remediation*, cioè la concentrazione di contaminante non deve essere necessariamente cambiata.

Le attività post processamento del sito avvengono dopo che le attività principali sono concluse, ma cadono ancora dentro l'arco complessivo del ciclo di vita (es. manutenzione, raccolta del percolato ecc)

I sotto stadi del ciclo di vita di trasporto e distribuzione includono lo spostamento del suolo, delle materie prime e degli *outputs* (ad esempio i rifiuti), invece la distribuzione comprende tutte le attività non di trasporto che facilitano il trasferimento del terreno o altri materiali (es. immagazzinamento) [10].

5.4.2. Esempio di LCA di confronto

Cadotte et al. [11] riportano un confronto effettuato tramite *LCA prospective* tra diverse combinazioni di trattamenti per individuare la tecnologia da adottare in un sito contaminato da diesel in Quebec (Canada). Gli scenari considerati sono quattro e includono sia trattamenti *in situ* che *ex situ* e il caso è peculiare poiché la contaminazione riguarda sia il suolo che la falda acquifera. Gli impatti sono valutati per ogni anno di trattamento.

Per quanto riguarda il trattamento del suolo, le alternative sono:

- 1) *Natural attenuation*
- 2) *Bioventing*
- 3) *Biopile ex situ (on site)*

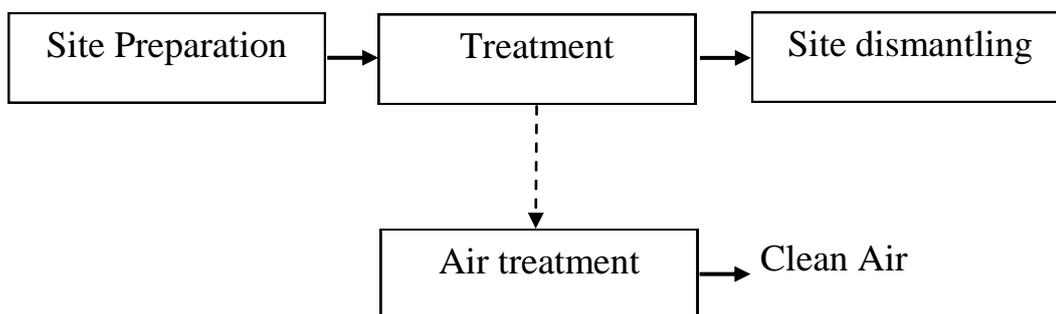
Vengono brevemente riportati gli aspetti principali di questo studio, con attenzione alla bonifica del suolo e in particolare al confronto tra *biopile ex situ* e *bioventing*.

Nello studio sono stati considerati: il tempo di trattamento, gli impatti ambientali primari (contaminazione residua lasciata nel suolo dopo il trattamento) e secondari (impatti causati dalla *remediation*). L'analisi ha lo scopo di scegliere la migliore tecnologia per ridurre il carico ambientale totale.

L'unità funzionale considerata è la *remediation* di 375 m³ di sito contaminato da diesel.

In figura 5.4 e 5.5 sono rappresentati i diagrammi di flusso delle due tecnologie

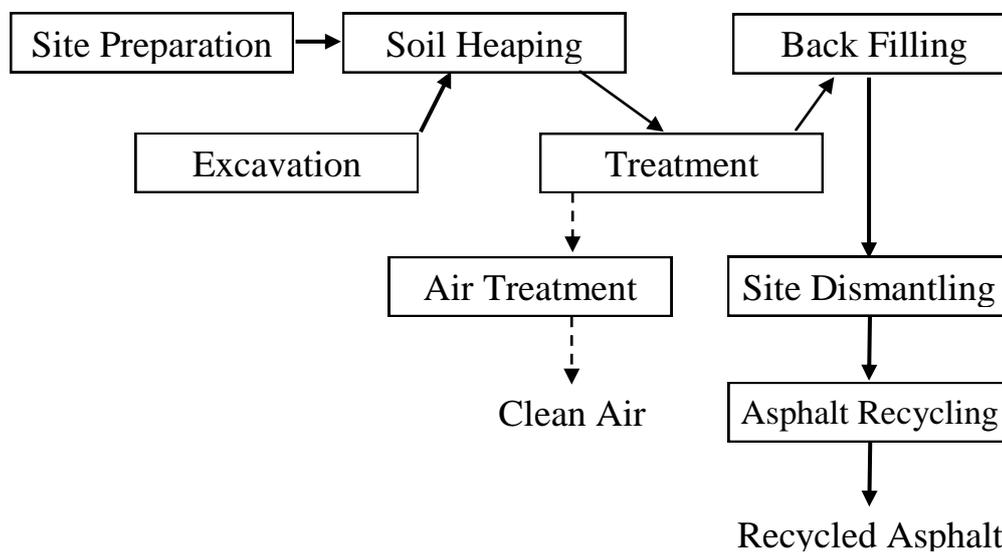
Bioventing:



- > Site
- - -> Waste Management
- > Soils

5.4 – Diagramma di flusso *bioventing* [11]

Excavation and Biopiles:



- > Site
- - -> Waste Management
- > Soils

5.5 – Diagramma di flusso *Biopiles ex situ* [11]

Come si può notare i confini del sistema non includono la caratterizzazione. La preparazione del sito è fatta all'inizio del trattamento e tutta l'attrezzatura deve essere rimossa alla fine. La fase di preparazione include la produzione e il trasporto di tutte le attrezzature e i materiali necessari per ogni tecnologia. La fase di rimozione include invece il trasporto indietro delle macchine e il trasporto del suolo pulito quando è necessario.

Il primo confronto riguarda il tempo, il *bioventing* impiegherebbe nel caso in esame circa 8 anni, mentre il trattamento con *biopile* quasi 4 anni.

Il carico ambientale è stato calcolato in relazione all'unità funzionale. La necessità di attrezzature, la quantità di diesel ed elettricità sono state calcolate anche in relazione al tempo di trattamento per ogni tecnologia.

Tutti i trasporti sono stati inclusi così come le emissioni dei camion e dei macchinari; il diesel estratto è riciclato ma il suo trasporto in unità di riciclo non è stato considerato; l'asfalto usato per la pavimentazione del *biopile* è stato riciclato anch'esso; le attività di monitoraggio *ex situ* e le analisi di laboratorio non sono state considerate per la loro minore importanza, ma il trasporto dei campioni in laboratorio è incluso[11].

Nelle tabelle 5.2 e 5.3 vengono indicati i materiali in ingresso e le emissioni in uscita per ognuna delle tre tipologie di trattamento del suolo.

Risultati: *Bioventing* e *biopile* hanno trattato il suolo ottenendo una concentrazione accettabile per le regolamentazioni del Quebec per il suolo contaminato (QRCS).

Gli input sono particolarmente rilevanti per il trattamento con *biopile*, in particolare per l'asfalto e la ghiaia necessari a pavimentare l'area di trattamento. Anche le emissioni per il *biopile* sono molto maggiori del *bioventing*, in particolare a causa della fase di preparazione.

Per quanto riguarda gli impatti secondari il trattamento con *biopila* genera più impatti di ogni altro trattamento. Dopo 4 anni però per il *biopile* c'è un decremento degli impatti dovuto al riciclo dell'asfalto e allo stadio di chiusura.

Il *Bioventing* è una buona opzione con 8 anni di trattamento, impatti ridotti e nessun disturbo del sito. Il trattamento con *biopile* raggiunge lo stesso livello di *remediation* del *bioventing* in solo 4 anni ma con più di 500 volte di impatti secondari e provoca disturbi al sito.

In questo caso la tecnologia di *bioventing* è risultata la migliore per l'ambiente [11].

Tabella 5.2 – Materiali in input per il trattamento del suolo [11].

Materiali (input)	Natural Attenuation	Bioventing	Excavation & Biopile
Diesel mach (m³)	0.14	0.38	46
Diesel transp (m³)	0.85	0.5	1.7
Cement (kg)	-	12.6	-
Betonite (kg)	301.6	612	-
Sand (kg)	70.1	218	-
Gravel (kg)	31.3	62.5	1,788 t
Asphalt (t)	-	-	501
PVC (kg)	-	199	4,368
HDPE (kg)	-	79	783
LDPE (kg)	-	-	2,944
Steel (kg)	-	-	2,802
Biofilter (kg)	-	1,015	3,213
Electricity (GJ)	-	174	268
Clean soil (kg)	-	93	-
Latex (kg)	46.8	1.4	5
Glass (kg)	3,600	108	32.5
Wood chips (t)	-	-	317
Urea (kg)	-	-	16,118
Diammonium phosphate (kg)	-	-	3,521

Tabella 5.3 – Emissioni in output per il trattamento del suolo [11].

Emissioni (output)			Natural attenuation	Bioventing	Excavation & Biopile
Biogenic (kg)	CO₂	Air	173	817.3	2971
Fossil (kg)	CO₂		6,143	4,543	3.6 E 6
DOB₅ (kg)		Water	6.4	1.6	5135
Calcium (kg)			15.2	6.24	5,247
Chloride (kg)			43.7	17.3	15,713
COD (kg)			8.2	2.3	5,254
Dissolved solids (kg)			4.4	4.74	301
Unspecified oils (kg)			4.8	6.6	1,810
Silicon (kg)			7.7	11	1,110
Sodium (kg)			9.8	8.8	8,201
Sulfate (kg)			14.9	8	8,800
Calcium (kg)		Soil	0.07	0.02	49.3
Chloride (kg)			0.4	0.05	43.3
Unspecified oils (kg)			2.1	0.43	1,916
Solid waste (m³)			15.7	1494	11,972
Removed diesel (m³)			0.333	60.68	213.03

5.4.3. Approccio all'LCA per la tecnologia di Amek S.c.r.l.

Obiettivo di Amek S.c.r.l. è effettuare un LCA della metodologia di *remediation* sviluppata nell'ambito della messa in sicurezza permanente del Fondo Colombarotto, una volta che questa sarà giunta al termine. L'azienda dovrà dunque effettuare uno studio *retrospective*, ovvero una valutazione degli impatti dell'applicazione della tecnologia nel sito in esame. Come è stato precisato, però, l'LCA ha in sé il concetto di confronto, infatti i risultati di un LCA non hanno significato se non vengono confrontati con i risultati di soluzioni alternative (e non è possibile effettuare confronti con la maggior parte degli studi LCA in letteratura in quanto non coincide il tipo di contaminante). L'unica conclusione che si potrebbe trarre riguarderebbe l'indicazione delle fasi del ciclo di vita che impattano maggiormente e su cui eventualmente agire. Di conseguenza, un'analisi di questo tipo potrebbe essere confrontata con l'opzione di non agire e i conseguenti impatti derivanti dalle emissioni di metano e CO₂ dal suolo, mitigate invece nel caso della *remediation*, in questo caso gli impatti primari dell'intervento di risanamento sarebbero appunto le emissioni residue di metano e CO₂. Oppure potrebbe essere fatto un confronto con l'opzione dello scavo e conferimento in discarica dei fanghi.

In questo paragrafo verranno effettuate alcune considerazioni preliminari a questo studio che comprendono la rappresentazione del diagramma di flusso della tecnologia seguita da una spiegazione dettagliata di ciascuno stadio e delle attività che vi vengono svolte; la definizione dei confini del sistema con le motivazioni delle scelte fatte e una descrizione qualitativa di quelli che sono i materiali e l'energia necessaria (input) e le emissioni (output).

Nel caso in esame non è possibile dare un'indicazione precisa del tempo necessario per il risanamento del sito, essendo ancora in atto, ma per interventi di *bioremediation* di questo tipo la durata è tipicamente medio-lunga. Oggi sono passati quasi 5 anni dall'inizio del monitoraggio (e oltre 3 anni dalla conclusione dell'intervento) e la concentrazione di metano si è ridotta di più del 60%.

Inoltre la tecnologia studiata, come già precisato più volte, è diversa dalle bonifiche convenzionali perché il metano non è incluso tra i contaminanti e non vi è indicazione della concentrazione massima di metano nel suolo. Inoltre, il metano continua a formarsi. Non si può quindi esprimere l'efficienza del trattamento semplicemente come

percentuale di riduzione rispetto alle condizioni iniziali. Nonostante ciò si può considerare terminata la bonifica nel momento in cui la concentrazione risulterà inferiore al LEL in tutti i punti di monitoraggio.

L'unità funzionale, seguendo la linea più utilizzata, potrà essere basata sul volume di suolo da decontaminare. E' possibile considerare l'intero volume di suolo nel caso si volessero confrontare gli impatti con quelli derivanti dal non agire sul sito. Ma nella prospettiva di usare questo studio in futuro per confrontarlo con altre tecnologie, risulterebbe invece più utile effettuarlo su un'unità di volume inferiore.

Risulta plausibile escludere dalla valutazione le attività di messa in sicurezza d'emergenza poiché esulano dalla tecnologia innovativa brevettata e utilizzabile in altri contesti. In figura 5.6 è rappresentato il diagramma di flusso della metodologia applicata in cui sono stati indicati i confini del sistema scelti.

In relazione a quanto evidenziato in figura si precisa:

- La caratterizzazione iniziale è esclusa dai confini del sistema. Ciò è in linea con quanto riportato in letteratura;
- Sono escluse anche le attività di monitoraggio di cui fanno parte le attività di analisi *ex situ* e quelle di trasporto dei campioni, in quanto entrambe poco impattanti, come da letteratura;
- La fase di produzione del compost e degli enzimi è da considerare in quanto sono parte essenziale della tecnologia brevettata; il *compost* viene prodotto a Carpi con un trattamento particolare, mentre gli enzimi vengono prodotti ad Imola da Amek;
- La fase di preparazione del sito include l'acquisizione del materiale e delle attrezzature necessarie mediante il trasporto sul sito del *compost* e dei principi attivi, dei mezzi di movimento terra e dei piezometri per il monitoraggio;
- Il trattamento consiste innanzitutto nello scavo delle trincee e il loro riempimento con il *compost* e i principi attivi. Il fango estratto durante lo scavo è stato inserito anch'esso in alcune trincee (trincee *biopile*). Tutto il terreno scavato è utilizzato comunque *in situ* per il livellamento superficiale o per la chiusura di trincee. All'interno di questa fase vi è anche la costruzione dei pozzi per il monitoraggio del gas (e il relativo posizionamento dei piezometri) e le attività di regimazione superficiale e di realizzazione della copertura vegetale svolte a completamento dell'intervento.

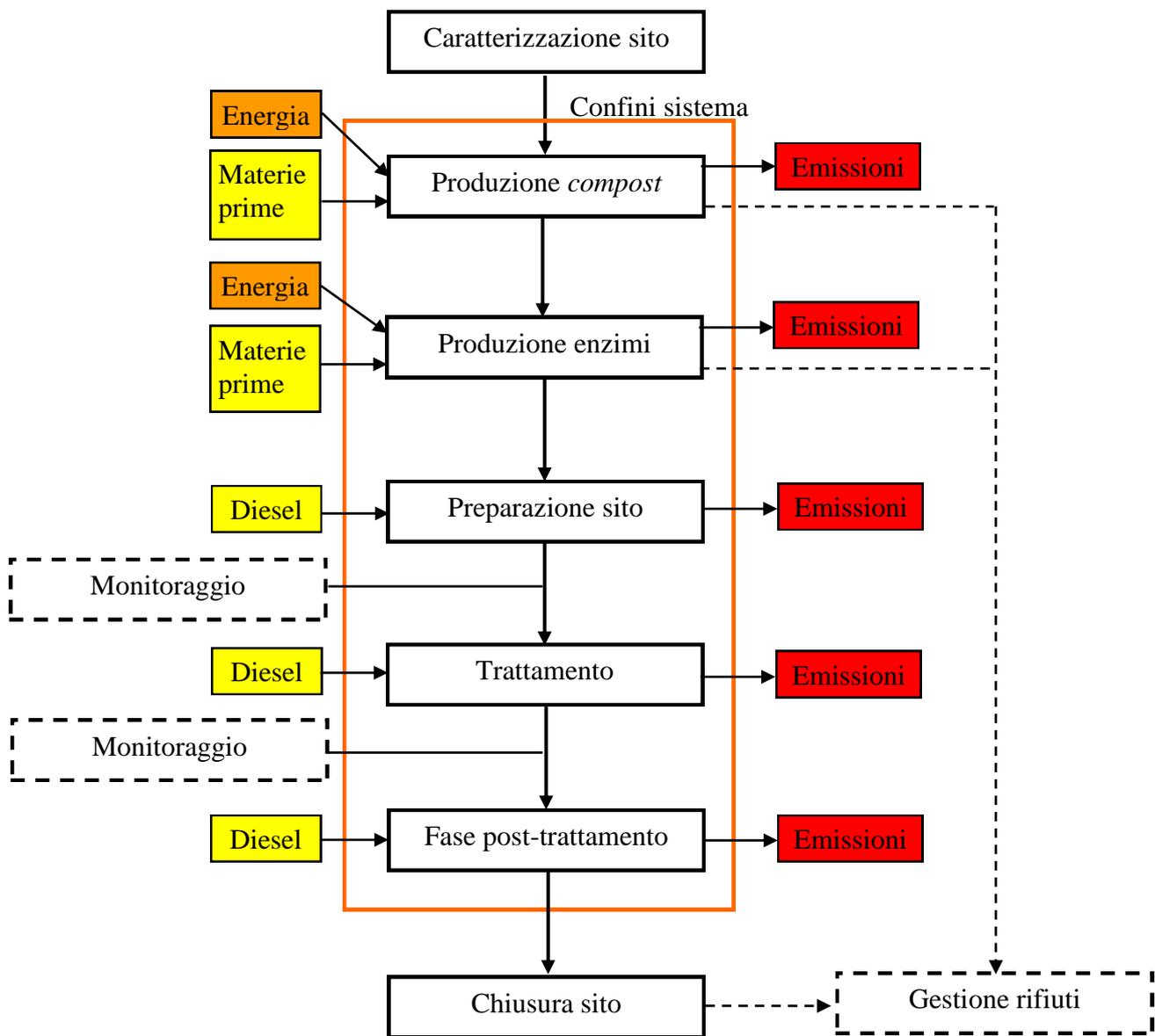


Figura 5.6 - Diagramma di flusso della tecnologia di Amek S.c.r.l.

- La fase di post-trattamento riguarda ad esempio gli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria, quali il livellamento del *compost* nelle trincee. E' inclusa nei confini del sistema.
- La fase di chiusura del sito che avverrà al termine della *remediation* è stata esclusa, in quanto il trattamento non prevede la costruzione di impianti o attrezzature da smantellare al termine della bonifica. Solo le attrezzature per il monitoraggio dovranno essere rimosse in questa fase e smaltite.
- E' esclusa la produzione dei mezzi movimento terra e dei veicoli utilizzati e l'attività del personale.

➤ **Analisi dell'inventario – LCI**

Verrà ora data indicazione di quelli che sono le principali risorse in input ai diversi stadi e gli output in termini di emissioni, rilasci o rifiuti solidi.

Fase di produzione *compost*: la produzione del *compost* implica essenzialmente: produzione di percolato, emissioni in atmosfera, odori, rifiuti solidi e naturalmente uso di materie prime e risorse naturali. In input al sistema ci sarà oltre al rifiuto organico, principalmente energia elettrica, diesel e acqua; mentre per quel che riguarda le emissioni si tratta prevalentemente di CO₂, ammoniaca, metano e sostanze odorigene. Inoltre verrà prodotto percolato con il conseguente rischio di inquinamento del suolo e della falda, si tratta però di un problema piuttosto limitato e riguarda principalmente le fasi di stoccaggio di materia organica. Il dettaglio dei metodi utilizzati per la purificazione degli effluenti gassosi e i sistemi di raccolta del percolato dipendono naturalmente dal tipo di impianto utilizzato per il compostaggio. Per quel che riguarda l'utilizzo del rifiuto organico in ingresso al processo, si precisa che esso è considerato naturalmente un ingresso senza impatti a monte, anzi avrà un impatto positivo, perché il compostaggio è un'attività di recupero di rifiuti. I dati relativi agli input e gli output di questa fase potranno essere reperiti come dati primari dall'azienda che ha fornito il *compost*. Esistono comunque numerosi studi LCA in letteratura sul processo di compostaggio, da cui possono essere ricavati dati.

Fase di produzione *enzimi*: Poiché i principi attivi vengono prodotti da Amek, i dati relativi a questa fase saranno dati primari forniti dalla stessa azienda. Inoltre, è possibile effettuare un'analisi LCA solo di questa fase e successivamente utilizzare i risultati ottenuti per l'LCA complessivo della metodologia utilizzata nell'intervento di risanamento.

La preparazione dei principi attivi avviene secondo le seguenti fasi:

- Sono selezionati i componenti vegetali appartenenti alle famiglie cucurbitacee, graminacee, labiate, ombrellifere e asteracee in grado di sviluppare odori (aromi e profumi) e di apportare vitamine A, C, E;
- Vengono sminuzzati tali materiali grezzi fino ad una dimensione inferiore a un chicco di riso;
- Le parti ottenute sono mescolate insieme;
- Viene aggiunta alla miscela una dose di latte non pastorizzato (ottenuto ad una temperatura inferiore ai 60 gradi) in circa le stesse proporzioni (1:1).

La preparazione così ottenuta, con una consistenza pastosa si introduce sul *compost* per essere trattato il più omogeneamente possibile in una percentuale di 0,1-2 kg per metro cubo di *compost*. La preparazione richiede inoltre l'uso di energia elettrica.

Fase preparazione sito: l'input in questo caso consiste nel diesel per i mezzi utilizzati per il trasporto di tutto il materiale e delle attrezzature nel sito, così come gli output sono prevalentemente le emissioni degli stessi mezzi di trasporto (si tratta di HC: idrocarburi incombusti, NO_x: ossido di azoto, particolato, CO₂ e monossido di carbonio).

Il *compost* viene prodotto a Carpi e deve essere trasportato in un magazzino ad Imola e poi da lì al sito. La distanza tra Carpi ed Imola è di circa 100 km. Gli enzimi sono invece prodotti ad Imola, dunque dovrà essere considerato solo il loro trasporto al sito.

Considerando che servono circa 5000 tonnellate di *compost* e considerando una capacità dei camion di circa 200 quintali, risultano necessari circa 250 viaggi per trasportare da Carpi tutto il *compost* (non si considerano i viaggi a vuoto in quanto i camion vengono utilizzati per altri scopi).

Fase Trattamento: Come è stato già precisato il trattamento *in situ* non richiede l'utilizzo né di acqua né di energia elettrica, le risorse da considerare in questa fase risultano essere il diesel necessario per i mezzi movimento terra e i piezometri (costruiti in PVC). Per l'attività di realizzazione della copertura vegetale saranno necessari anche i semi.

Gli output sono principalmente le emissioni dei mezzi movimento terra. Come calcolato nel paragrafo 5.2 il tempo impiegato per la costruzione delle trincee è stato di circa 200 ore. Inoltre va considerato il tempo necessario per la realizzazione dei pozzi per il monitoraggio e per le attività di regimazione superficiale e copertura vegetale.

Fase post-trattamento: Gli interventi di manutenzione richiedono come input ancora il diesel necessario per i mezzi movimento terra. Anche in questo caso si considerano le emissioni dei mezzi che effettuano tali interventi.

Tutti i dati relativi al consumo di diesel e alle emissioni dei mezzi di trasporto e di movimento terra saranno dati secondari, ricavati da letteratura o banche dati.

Infatti molti dei dati necessari in questa fase, che, come è stato già precisato, risulta essere la fase più critica di tutto lo studio, possono essere reperiti su banche dati specializzate per il *Life Cycle Inventory*. I dati riguardano un grandissimo numero di processi appartenenti a diversi settori quali i trasporti, l'energia, la gestione dei rifiuti ecc.

CAPITOLO 6

PROGETTO “S.O.Sara”

Il progetto descritto in questo capitolo è stato presentato al bando “Spinner2013” come progetto di “Innovazione Organizzativa, Manageriale e Finanziaria” ed è stato ammesso alle agevolazioni. “Spinner2013” è un programma della regione Emilia Romagna nell’ambito della ricerca e innovazione tecnologica che si rivolge a persone interessate a sviluppare progetti su idee imprenditoriali innovative e/o ad alto contenuto di conoscenza, progetti di ricerca industriale, sviluppo sperimentale, trasferimento tecnologico e percorsi di innovazione organizzativa, manageriale e finanziaria

Il progetto è denominato “S.O.Sara”, acronimo per "in Search Of paper Sludge: mARket Assessment", e si propone di consentire l’apertura di un nuovo mercato nazionale, per l'azienda Apice S.r.l., per la vendita di un servizio basato sulla tecnologia innovativa brevettata (Amek s.c.r.l.) descritta in questo elaborato. Tale tecnologia sarà rivolta ad altri siti di ripristino ambientale effettuato con fanghi provenienti da industria cartaria in cui sia stata accertata la presenza di biogas.

6.1. Apice S.r.l.

Apice S.r.l. è un’azienda, con sede ad Imola, che conta 14 dipendenti e ha un fatturato di 825.619, 25 euro. Si occupa della gestione della sicurezza in azienda ed in cantiere, delle tematiche ambientali, delle certificazioni ambientali e della qualità, grazie anche alla collaborazione di consulenti esterni.

In ambito ambientale Apice ha fatto da capofila e coordinatore di interventi per la risoluzione di problemi derivanti dall’errata conduzione di ripristini ambientali con fanghi di cartiera nel territorio imolese. Solo nel caso del Fondo Colombarotto è stata adottata la tecnologia in questione.

Il ruolo svolto da Apice durante l’applicazione pilota della tecnologia nel fondo Colombarotto è stato di supporto all’azione dei tecnici anche attraverso la gestione della logistica e della sicurezza durante l’esecuzione dei lavori, oltre che l’assistenza e la consulenza legale durante i procedimenti amministrativi. In questa circostanza Apice ha potuto anche acquisire il know how per la gestione di tutte le fasi operative che vanno

dalla caratterizzazione della biomassa utilizzata per il ripristino ambientale, fino al recupero del sito all'uso previsto dal piano regolatore.

6.2. Fabbisogni/problematiche alla base del progetto d'innovazione

Come è stato detto, i fanghi di cartiera sono molto utilizzati per ripristini ambientali a causa della loro stabilità aerobica, ma si è scoperto che non c'è corrispondenza tra la loro stabilità in condizioni aerobiche ed anaerobiche e in condizioni anaerobiche possono portare alla produzione di metano. Non essendo nota questa caratteristica dei fanghi di cartiera, i siti oggetto di ripristino ambientale con questa tipologia di rifiuti non sono generalmente oggetto di particolare attenzione né di controlli sull'eventuale produzione di biogas, diversamente da quanto accade per le discariche.

A tale riguardo è probabile che si siano verificati o si verificheranno casi analoghi in altri siti ed è verosimile prospettare una maggiore attenzione al problema in futuro.

Infatti, questa modalità di recupero dei fanghi di cartiera è stata autorizzata in tempi recenti, con il Decreto Ronchi e negli ultimi anni sta trovando crescente diffusione.

Alla luce di ciò e considerando il successo conseguito durante l'applicazione pilota della tecnologia, Apice vorrebbe valutare la possibilità di mettere in piedi un'unità operativa specifica all'interno della propria organizzazione aziendale che si inserisca in questo settore al fine di commercializzare tale tecnologia, non avendo ad oggi una divisione che si occupi specificamente di tecnologie ambientali. Per valutare la fattibilità e le probabilità di successo di questo progetto di lungo termine, Apice si trova ad affrontare una serie di criticità.

Innanzitutto, la necessità di identificare il mercato cui potrebbe potenzialmente rivolgersi la tecnologia: in particolare, quali sono le caratteristiche e la dimensione del mercato; quali sono gli interlocutori con cui dovrebbe confrontarsi; com'è strutturato il settore di riferimento; quali sono le imprese già operanti in esso e quali le tecnologie disponibili. Ciò al fine di individuare i potenziali clienti, i potenziali concorrenti e i punti di forza della tecnologia sviluppata rispetto a ciò che è già presente sul mercato. Si precisa che lo scopo è quello di utilizzare la tecnologia in nuovi siti che siano sedi di tombamento di fanghi di cartiera, come ex-cave o simili, in cui sia stata rilevata la presenza di biogas.

Un altro problema consiste nel capire come sfruttare al meglio l'esperienza di Apice per questa problematica così specifica e sensibilizzare i potenziali clienti, responsabili delle

aree oggetto di ripristino, alla necessità di intervenire con controlli sulla presenza di biogas, nei casi in cui non sia già stato fatto.

Infine, è necessario considerare che tipo di rapporto instaurare con l'azienda che fornisce la tecnologia e come gestire e strutturare il servizio offerto al cliente.

6.3. Obiettivi e contenuti del progetto di innovazione organizzativa, manageriale e finanziaria

Il progetto S.O.Sara vedrà la collaborazione dell'ente di ricerca ENEA, Unità Tecnica Tecnologie Dei Materiali Faenza UTTMATF e dell'Università di Bologna, con referenti appartenenti a due dipartimenti: la professoressa Alessandra Bonoli (DICAM – Dipartimento Ingegneria Civile Ambientale Materiali) che fornirà il supporto tecnico-scientifico e la professoressa Mariolina Longo (dipartimento di Scienze Aziendali) che fornirà il supporto economico-gestionale.

L'università di Bologna, l'ENEA e Apice hanno già collaborato per l'intervento di messa in sicurezza e monitoraggio del Fondo Colombarotto.

Dalla situazione presentata, è possibile evincere la presenza di alcuni fattori che generano complessità. In particolare la volontà da parte di Apice di inserirsi in un segmento di mercato ancora sostanzialmente inesistente e la conseguente necessità di rendere consapevoli i potenziali clienti di bisogni ancora latenti. Questo perché, ad oggi, non si conosce a sufficienza la possibile pericolosità, in termini di produzione di biogas di questi rifiuti, quando vengono utilizzati in ripristini ambientali. Naturalmente questa stessa criticità può costituire un'opportunità per Apice di sfruttare la sua esperienza, unica in questo campo.

Per far fronte ai fabbisogni di Apice, sarà necessaria un'analisi preliminare con lo scopo di valutare le probabilità di successo della tecnologia innovativa che l'azienda ha intenzione di commercializzare. Tale analisi costituirà la base per la possibile futura creazione di una nuova unità operativa.

Il primo passo per raggiungere questo risultato consisterà nell'individuazione del mercato obiettivo.

In primo luogo, sarà necessario identificare i potenziali clienti a cui potrebbe essere rivolto il servizio offerto da Apice. Questo potrà essere fatto a partire da una ricerca, a livello nazionale, dei siti in cui sono stati utilizzati fanghi provenienti da industria cartaria per ripristini ambientali e mediante l'individuazione dei responsabili di tali aree.

Negli ultimi anni si sta assistendo ad una continua riduzione della quantità di questi rifiuti depositati in discarica, a favore di diverse modalità di recupero, tra le quali l'uso nei ripristini ambientali è, in Italia, tra le più diffuse. Potrà dunque essere valutato, in maniera dettagliata, il livello di diffusione di questa tipologia di recupero dei fanghi e potranno essere identificati e contattati i responsabili dei siti in cui sia già stata accertata la presenza di biogas e che potrebbero essere interessati alla tecnologia.

Occorrerà poi studiare le caratteristiche delle aziende operanti nel settore di riferimento che potrebbero essere possibili concorrenti di Apice. In particolare, saranno prese in considerazione aziende che si occupano di alcune tipologie di bonifiche o del monitoraggio di discariche. A questo riguardo è necessario mettere in luce i fattori di differenziazione della tecnologia proposta rispetto alle altre utilizzate nel settore.

Si tratta infatti di una tecnologia sostenibile, specifica per l'applicazione a matrici ad alto contenuto organico (quali sono i fanghi di cartiera) e che comporta notevoli vantaggi in termini di tempi, costi e impatto ambientale. Tali fattori di differenziazione potranno costituire la base per la futura formulazione della strategia da utilizzare per ottenere vantaggio competitivo nei confronti della concorrenza.

Come passo successivo dovranno essere decise le strategie da mettere in atto per sensibilizzare i potenziali clienti alle problematiche connesse a questa tipologia di ripristino e alla conseguente necessità di effettuare controlli riguardo l'eventuale produzione di biogas. Infatti si prevede che nella maggior parte dei casi, queste problematiche non siano conosciute. Gli interlocutori con cui ci si dovrà confrontare saranno in alcuni casi soggetti pubblici, in altri si tratterà di privati. Inoltre, le singole situazioni presenteranno caratteristiche particolari che dovranno essere valutate singolarmente nelle loro peculiarità. Ad esempio, in caso di vicinanza di bersagli sensibili quali abitazioni, il problema sarà recepito con maggiore emergenza. E' verosimile, comunque, che in casi di questo tipo i siti siano già stati sottoposti a controlli. Se i numeri lo permetteranno, si potrà decidere di contattare personalmente i diretti interessati.

Si dovrà poi valutare che tipo di rapporto instaurare tra Apice e Amek che fornisce la tecnologia. A tale riguardo dovranno essere studiate le possibili modalità contrattuali o di collaborazione da poter implementare, cercando la soluzione che soddisfi al meglio le necessità di entrambe le parti. Ad esempio, potrebbe essere plausibile la costituzione di un'associazione temporanea d'impresa.

Infine, sarà necessario decidere come strutturare il servizio da fornire al cliente. Infatti, non si tratta della sola commercializzazione di una tecnologia, ma quello che verrà offerto è un servizio che deve essere gestito e personalizzato sulla base delle specifiche necessità. E' presumibile che l'azienda si dovrà occupare, oltre che degli aspetti strettamente legati alla tecnologia, anche della logistica, della sicurezza in cantiere e degli aspetti legali. La strutturazione del tipo di servizio che si desidera offrire al cliente, servirà anche come base per l'azienda per capire come organizzare la nuova unità operativa.

6.4. Impatto industriale e/o socioeconomico atteso del progetto di innovazione organizzativa, manageriale e finanziaria, con particolare attenzione al contesto regionale.

Durante i sei mesi previsti sarà possibile portare a termine un'analisi del mercato e del settore di riferimento con lo scopo di valutare le possibilità di successo della tecnologia e di porre le basi per la sua commercializzazione. L'azienda otterrà dati specifici sulla diffusione di questa modalità di recupero dei fanghi di cartiera, nonché informazioni dettagliate sulle caratteristiche di ciascun sito. Si potranno inoltre attivare i contatti con i potenziali clienti.

Se gli esiti di questa analisi saranno positivi e se sarà constatata la necessità di intervenire in alcuni dei siti individuati, l'azienda potrà proporre un intervento dimostrativo, a condizioni vantaggiose per il cliente. Grazie a tale intervento sarà possibile mettere in luce le problematiche legate all'erogazione del servizio nonché perfezionare lo stesso. Successivamente è presumibile che si decida di costituire all'interno dell'azienda una nuova unità operativa che si occupi della commercializzazione della tecnologia. In questo caso ci sarà sicuramente una crescita in termini di organico, presumibilmente di una o due unità. In particolare, l'azienda avrebbe bisogno di una figura che si occupi degli aspetti legati alla gestione della tecnologia (quali la gestione degli approvvigionamenti, il monitoraggio ecc.) e del coordinamento delle attività che dovranno essere svolti durante gli interventi.

Dunque, se il progetto andrà a buon fine, l'apertura ad un nuovo mercato avrà senz'altro positive ricadute finanziarie per Apice. Per l'azienda si prospetta, inoltre, il passaggio da una dimensione provinciale ad una regionale con la possibilità di estendersi ulteriormente a tutto il territorio nazionale.

La ricerca che verrà effettuata e che porterà alla costituzione di una mappatura dei siti di ripristino si prefigura poi come un valido strumento di aggregazione dei dati a livello regionale e nazionale.

Come conseguenza del lavoro svolto nell'ambito di S.O.Sara potrà essere immessa sul mercato una tecnologia innovativa pronta per essere utilizzata nei siti di ripristino con fanghi di cartiera in cui dovesse verificarsi produzione di biogas, garantendo la messa in sicurezza tramite una metodologia sostenibile che presenta importanti vantaggi sia dal punto di vista economico che ambientale.

Inoltre è importante sottolineare che a causa dei problemi che si stanno manifestando, è verosimile prevedere una maggiore difficoltà in futuro nel rilascio delle autorizzazioni per queste tipologie di ripristini, così come è avvenuto ad Imola. Apice, dunque, una volta entrata in questo settore, ha intenzione di occuparsi anche della loro progettazione, in modo da garantire la sicurezza ed evitare il rischio di produzione di biogas. La legge, infatti, in materia di ripristini ambientali con fanghi di cartiera prescrive semplicemente di mescolare i fanghi con il terreno.

Questa innovativa metodologia sviluppata rappresenta, infine, una grande potenzialità, avendo come prospettiva di utilizzo futuro quella di essere rivolta più in generale alle discariche, in particolare discariche chiuse, nella fase post-operativa.

Infatti, come è stato illustrato nel capitolo precedente, nelle discariche il biogas prodotto viene raccolto e riutilizzato come combustibile per generare energia, ma dopo la chiusura della discarica, è necessario che i rifiuti rimangano in osservazione per almeno trent'anni, durante i quali il gas non ha più le caratteristiche per essere utilizzato dal punto di vista energetico. Dunque, l'obiettivo risulta essere quello di utilizzare tale tecnologia per ridurre drasticamente i costi e l'impatto del monitoraggio delle discariche nella fase post-operativa, accelerando il processo di stabilizzazione dei rifiuti. Naturalmente ci si rivolgerebbe a discariche (in particolare "unlined", cioè non confinate) contenenti rifiuti biodegradabili e che quindi presentano caratteristiche simili ai siti di ripristino con fanghi di cartiera.

La gestione del post-operativo costa al gestore della discarica dai 15 ai 20 euro a tonnellata in accantonamento. L'azienda ha intenzione di studiare una MTD (Migliore Tecnica Disponibile) relativa a nuovi sistemi di trattamento e controllo per accelerare il processo e risparmiare nei costi della gestione.

6.5. Innovatività del progetto, in particolare rispetto al contesto regionale

Nel momento in cui si è trattato di decidere che tipo di tecnologia applicare nel Fondo Colombarotto (nel 2006) per la sua messa in sicurezza, sono state prese in considerazione diverse tecniche applicabili al caso in questione. Sebbene non vi siano altre tecnologie specifiche per la stabilizzazione dei fanghi di cartiera, le tecniche che potrebbero essere utilizzate anche in casi come questo sono principalmente quelle applicate per il controllo della produzione di biogas dalle discariche e per la bioremediation di suoli contaminati (principalmente da idrocarburi). E' necessario ricordare, inoltre, che la legge italiana ed europea non prescrive limiti per la concentrazione di biogas nel suolo e il metano non è incluso tra i contaminanti.

Sono di seguito riportati i vantaggi che la tecnologia innovativa sviluppata permette di ottenere rispetto alle altre tecniche utilizzabili.

Innanzitutto si tratta di una metodologia di *bioremediation in situ*, ovvero i trattamenti vengono applicati al terreno direttamente sul posto senza prevedere lo scavo ed il conferimento in discarica dei fanghi che risulta costoso sia dal punto di vista economico, infatti le discariche accettano fanghi in quantità limitata e ad un costo di 80-120 euro a tonnellata, sia in termini di impatto ambientale: inquinamento acustico, odori ed emissioni in atmosfera durante gli scavi.

Inoltre, uno dei punti di forza di questa tecnologia è che non si limita al monitoraggio e alla raccolta del biogas prodotto come avviene ad oggi per le discariche, ma va ad agire sulla sostanza organica riducendo la produzione di biogas e garantendo dunque tempi brevi per stabilizzare i fanghi ed eliminare la pericolosità dell'area.

Si tratta infine di una tecnologia sostenibile, infatti richiede l'intervento umano solo nella fase di preparazione, non necessita dell'uso né di acqua né di energia elettrica e ha importanti vantaggi economico ambientali, quali la minimizzazione dell'impatto acustico, delle emissioni in atmosfera, la riduzione dei costi di implementazione della tecnologia e gestionale e l'accelerato recupero del sito per l'agricoltura.

6.6. Obiettivi del progetto:

- **Predisposizione di un'anagrafe dei siti oggetto di ripristino ambientale con fanghi di cartiera.** Questo obiettivo è in accordo con la volontà di individuare le caratteristiche e la dimensione del mercato a cui l'azienda potrebbe rivolgere

il suo servizio. In particolare, tramite questa ricerca, si vogliono identificare i potenziali clienti e tutti gli interlocutori con cui l'azienda dovrà confrontarsi allo scopo di valutare le probabilità di successo della tecnologia da commercializzare.

- **Apertura di un nuovo mercato nazionale**, grazie all'attivazione di contatti con gli interlocutori individuati e alla predisposizione degli aspetti tecnici funzionali alla futura commercializzazione della tecnologia.

6.7. Dettaglio delle attività previste

- Ricerca dei siti di ripristino ambientale con fanghi di cartiera. In primo luogo, verrà realizzata una ricerca a livello regionale, contattando telefonicamente o tramite posta elettronica gli enti predisposti al rilascio delle autorizzazioni per i ripristini, al fine di ottenere le informazioni sulla localizzazione dei siti. Successivamente, si estenderà la ricerca al resto del paese, considerando che solo in alcune regioni è diffusa questa tipologia di recupero.
- Analisi dei siti individuati e creazione database. Una volta localizzati i siti sul territorio nazionale, per ciascuno di essi dovranno essere studiate le caratteristiche del sito (ad esempio la dimensione, la data in cui è stato effettuato il ripristino, la quantità di fanghi utilizzati, le caratteristiche del territorio circostante e l'uso previsto dal piano regolatore), individuati i responsabili e raccolte informazioni su eventuali problemi riscontrati o controlli effettuati sulla produzione di biogas. Tutte queste informazioni verranno inserite in un database.
- Analisi del settore. Ricerca delle altre aziende presenti nel settore che potrebbero essere potenziali concorrenti di Apice. In particolare le dimensioni, le caratteristiche, l'eventuale presenza di leader di mercato e le caratteristiche delle tecnologie utilizzate, anche tramite confronto con quella sviluppata da Apice.
- Attivazione contatti con i potenziali clienti e implementazione della strategia di sensibilizzazione. Verranno contattati i responsabili dei siti in cui si sia stata accertata presenza di biogas e verificato il possibile interesse nei confronti della

tecnologia. Negli altri casi, verrà scelta e implementata la strategia tramite cui far conoscere ai potenziali clienti le problematiche connesse ai ripristini con fanghi di cartiera e l'esperienza specifica maturata da Apice.

- Formalizzazione del rapporto tra Apice e l'azienda che fornisce la tecnologia e strutturazione del servizio da offrire al cliente. Se l'analisi avrà dato esito positivo, verrà scelta la modalità di collaborazione che soddisfi al meglio le esigenze di entrambe le parti e verranno dettagliate tutte le attività che dovranno essere svolte nell'ambito degli interventi effettuati e che andranno a comporre il servizio offerto.

Diagramma di Gantt

E' di seguito riportato il diagramma di Gantt delle attività svolte nei sei mesi previsti dal progetto (figura 6.1).

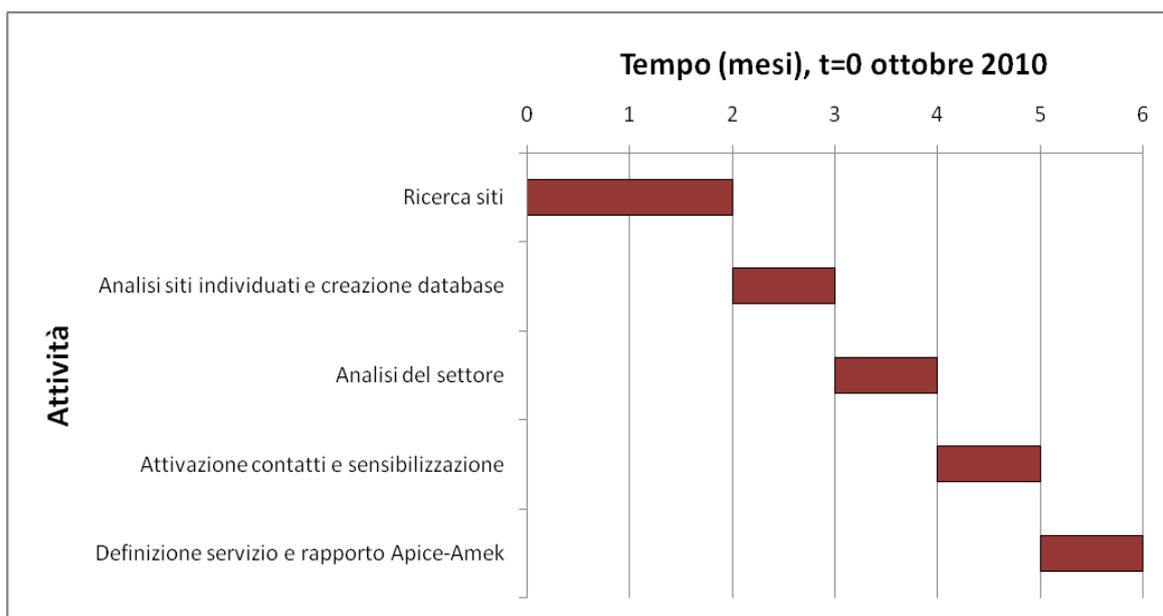


Figura 6.1 – Diagramma di Gantt

6.8. Coerenza delle attività con gli obiettivi del piano

L'obiettivo di predisporre un'anagrafe dei siti oggetto di ripristino con fanghi di cartiera potrà presumibilmente essere raggiunto alla fine del terzo mese tramite le prime due attività indicate. A partire dal territorio regionale si andranno a localizzare le aree e a raccogliere tutte le informazioni rilevanti per ciascuna di esse. Informazioni che

andranno a comporre un database, fruibile dall'azienda, che in questo modo potrà rendersi conto della diffusione di questo utilizzo, di quali siano gli interlocutori e delle caratteristiche delle singole aree, ricordando che la metodologia utilizzata è sito specifica ed è quindi da personalizzare a seconda delle peculiarità delle singole situazioni.

Alla fine del sesto mese, invece, ci si propone di aprire un nuovo mercato nazionale. Questo potrà essere fatto attivando i contatti con i potenziali clienti, i quali, se necessario, verranno sensibilizzati alle problematiche connesse ai ripristini con fanghi di cartiera. Inoltre, l'analisi del settore permetterà di comprendere le caratteristiche della potenziale concorrenza e di costruire la futura strategia competitiva. Infine, potranno essere poste le basi per l'effettiva commercializzazione della tecnologia formalizzando i rapporti con l'azienda che detiene il brevetto e dettagliando il "pacchetto" da offrire al cliente. L'azienda si dovrà occupare, infatti, della gestione della tecnologia, della logistica, della sicurezza in cantiere e degli aspetti legali.

Conclusioni

L'Italia si posiziona al quinto posto in Europa per produzione di carta, con una produzione annua pari a circa 9 milioni di tonnellate. La maggior parte dei rifiuti dell'industria cartaria si presenta sotto forma di fanghi provenienti dal processo di produzione e di riciclo della carta per i quali si sta assistendo ad un crescente utilizzo in ripristini ambientali (l'ultimo dato rileva il 26%), modalità di recupero consentita per questi rifiuti dal Decreto Ronchi (1997). Dunque si tratta di un fenomeno molto rilevante e che richiede particolare attenzione.

Gli avvenimenti di Imola di qualche anno fa e il caso della "Fossa di Lavagnin" in Liguria citato in questo elaborato testimoniano come si stiano manifestando in questi anni problemi di produzione non controllata di biogas da tali siti di ripristino, fenomeno scoperto con maggior rapidità in situazioni come quelle citate in cui i siti interessati si trovano in prossimità di abitazioni o corsi d'acqua e per i quali si è ritenuto opportuno effettuare dei controlli.

La metodologia innovativa sviluppata da Amek S.c.r.l. per la messa in sicurezza permanente e il monitoraggio del "Fondo Colombarotto" ha permesso di ottenere ottimi risultati: nei primi 41 mesi di monitoraggio è stato possibile notare una sostanziale riduzione delle concentrazioni di CH₄ e CO₂ (circa 60%), nonché una progressiva crescita della concentrazione di ossigeno. Inoltre è stato possibile riscontare una riduzione della potenzialità di produzione di metano dal fango. L'intervento è risultato dunque efficace. La tecnologia è stata sviluppata specificatamente per matrici ad alto contenuto di sostanza organica ed è quindi particolarmente adatta ad essere utilizzata in siti di stoccaggio di fanghi di cartiera analoghi a quello descritto così come in discariche contenenti rifiuti organici.

Dall'analisi svolta è inoltre emerso come tale tecnologia presenti importanti vantaggi rispetto ad altre tecnologie applicabili in casi di questo tipo. Dal punto di vista economico, è risultato difficoltoso effettuare un confronto preciso, in quanto si tratta di metodologie sito specifiche il cui costo dipende molto dal tipo di contaminante e dalle caratteristiche del sito. Inoltre, trattandosi della prima applicazione della tecnologia non è stato possibile ottenere alti livelli di efficienza. Nonostante ciò, il calcolo dei costi ha portato ad un risultato piuttosto contenuto tenendo conto del grande volume di suolo da trattare.

Dal punto di vista dell'impatto ambientale è stato sottolineato come tale metodologia non necessiti dell'uso né di acqua né di energia elettrica; i cattivi odori e le emissioni in atmosfera sono circoscritti al periodo degli scavi (circa un mese), periodo nettamente inferiore a quello necessario per altre soluzioni quali il *biopile* o il conferimento in discarica dei fanghi. Dopo il trattamento l'impatto visivo e il disturbo alla popolazione è pressoché nullo. La durata associata a interventi di questo tipo è invece tipicamente medio lunga. Un confronto più preciso e quantitativo potrà essere comunque effettuato tramite un'analisi LCA (*Life Cycle Assessment*) della tecnologia, una volta terminata la bonifica.

Infine, il progetto riportato in questo elaborato, presentato e approvato dal Consorzio Spinner, permetterà di valutare la presenza di un possibile mercato per tale tecnologia, avendo come primo obiettivo quello di ricercare i siti di ripristino con fanghi di cartiera nel territorio italiano e verificare se vi siano casi di produzione accertata di biogas. Il progetto consentirà anche di definire un "pacchetto" comprensivo del servizio da offrire al cliente.

ALLEGATO

Caratterizzazione fanghi di cartiera

Paper de-inking sludge

Analisi immediate (% in peso)

	Sostanza Secca	Tal quale
Cenere	25	8,8
Acqua	-	65

Contenuto di cellulose, emicellulosa e lignina (% in peso del campione secco)

Cellulosa	35,6
Emicellulosa	9,4
Lignina	20,5

Paper mill sludge cake

Analisi immediate (% in peso)

	Sostanza Secca	Tal quale	Sostanza Secca esclusa la cenere
Cenere	28,8	9,4	-
Acqua	-	67,5	-
Sostanze Volatili	59,9	19,5	84,2

Analisi finali (% in peso)

	Sostanza Secca	Tal quale	Sostanza Secca esclusa la cenere
C	24,3	7,9	34,2
H	3,31	1,1	4,7
O	43,1	14	60,6

N	0,4	0,13	0,56
S	0,03	0,01	0,04

Paper primary sludge

Analisi immediate (% in peso)

	Sostanza Secca	Tal quale
Cenere	15	-

Cellulosa, Emicellulosa e lignina (% in peso del campione secco)

Cellulosa	45
Emicellulosa	-
Lignina	30

Paper residue sludge

Analisi immediate (% in peso)

	Tal quale	Sostanza Secca	Sostanza Secca esclusa la cenere
Cenere	40,8	45,9	-
Acqua	11	-	-
Sostanze Volatili	43,3	48,7	90

Analisi finali (% in peso)

	Tal quale	Sostanza Secca	Sostanza Volatile
C	21	23,6	43,6
H	2,7	3,08	5,7
O	23,6	26,5	49
N	0,64	0,72	1,33
S	0,11	0,12	0,22
Cl	0,088	0,099	0,183
F	0,012	0,013	0,024

Paper residue sludge granulate

Analisi immediate (% in peso)

	Tal quale	Sostanza Secca	Sostanza Secca esclusa la cenere
Cenere	42,2	47,3	-
Acqua	10,7	-	-
Sostanze Volatili	40,5	45,4	86,1

Analisi finali (% in peso)

	Tal quale	Sostanza Secca	Sostanza Secca esclusa la cenere
C	20,4	22,9	43,5
H	2,6	2,94	5,6
O	23	25,8	48,9
N	0,64	0,72	1,37
S	0,3	0,34	0,65
Cl	0,021	0,024	0,046
F	0,017	0,019	0,036

Analisi dei metalli (mg/kg SS)

Al 66.000	Cu 52	Na 380	Sn 6
As 0,7	Fe 2.920	Ni 7,4	Sr 120
B 26	Hg 0,1	P 1.520	Ti 1.300
Ba 55	K 3.610	Pb 16	V 13
Ca 95.800	Mg 2.460	Sb 0,6	Zn 62
Cd 0,6	Mn 76	Se 0,8	
Co 2,2	Mo 1,7	Si 63.800	

Paper sludge

Analisi immediate (% in peso)

	Tal quale	Sostanza Secca
Cenere	23,6	54,8
Acqua	56,9	-

Analisi dei metalli (mg/kg SS)

As 1,2	Hg 0,7
Cd 0,5	Ni 13,4
Cr 19,5	Pb 72
Cu 120	Zn 798

Composizione delle ceneri (% in peso delle ceneri)

SO_3 0,2	Al_2O_3 23,7
SiO_2 35	CaO 37,5
Fe_2O_3 1,8	MgO 1,8

Paper-mill sludge

Analisi immediate (% in peso)

	Sostanza Secca	Tal quale
Cenere	15,3	-

Cellulosa, emicellulosa, lignina (% in peso del campione secco)

Cellulosa	23,4
Emicellulosa	-
Lignina	16,1

Primary sludge, pulp & paper

Analisi dei metalli (mg/Kg SS)

Ca 104000	Na 3100
Cd 1,2	Ni 24
Cu 46	P 1400
K 1600	Pb 92
Mg 5200	Zn 94

Secondary sludge, pulp & paper

Analisi dei metalli (mg/Kg SS)

Ca 81000	Na 1200
Cd 1,6	Ni 38
Cu 65	P 4000
K 2400	Pb 82
Mg 2600	Zn 88

Sludge

Analisi immediate (% in peso)

	Sostanza Secca	Tal quale
Cenere	32,7	-

Analisi finali (% in peso)

	Sostanza Secca	Sostanza Secca esclusa la cenere
C	44,6	66,3
H	5,1	7,6
O	16	23,8
N	0,71	1,05
S	0,18	0,27
Cl	0,723	1,074

Composizione delle ceneri (% in peso delle ceneri)

P_2O_5 0,4	Al_2O_3 16,3
SiO_2 32,7	CaO 33,4
Fe_2O_3 5,8	MgO 4
Na_2O 0,7	K_2O 1

Sludge, biological sludge

Analisi immediate (% in peso)

	Sostanza Secca	Tal quale
Cenere	20	3

Acqua	-	85
-------	---	----

Analisi finali (% in peso)

	Sostanza Secca	Tal quale	Sostanza Secca esclusa la cenere
C	46,8	7	58,5
H	6,2	0,9	7,7
O	25,4	3,8	31,7
N	0,4	0,06	0,5
S	1,2	0,18	1,5

Sludge, clarifier sludge

Analisi immediate (% in peso)

	Tal quale	Sostanza Secca
Cenere	4,9	11,6
Acqua	58	-

Analisi finali (% in peso)

	Tal quale	Sostanza Secca	Sostanza Secca esclusa la cenere
C	21,7	51,6	58,3
H	2,4	5,72	6,5
O	12,3	29,2	33,1
N	0,4	0,96	1,09
S	0,39	0,93	1,05

Sludge, deinking sludge

Analisi immediate (% in peso)

	Tal quale	Sostanza Secca
Cenere	20,2	48,1
Acqua	58	-

Analisi finali (% in peso)

	Tal quale	Sostanza Secca	Sostanza Secca esclusa la cenere
C	12,1	28,8	55,6
H	1,5	3,53	6,8
O	7,9	18,8	36,3
N	0,22	0,52	1
S	0,07	0,17	0,33

Sludge, pulp & paper**Analisi immediate (% in peso)**

	Sostanza Secca	Tal quale
Cenere	22	-

Analisi finali (% in peso)

	Sostanza Secca	Sostanza Secca esclusa la cenere
N	0,85	1,09
S	0,47	0,6

Analisi dei metalli (mg/Kg SS)

Al 13400	Hg 0,3
As 1,2	K 2200
Ca 14000	Mg 1550
Cd 1,2	Na 2200
Fe 1540	Pb 28

Bibliografia

Capitolo 1

[1] Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 - Norme in materia ambientale - pubblicato nella *Gazzetta Ufficiale* n. 88 del 14 aprile 2006 – Supplemento ordinario n. 96;

[2] Rapporto Rifiuti 2008, ISPRA, Istituto superiore per la ricerca e la protezione ambientale (http://www.apat.gov.it/site/it-IT/APAT/Pubblicazioni/Rapporto_rifiuti/Documento/rapporto_rfi08.html) (maggio 2010);

[3] <http://www.assocarta.it/> (maggio 2010);

[4] EC.2001.Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference document on Best Available Techniques for Pulp and Paper manufacture;

[5] http://www.ambientediritto.it/dottrina/Politiche%20energetiche%20ambientali/politiche%20e.a/residui_industria_cartaria_Pandolfo.htm (maggio 2010);

[6] Castiglioni F. (a cura di), (2007). Linee guida sui rifiuti speciali cartiere. Phare twinning project ro2004/ib/en-07. Implementation and enforcement of the environmental Acquis focussed on industrial waste management (http://www.arpal.org/LG_PDF/7_LG_cartiere.pdf);

[7] Rapporto Ambientale Assocarta 2010 in <http://www.assocarta.it/it/pubblicazioni.html> (settembre 2010);

[8] Bonoli A., appunti del corso “Valorizzazione delle risorse primarie e secondarie”, A.A. 2008/2009;

[9] Decreto Ministeriale del 5 febbraio 1998, n. 72 - Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22 (Decreto Ronchi) - e pubblicato sul Supplemento ordinario alla *Gazzetta Ufficiale* 16 aprile 1998 n. 88;

[10] <http://www.osservatorionazionalefifiuti.it/> (luglio 2010);

[11] <http://www.ecn.nl/phyllis/DataTable.asp> (giugno 2010).

Capitolo 2

- [1] http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Temi/Siti_contaminati/ (luglio 2010);
- [2] <http://www.arpa.fvg.it/index.php?id=379> (luglio 2010);
- [3] Modarelli G. (2008). Sistemi di controllo di Processi di biostabilizzazione *in situ*. Tesi di laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio. Alma Mater Studiorum. A.A. 2006/07;
- [4] <http://www.cet.coop/index.php> (agosto 2010);
- [5] Decreto Ministeriale del 5 febbraio 1998 - Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22 (Decreto Ronchi) - e pubblicato sul Supplemento ordinario n.72 alla *Gazzetta Ufficiale* 16 aprile 1998 n. 88;
- [6] Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 - Norme in materia ambientale - pubblicato sul Supplemento ordinario n.96 alla *Gazzetta Ufficiale* 14 aprile 2006 n.88;
- [7] Decreto Ministeriale del 25 ottobre 1999, n. 471 - Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica ed il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi dell'articolo 17 del Decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22 (Decreto Ronchi) e successive modificazioni e integrazioni – pubblicato sul Supplemento Ordinario n.218 alla *Gazzetta Ufficiale* 15 dicembre 1999 n.293;
- [8] Decreto Legislativo del 5 febbraio 1997 n. 22 - Attuazione delle direttive 91/689/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CEE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio – pubblicato sul Supplemento Ordinario n.33 alla *Gazzetta Ufficiale* 15 febbraio 1997 n.38;
- [9] Monte M. C., Fuente E., Blanco A., Negro C. (2008), Waste management from pulp and paper production in the European Union. *Waste management* 29 (2009) 293-308;
- [10] Direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti;

[11] Direttiva 2006/12/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 5 aprile 2006 relativa ai rifiuti;

[12] Direttiva 75/442/CEE del Consiglio del 15 luglio 1975 relativa ai rifiuti;

[13] Direttiva 91/689/CEE del Consiglio del 12 dicembre 1991 relativa ai rifiuti pericolosi;

Capitolo 3

[1] Modarelli G. (2008). Sistemi di controllo di Processi di biostabilizzazione *in situ*. Tesi di laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio. Alma Mater Studiorum. A.A. 2006/07;

[2] Ruffilli C. (2009). Il monitoraggio e la messa in sicurezza di un'ex-area di cava utilizzata per il recupero di fanghi di cartiera. Tesi di laurea specialistica in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio. Alma Mater Studiorum. A.A. 2008/2009;

[3] Salvatore S. (2008). Monitoraggio delle emissioni in processi di biostabilizzazione *in situ*". Tesi di laurea specialistica in Ingegneria Chimica e di Processo. Alma Mater Studiorum. A.A. 2007/2008;

[4] http://bioprocess.pnl.gov/isb_defn.htm (giugno 2010);

[5] Bonoli A., Dall'Ara A., Rappoli N., Ruffilli C. (2010). Il monitoraggio e la messa in sicurezza di un'ex-area di cava utilizzata per il recupero di fanghi di cartiera. In Boni M.R., Collivignarelli C., Vagliasindi F.G.A.(a cura di): SiCon 2010 Siti contaminati: esperienze negli interventi di risanamento (Roma, febbraio 2010);

[6] Dall'Ara A., Ferri F., Marroni V., Billi L., Bonoli A. (2009). Low impact bioremediation technology: application in a restoration site. Proceedings Sardinia, 2009;

[7] Dall'Ara A. (2007). "Fondo Colombarotto", "Risultati delle sperimentazioni in situ e Progetto di biostabilizzazione e recupero dell'Area ai fini agricoli. Rapporto completo" RT ENEA – ING – P9D6 – R – 07 - 006;

[8] AMEK Società Cooperativa a R.L.. Proposta di sperimentazione propedeutica ad una biostabilizzazione aerobica per recupero dell'area di ripristino denominata "Fondo Colombarotto", 2006;

[9] Dall'Ara A. *et al.* (2007). Sistema di caratterizzazione di matrici organiche: fanghi di cartiera all'interno di ripristini ambientali. ECOMONDO 2007. Atti di seminari, a cura di L. Morselli, Tomo 2, pp. 355-359;

[10] Marroni *et al.* (2006). Fondo Colombarotto: indagine e risoluzione in loco di sito contaminato da metano". V Conferenza "Nuova normativa ed innovazione (Bio) tecnologica nella gestione e bonifica dei siti contaminati". ECOMONDO 2006. Atti di seminari, a cura di L.Morselli, Tomo 2, pp. 266-271.

Capitolo 4

[1]<http://albengacorsara.it/2010/01/22/biogas-in-ex-cava-fossa-di-lavagnin-a-pontinvrea-dalla-regione-si-unanime-a-nuovi-accertamenti/> (agosto 2010);

[2] http://www.lancora.com/09/2009-02-08/art_1p_01.html (agosto 2010);

[3]http://www.ilgiornale.it/genova/pontinvrea_paese_che_vive_sopra_bomba/17-07-2010/articolo-id=461512-page=0-comments=1 (agosto 2010)

[4]http://www.ilsecoloxix.it/p/basso_piemonte/2010/04/20/AMXKbjcD-discalrica_carotaggi_lavagnin.shtml (agosto 2010)

[5]http://www.comitatoerro.com/documenti/Relazione_sindaco_21_06_2010.pdf (agosto 2010)

[6] http://www.comitatoerro.com/documenti/delibera_02082010.pdf (agosto 2010)

[7] http://www.comitatoerro.com/documenti/misurazioni_biogas.pdf (agosto 2010)

[8] <http://www.comitatoerro.com/lavagnin.html> (agosto 2010);

[9] Decreto Legislativo del 13 gennaio 2003, n. 36 - Attuazione della direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti – e pubblicato nella *Gazzetta Ufficiale* n. 59 del 12 marzo 2003 - Supplemento Ordinario n. 40;

[10] Cossu R., Raga R., Zanella M., Dal Maso A. (2010). Principi e risultati delle esperienze in Italia di aerazione in situ delle discariche. In Boni M.R., Collivignarelli C., Vagliasindi F.G.A.(a cura di): SiCon 2010 Siti contaminati: esperienze negli interventi di risanamento (Roma, febbraio 2010);

[11] <http://educambiente.iport.it/discarica.html> (agosto 2010);

[12] Salvatore S. (2008). Monitoraggio delle emissioni in processi di biostabilizzazione *in situ*". Tesi di laurea specialistica in Ingegneria Chimica e di Processo. Alma Mater Studiorum. A.A. 2007/2008;

[13] Huber-Humer M., Lechner P. (2009). Biocover construction and Monitoring – implementation criteria and processes. In: Cossu R., Diaz L.F., Stegmann R. (Eds.): *Sardinia 2009 Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium* (5 - 9 October 2009, S. Margherita di Pula - Cagliari, Sardinia, Italy);

[14] <http://www.altlastenmanagement.at>;

[15] Huber-Humer M., Röder S., Lechner P. (2009). Approaches to assess biocover performance on landfills. *Waste Management* 29 2092-2104.

Capitolo 5

[1] Dall'Ara A., Ferri F., Marroni V., Billi L., Bonoli A. (2009). Low impact bioremediation technology: application in a restoration site. *Proceedings Sardinia, 2009*;

[2] <http://www.metea.uniba.it/database/index.htm> (settembre 2010);

[3] <http://www.afcee.af.mil/resources/technologytransfer/programsandinitiatives/bioventing/index.asp> (settembre 2010);

[4] Lombardo G., Vagliasindi F.G.A. (2006). Applicazioni ingegneristiche dei trattamenti biologici di siti inquinati da idrocarburi. In [http://www.csisa.it/download/Presentazione%20CNR%20Messina%20v.4%20\(14-09-2006\).pdf](http://www.csisa.it/download/Presentazione%20CNR%20Messina%20v.4%20(14-09-2006).pdf) (settembre 2010);

- [5]<http://www.regione.veneto.it/NR/rdonlyres/A2C1C99E-9A34-4562-9C61-3855D390F74C/0/volume2133200.pdf> (settembre 2010);
- [6] [http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Temi/ Mercato_verde/ Life_Cycle_Assessment_\(LCA\)/](http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Temi/ Mercato_verde/ Life_Cycle_Assessment_(LCA)/) (settembre 2010);
- [7] Consoli F. et al. (1993). Guidelines for Life-Cycle Assessment : a code of practice. SETAC Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 1993, Brussels, Belgium;
- [8] Chiavetta C. (2008). Applicazione dell’LCA nella valutazione dei benefici ambientali prodotti da tecnologie e processi eco innovativi: il caso studio della nuova macchina K3 di Carpignani con ciclo frigorifero a CO2. Tesi di laurea specialistica in Ingegneria per l’Ambiente e il Territorio. Alma Mater Studiorum. A.A. 2007/08;
- [9] Lemming G., Hauschild M. Z., Bjerg P. L. (2009). Life cycle assessment of soil and groundwater remediation technologies: literature review. Int J Life Cycle Assess (2010) 15:115–127;
- [10] Diamond ML, Page CA, Campbell M, McKenna S, Lall R (1999) Life-cycle assessment—life-cycle framework for assessment of site remediation options: method and generic survey. Environ Toxicol Chem 18(4):788–800;
- [11] Cadotte M, Deschênes L, Samson R (2007) Selection of a remediation scenario for a diesel-contaminated site using LCA. Int J Life Cycle Assess 12(4):239–251;
- [12] Toffoletto L, Deschenes L, Samson R (2005) LCA of ex-situ bioremediation of diesel-contaminated soil. Int J Life Cycle Assess 10(6):406–416.