

A.P.A.T.

Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici

Tesi di stage

**SISTEMI DI GESTIONE INTEGRATA DEI RIFIUTI
SOLIDI URBANI**

ing. Katia Verde

ottobre 2004 – febbraio 2005

Tutor: *ing. Giuseppe Marella*

ing. Carlo Dacquino

ing. Marcella Roma

Introduzione.....	3
Capitolo 1 : Aspetti normativi legati alla gestione dei rifiuti.....	9
Capitolo 2 : LCA: Definizioni, fasi ed applicazione ai sistemi di gestione integrata dei rifiuti	19
2.1 LCA: Definizione e fasi.....	19
2.1.1 Definizione degli obiettivi e della portata dello studio	22
2.1.2 Analisi di inventario	24
2.1.3 Analisi degli impatti	26
2.1.4 Interpretazione e miglioramento	30
2.2 La procedura LCA applicata ai processi e sistemi di gestione integrata dei rifiuti	31
Capitolo 3 : I principali Effetti Ambientali.....	33
3.1 Effetto serra	36
3.2 Assottigliamento dello strato di ozono stratosferico	39
3.3 Acidificazione dell'aria	41
3.4 Eutrofizzazione	43
3.5 Smog fotochimico	44
3.6 Tossicità.....	47
3.7 Impoverimento delle risorse non rinnovabili	50
Capitolo 4 : Gestione integrata dei rifiuti (GIR): definizioni ed analisi dei costi e degli impatti ambientali	51
4.1 Raccolta	57
4.1.1 Analisi dei costi	62
4.1.2 Analisi degli impatti ambientali	65
4.2 Trasporto.....	70
4.2.1 Analisi dei costi	72
4.2.2 Analisi degli impatti ambientali	73
4.3 Stazioni di trasferimento	78

4.3.1 Analisi dei costi	80
4.3.2 Analisi degli impatti ambientali	84
4.4 Impianti di selezione.....	89
4.4.1 Analisi dei costi	93
4.4.2 Analisi degli impatti ambientali	97
4.5 CDR	102
4.6 Termotrattamento	105
4.6.1 Analisi dei costi	110
4.6.2 Analisi degli impatti ambientali	113
4.7 Biostabilizzazione aerobica/Compostaggio	120
4.7.1 Analisi dei costi	124
4.7.2 Analisi degli impatti ambientali	128
4.8 Digestione anaerobica	129
4.8.1 Analisi dei costi	131
4.8.2 Analisi degli impatti ambientali	135
4.9 Discarica	136
4.9.1 Analisi dei costi	140
4.9.2 Analisi degli impatti ambientali	140

Capitolo 5 : SWFO-LCA: software LCA applicato alla gestione integrata dei rifiuti	141
--	------------

Capitolo 6 : Caso studio applicato alla provincia di Frosinone.....	149
--	------------

Conclusioni	161
Bibliografia	167
Siti consultati	170

Introduzione

L'approccio alle tematiche ambientali ha subito negli ultimi anni una vera e propria mutazione nella metodologia applicata: si è passato, infatti, da un approccio a valle dei processi produttivi (end-of-pipe) ad un orientamento di tipo integrato, in cui gli interventi di natura preventiva divengono prioritari e l'obiettivo principale diviene la riduzione sia degli input intesi come materiali ed energia che degli output, intesi come emissioni nell'ambiente. Nel campo dei rifiuti, il concetto di "gestione" ha soppiantato il concetto di "disinquinamento" legato allo smaltimento in discarica dei rifiuti stessi.

La razionalizzazione nell'uso delle risorse e la valorizzazione dei prodotti e materiali di scarto, derivanti sia dal processo produttivo che dal consumo di beni, assumono un'importanza enorme quando si parla di sostenibilità¹. La riduzione nella produzione dei rifiuti rappresenta uno degli obiettivi prioritari della nuova strategia comunitaria per la gestione dei rifiuti (VI Programma di Azione per l'Ambiente approvato nel 2002), che si propone di implementare nel corso dei prossimi 10 anni modelli di produzione e consumo più sostenibili per l'ambiente. Passando dalla "cultura dell'usa e getta" alla "cultura dell'usa, riusa e separa" si attuerebbe una radicale trasformazione dei modelli di produzione e consumo, che comporterebbe una notevole riduzione della produzione di rifiuti e di conseguenza ad una rilevante diminuzione delle emissioni associate alla gestione dei rifiuti.

L'attuale sistema di gestione dei rifiuti urbani (RU) è individuato da diversi processi che riguardano la raccolta, la separazione, il trattamento e lo smaltimento finale. Il settore della gestione dei rifiuti urbani attraversa un importante processo di riforma finalizzato al superamento dei gravi ritardi di natura infrastrutturale, organizzativa e gestionale che lo hanno caratterizzato fino ad oggi. Questo sistema integrato porta a complesse relazioni tra i flussi di massa relativi ai costi, ai consumi, alle risorse impiegate ed ai rilasci nell'ambiente. Al fine di esaminare queste interrelazioni ed identificare i migliori flussi di massa potenziali e le sinergie più vantaggiose fra i processi unitari, è necessario quantificare i costi economici e gli "oneri" ambientali associati ad ogni singolo

¹ Esistono numerose definizioni di sostenibilità, quella più diffusa a livello internazionale è quella fornita nel 1997 dal rapporto "Our Common Future" (WCED 1987) della Commissione Indipendente per l'ambiente e lo sviluppo (World Commission on Environment and Development, WCED) presieduta dal Primo Ministro norvegese Gro Harlem Brundtland in cui si legge: *"Lo sviluppo è sostenibile se soddisfa i bisogni delle generazioni presenti senza compromettere le possibilità per le generazioni future di soddisfare i propri bisogni."*

processo unitario facente parte del globale sistema di gestione dei rifiuti urbani (vedi White et al, 1995).

Nel valutare un sistema di gestione dei RU, il progettista dovrebbe considerare anche gli oneri ambientali, al di fuori della tradizionale struttura delle attività che intercorre fra il punto di prelievo/raccolta dei RU allo smaltimento finale. Gestire i rifiuti nell'ottica dello sviluppo sostenibile, infatti, non deve limitarsi a trattarli e smaltirli in condizioni di sicurezza, ma devono essere incluse anche tutte le fasi e le operazioni che portano ai prodotti che poi genereranno i rifiuti. Ad esempio parlando di riciclaggio sarebbe opportuno ed importante considerare il "guadagno netto" in termini di benefici/oneri ambientali delle varie opzioni, in quanto molti processi di riciclaggio risultano molto inquinanti.

Un sistema di gestione integrata dovrebbe quindi avere come obiettivo non solo la riduzione delle emissioni nei sistemi ambientali associate ai diversi trattamenti, attraverso nuove tecnologie, ma soprattutto un miglioramento globale del sistema complessivo andando a ricercare la soluzione ottimale dal punto di vista economico ed ambientale che non è né unica né universalmente valida, essa differisce da sito a sito in base agli impianti presenti, alla morfologia, alla climatologia, etc.

Mentre l'analisi dei costi è una metodologia più sviluppata e consolidata, individuare i benefici/oneri ambientali richiede un attento esame delle scelte fatte a monte, nei consumi di energia e nella generazione degli inquinanti derivanti dall'acquisizione delle materie prime e dalle operazioni di processo. Questi "compromessi" a monte sono evidenziati affrontando un approccio basato sul ciclo vita del sistema di gestione, così come illustrato nella fig. 1.

Al fine di indirizzare ed esaminare le relazioni ed i compromessi fra le diverse alternative del sistema di gestione dei RU, in questo studio si è voluto promuovere la ricerca volta ad applicare i concetti e gli strumenti della LCA per valutare un sistema di gestione integrato dei RU. Questo lavoro ha l'obiettivo di sviluppare conoscenze e strumenti che potranno aiutare le autonomie locali ad esaminare i parametri del LCI (Life Cycle Inventory) per un grande numero di possibili operazioni del sistema di gestione dei RU e per numerose distinte componenti del sistema di gestione dei RU. Le autonomie locali avranno quindi a disposizione un strumento di analisi metodologica (SWFO-LCA) strutturato a scala di bacino, esportabile a qualsiasi realtà territoriale, utilizzabile sia in fase di pianificazione che di gestione, finalizzato sia all'ottimizzazione della ripartizione dei flussi all'interno di un sistema di gestione integrato dei RU, attraverso la minimizzazione

di una funzione obiettivo che contiene i costi complessivi ed i ricavi derivanti dalle scelte gestionali e progettuali che alla valutazione degli impatti ambientali associati al trattamento di tali flussi (Fig. 2).

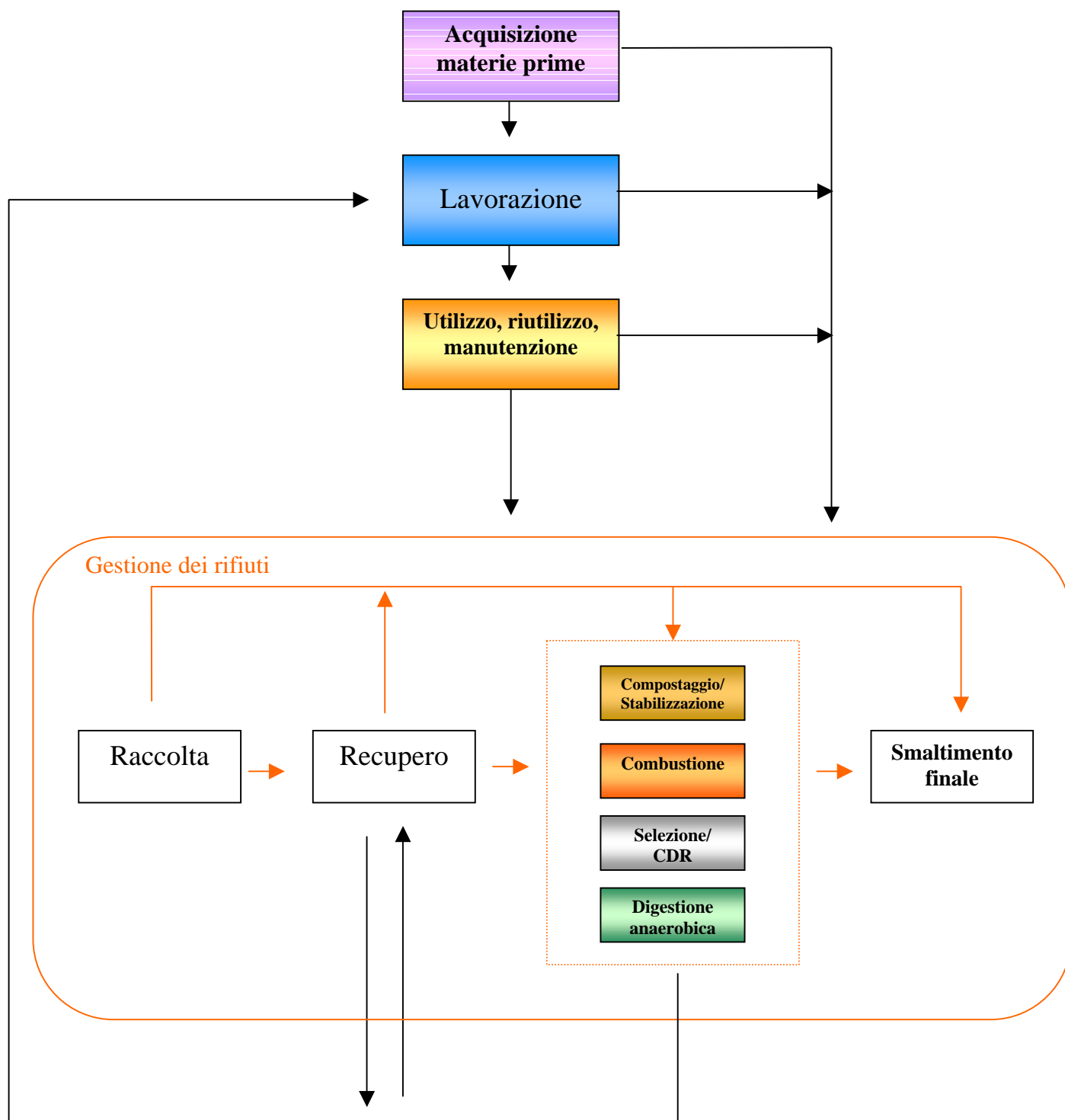


Figura 1 Ciclo vita dei rifiuti urbani Il ciclo vita dei rifiuti urbani inizia con la generazione dei rifiuti, sia durante il processo produttivo, sia dopo l'utilizzazione dei prodotti. I rifiuti generati sono raccolti e trasportati ad un impianto di trattamento per essere processati (riciclaggio) o trattati (combustione, compostaggio, discarica). I materiali che vengono recuperati possono essere reintrodotti nel processo di lavorazione e quindi rientrano nel ciclo dei rifiuti

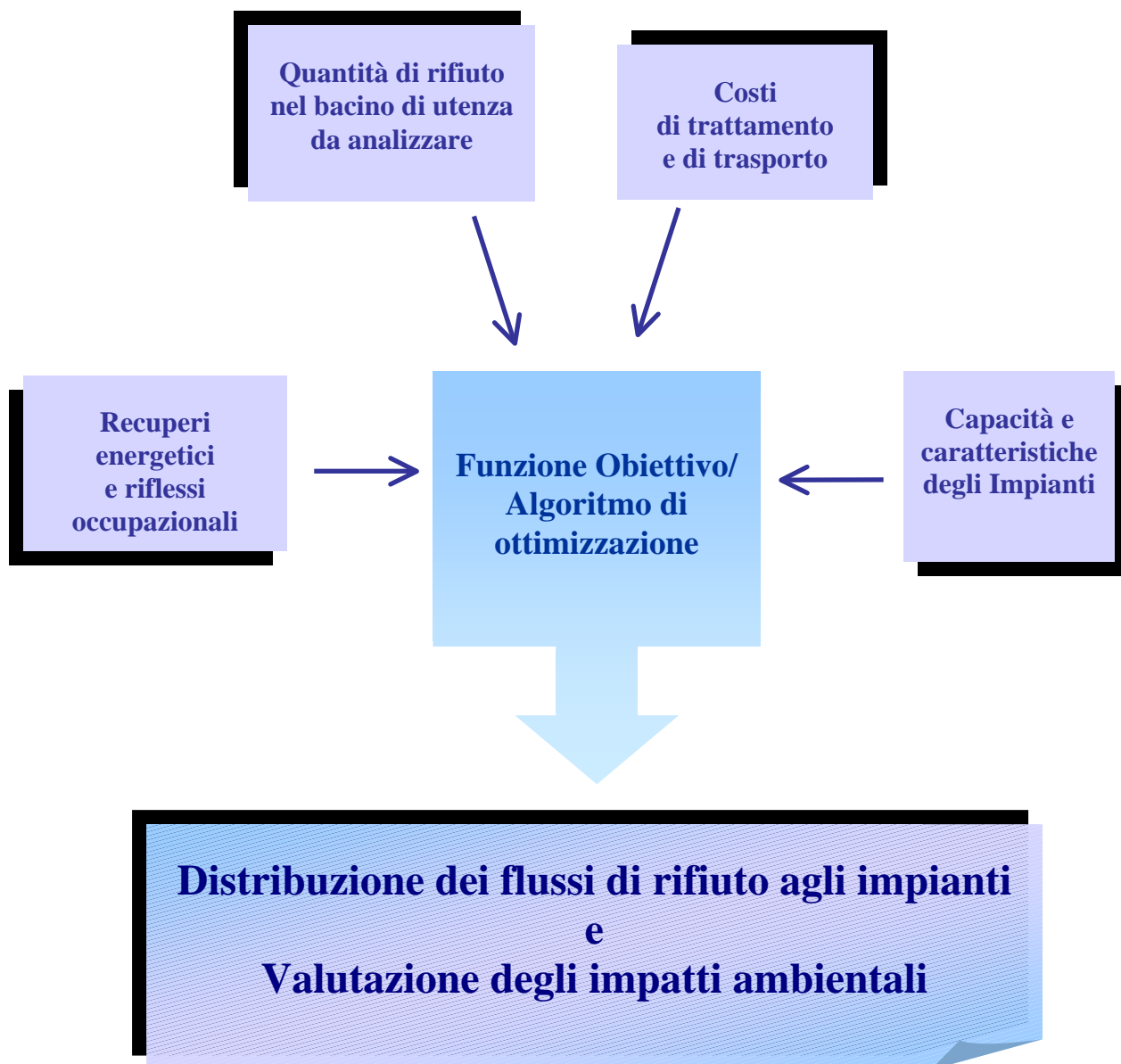


Figura 2 Schematizzazione del software SWFO-LCA

Di seguito sono riportati gli obiettivi dello studio sulla gestione integrata dei RU, va precisato però che il presente lavoro costituisce solo lo stato iniziale di tale studio.

- **Database:** I dati relativi ad ogni singola operazione di gestione dei rifiuti e quelli relativi alle operazioni di produzione a monte saranno inseriti in un database. Il database permetterà agli interessati di poter ricercare dati specifici, processi unitari, strutture, attrezzature o i diversi parametri del LCI. Inoltre potrà essere utilizzato per ricercare i parametri di input necessari al software SWFO-LCA.
- **SWFO-LCA:** E' stato sviluppato un software di semplice utilizzo che permetterà all'utente interessato di inserire i dati relativi al proprio sito (o fare affidamento su dati di default o ricavabili dal database Fig. 3) relativi alla quantità di rifiuti prodotti, la loro composizione ed altre informazioni specifiche relative agli impianti di trattamento dei rifiuti presenti nel territorio in esame al fine di ottenere diverse opzioni fra le strategie di gestione dei RU che è possibile applicare. Il modello tiene conto, infatti, dello stato di fatto del sistema, delle condizioni naturali, sociali, economiche, impiantistiche e tecnologiche del territorio interessato per arrivare a definire i possibili scenari. In particolare il modello permette la determinazione della soluzione che minimizza i costi relativi allo smaltimento dei rifiuti e fornisce una ripartizione ottimale dei flussi di rifiuto stessi secondo la ben nota tecnica di programmazione lineare che va sotto il nome di algoritmo del Simplex, sviluppato da G.B. Dantzig.
- **ACIA (Analisi dei Costi e degli Impatti Ambientali):** è stata condotta un'analisi dei costi e degli impatti ambientali per un caso tipo, di ognuna delle attività in cui è suddivisa la filiera dei servizi di igiene urbana. Questa analisi economico-ambientale può rivelarsi uno strumento utile, per gli operatori del settore, sia in fase decisionale che gestionale (Fig 4), tale analisi vuole, comunque, rimanere aperta agli apporti derivanti proprio dai casi reali.
- **Casi studio applicati:** si stanno conducendo simulazioni a partire dai dati relativi a specifiche realtà locali al fine di testare il software SWFO-LCA.

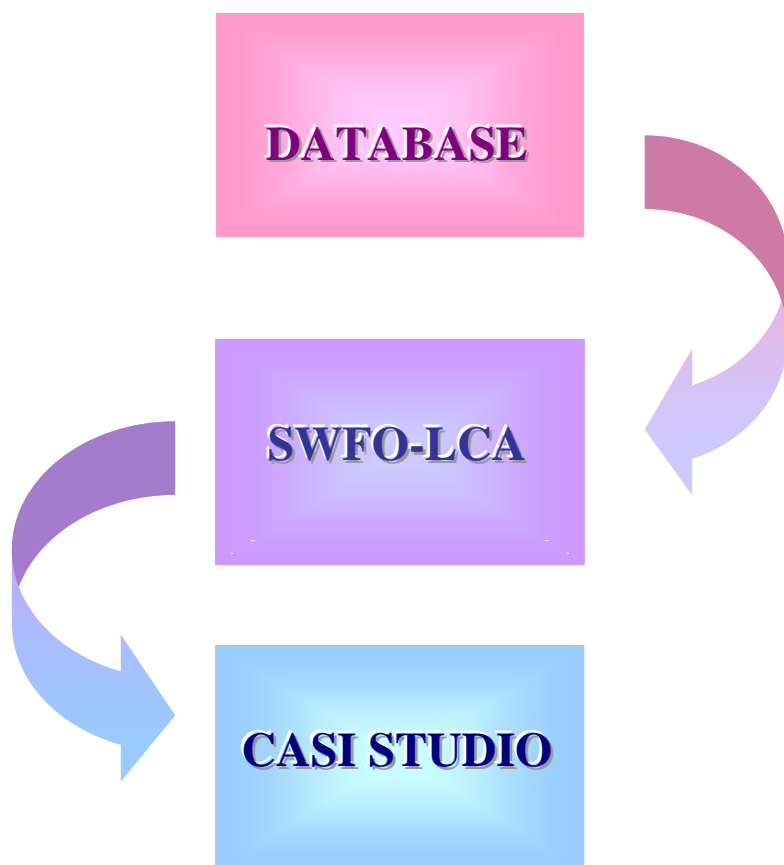


Figura 3 Relazioni tra il modello SWFO-LCA ed il database ed i casi studio



Figura 4 Interrelazioni tra ACIA e le attività connesse alla gestione dei rifiuti

Capitolo 1

Aspetti normativi legati alla gestione dei rifiuti

L'Italia ha presentato un ritardo enorme nel recepimento della normativa comunitaria in materia di rifiuti. (Direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui relativi rifiuti). L'atto con il quale si è provveduto a dare attuazione a tali direttive è rappresentato dal Dlgs n. 22 del 5 febbraio 1997. *“Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio”*.

Il Dlgs n. 22 del 5 febbraio 1997 (cosiddetto Decreto Ronchi) ha segnato il passaggio dal concetto di smaltimento al concetto di gestione di rifiuti, infatti per la prima volta nel panorama normativo italiano si parla di gestione dei rifiuti come comprendente tutte le attività che sono legate alla prevenzione, riduzione, riciclaggio e recupero dei rifiuti e non soltanto di messa in discarica come unica modalità di trattamento dei rifiuti.

Prima del decreto Ronchi la politica di gestione dei rifiuti era caratterizzata dall'assenza di una politica ambientale integrata e dall'assenza di una politica di riduzione della produzione di rifiuti e di recupero. Il sistema di gestione era incentrato sullo smaltimento in discarica, inoltre non era definito l'aspetto gestionale.

Con il decreto Ronchi nasce il concetto di politica ambientale integrata basata sui principi di :

- prevenzione;
- prossimità: la movimentazione dei rifiuti deve essere ridotta all'interno dell'ATO di riferimento ;
- autosufficienza: i RU devono essere smaltiti all'interno dell'ATO;
- responsabilità del produttore;
- responsabilità economica (“chi inquina paga”);
- economicità della gestione: copertura totale dei costi del servizio attraverso l'applicazione di un regime tariffario, la tariffa sarà proporzionale al quantità di rifiuti conferiti.

Lo smaltimento diviene una fase residuale del sistema di gestione dei rifiuti che è articolato nel modo seguente:

- raccolta (definita come prelievo, cernita e raggruppamento);
- trasporto;
- recupero (le operazioni di cui all'allegato C);
- smaltimento (le operazioni di cui allegato B).

Tale decreto fissa inoltre una gerarchia comportamentale nell'attuare il sistema di gestione dei rifiuti:

- prevenzione nella produzione dei rifiuti;
- recupero dei rifiuti (il recupero di materia viene ritenuto prioritario rispetto al recupero di energia;
- smaltimento dei rifiuti.

Viene superata la frammentazione gestionale attraverso l'istituzione degli Ambiti Territoriali Ottimali (ATO).

Il rifiuto viene definito all'art. 6, comma 1, lettera a) come *“qualsiasi sostanza od oggetto che rientra nelle categorie riportate nell'allegato A e di cui il detentore si disfi o abbia deciso o abbia l'obbligo di disfarsi”*.

I rifiuti vengono classificati secondo l'origine (urbani e speciali) e secondo le caratteristiche di pericolosità (pericolosi e non pericolosi):

- **Rifiuti urbani non pericolosi:** sono i rifiuti domestici anche ingombranti; i rifiuti provenienti dallo spezzamento delle strade; i rifiuti di qualunque natura o provenienza, giacenti sulle strade e aree pubbliche; i rifiuti vegetali provenienti dalle aree verdi (giardini, parchi, aree cimiteriali, ecc.)
- **Rifiuti urbani pericolosi:** sono costituiti da rifiuti che pur avendo un'origine civile, contengono al loro interno sostanze pericolose in quantità e concentrazioni tali da rappresentare un pericolo per l'ambiente. Per tale ragione devono essere gestiti diversamente dal flusso dei rifiuti urbani non pericolosi. Sono rifiuti urbani pericolosi le pile, i medicinali scaduti, i frigoriferi, le batterie, i contenitori di sostanze tossiche (c.d. contenitori T/F)

- **Rifiuti speciali non pericolosi:** sono i rifiuti generati dalle attività produttive: gli scarti da lavorazioni industriali, commerciali, artigianali e da attività agricole; i rifiuti derivanti dalle attività di trattamento e smaltimento dei rifiuti, fanghi prodotti dalla potabilizzazione e da altri trattamenti delle acque, dalla depurazione delle acque reflue e da abbattimento dei fumi, i rifiuti derivanti da attività sanitarie; i macchinari e le apparecchiature deteriorati ed obsoleti; i veicoli a motore.
- **Rifiuti Speciali Pericolosi:** sono i rifiuti contenenti al loro interno un'elevata concentrazione di sostanze inquinanti. La presenza di elementi tossici/contaminanti rende necessario un trattamento speciale per ridurre la pericolosità. In particolare la legge ha previsto per questa tipologia di rifiuti modalità specifiche di raccolta, stoccaggio, trasporto e smaltimento finale. Sono rifiuti speciali pericolosi i rifiuti derivanti da industria chimica, metallurgica, fotografica, conciaria e tessile; i rifiuti derivanti da raffinazione del petrolio; i rifiuti provenienti da ospedali, case di cura ed affini; gli oli esausti ed i solventi.

Questo decreto presenta una struttura molto articolata che copre ogni aspetto riguardante la gestione dei rifiuti (Fig. 1.1), ma poiché è una legge quadro non esaurisce il quadro normativo di riferimento ad esso si devono aggiungere, infatti, tutti i provvedimenti di attuazione del medesimo (Tabb. 1.2-1.9) ed altri provvedimenti normativi (Tab 1.1).

Alcuni provvedimenti nonostante siano stati abrogati dal Decreto Ronchi continuano ad essere applicate in quanto l'art. 57 comma 1 del suddetto decreto prevede che: *“le norme regolamentari e tecniche che disciplinano la raccolta, il trasporto, e lo smaltimento dei rifiuti restano in vigore sino all'adozione delle specifiche norme adottate in attuazione del presente decreto. A tale fine ogni riferimento ai rifiuti tossici e nocivi si deve intendere riferito ai rifiuti pericolosi”*.

In questo lavoro i provvedimenti di attuazione del decreto Ronchi sono stati suddivisi per aree tematiche per facilitare la consultazione.

Questo non vuole essere un quadro di riferimento esaustivo, ma uno strumento da cui partire e su cui costruire il corpus normativo relativamente all'ambito di interesse, in quanto la normativa sui rifiuti è soggetta a continui cambiamenti e variazioni, palese è il caso del CDR il quale è passato da rifiuto urbano a rifiuto speciale e a beneficiare, infine, del regime riservato alle fonti le fonti energetiche rinnovabili (Figura 1.2).

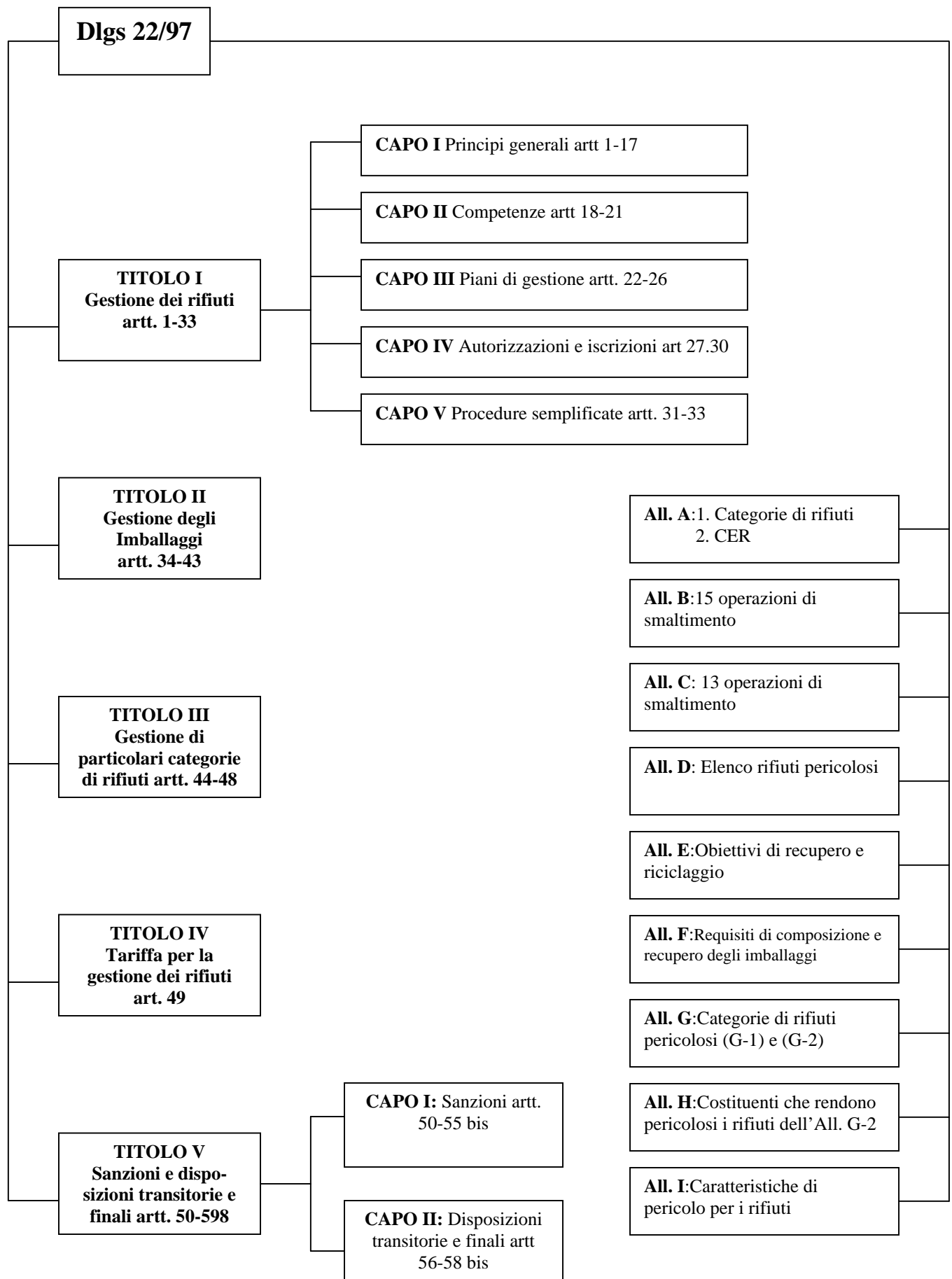


Figura1.1 Struttura del Dlgs 22/1997

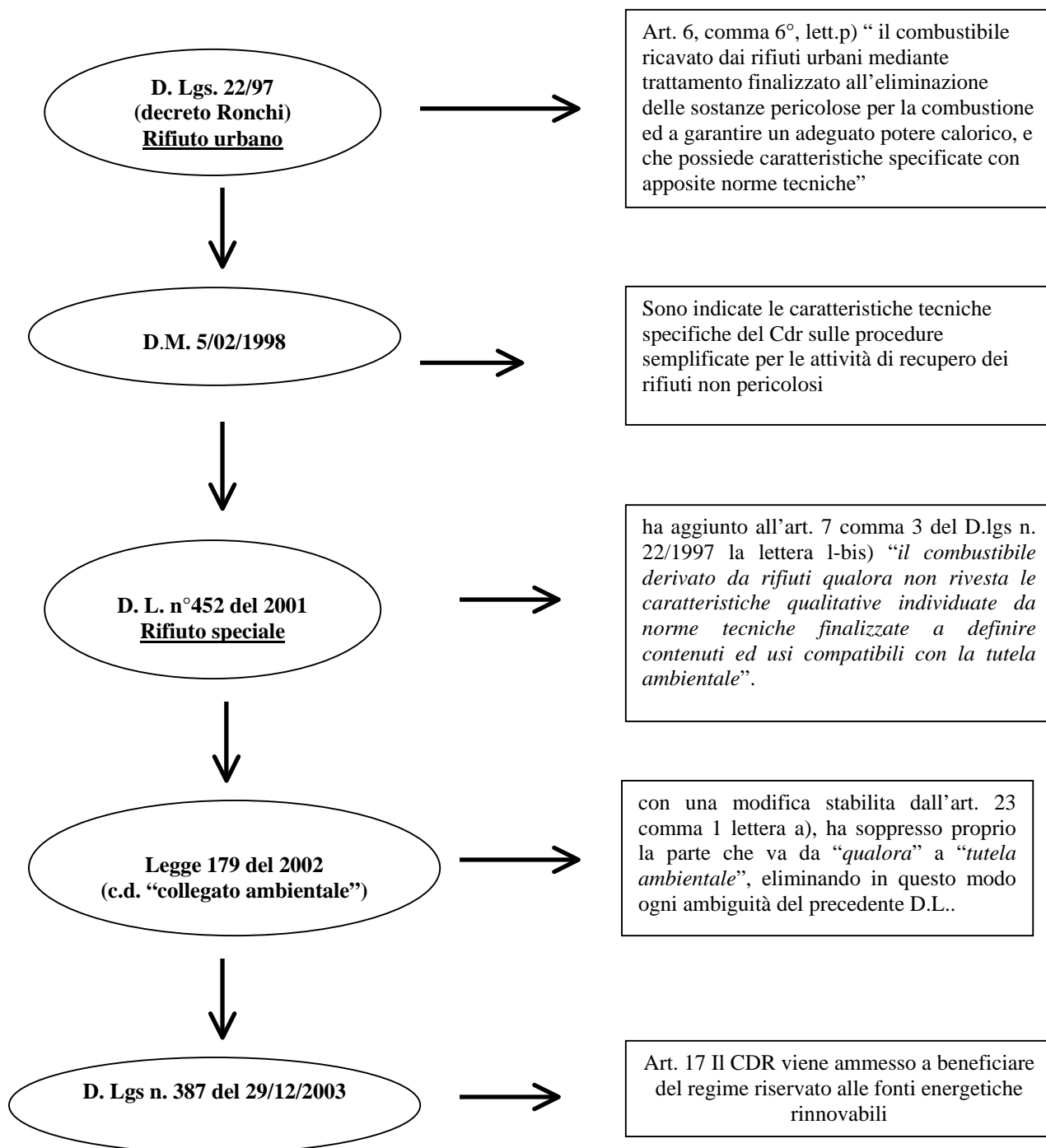


Figura 1.2 Corpus normativo del CDR: nel seguente diagramma a blocchi sono evidenziati i passaggi più importanti del percorso normativo del CDR

Provvedimento	Titolo
Deliberazione Comitato interministeriale del 27/7/1984	Disposizioni per la prima applicazione dell'art. , DPR 915/82, concernente lo smaltimento dei rifiuti
Legge 10 ottobre 1984 n. 748	Nuove norme per la disciplina dei fertilizzanti
DL 31/8/1987 n.361 convertito con modifiche dalla L n.441 del 29/10/87	Disposizioni urgenti in materia di smaltimento dei rifiuti
DPCM n. 308 del 7 giugno 1991	Regolamento concernente la disciplina per il trasporto ferroviario dei rifiuti speciali, tossici e nocivi, classificati dal DPR 915/1982
DM n. 459 del 31 ottobre 1991	Regolamento recante norme sul trasporto marittimo dei rifiuti in colli
Dlgs n. 95 del 27 gennaio 1992	Attuazione delle direttive 75/439/CEE e 87/11/CEE relative all'eliminazione degli oli usati
Dlgs n. 99 del 27 gennaio 1992	Attuazione della direttiva 86/278/CEE concernente la protezione dell'ambiente, in particolare del suolo, nell'utilizzazione di fanghi di depurazione in agricoltura
Dlgs n. 100 del 27 gennaio 1992	Attuazione delle direttive 78/176/CEE, 82/883/CEE, 83/29/CE, 89/428/CE in materia di inquinamento provocato da rifiuti dell'industria del biossido di titanio
DM n. 401 del 20 maggio 1992	Regolamento recante le caratteristiche tecniche dei liquidi e delle sostanze chimiche impiegati nel trattamento dei residui organici e delle acque chiare e luride raccolti negli impianti interni delle autocaravan
Regolamento CEE n. 259 del 1 febbraio 1993	Regolamento del Consiglio relativo alla sorveglianza ed al controllo delle spedizioni dei rifiuti all'interno della Comunità europea, nonché in entrata ed uscita dal suo territorio
Dlgs n.507 del 15 novembre 1993	Revisione ed armonizzazione dell'imposta comunale sulla pubblicità e del diritto delle pubbliche affissioni, della tassa per l'occupazione di spazi od aree pubbliche dei comuni e delle province nonché della tassa per lo smaltimento dei rifiuti solidi urbani a norma dell'articolo 4 della legge 23 ottobre 1992 n. 421 concernente il riordino della finanza territoriale
L n. 549 del 28 dicembre 1993	Misure a tutela dell'ozono stratosferico e dell'ambiente
L n. 70 del 25 gennaio 1994	Norme per la semplificazione degli adempimenti in materia ambientale, sanitaria e di sicurezza pubblica, nonché per l'attuazione del sistema di ecogestione ed audit ambientale
Dm n. 392 del 16 maggio 1996	Regolamento recante norme tecniche relative all'eliminazione degli oli usati
Dm del 18 luglio 1996	Ammontare dell'imposta unitaria dovuta per i rifiuti del settore minerario, estrattivo, edilizio, lapideo e metallurgico smaltiti in discarica ronchi
Dlgs n. 22 del 5 febbraio 1997	Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio
Dm n. 370 del 3 settembre 1998	Regolamento recante norme concernenti le modalità di prestazione della garanzia finanziaria per il trasporto transfrontaliero dei rifiuti
Dlgs n. 209 del 22 maggio 1999	Attuazione della direttiva 95/59/CE relativa allo smaltimento dei policlorodifenili e policlorotrifenili
Dm n. 460 del 22 ottobre del 1999	Regolamento recante disciplina dei casi e delle procedure di conferimento ai centri di raccolta dei veicoli a motore o rimorchi rinvenuti da organi pubblici e non reclamati dai proprietari e di quelli acquisiti ai sensi degli artt. 927-929 e 923 del Codice Civile

Tabella 1.1 Quadro normativo di riferimento

Provvedimento	Titolo
Dm 11 ottobre 2001	Condizioni per l'utilizzo dei trasformatori contenenti PCB in attesa della decontaminazione e dello smaltimento
Regolamento CE n. 1774 del 3 ottobre 2002	Regolamento recante norme sanitarie relative ai sottoprodotti di origine animale e non destinati al consumo umano
Dm n. 194 del 3 luglio 2003	Regolamento recante norme per il recepimento della direttiva 98/101/CEE del 22 dicembre 1998 che adegua al progresso tecnico la direttiva 91/157/CEE relativa a pile e accumulatori contenenti sostanze pericolose
Dlgs n. 182 del 24 giugno 2003	Attuazione della direttiva 200/59/CE relativa agli impianti portuali per la raccolta dei rifiuti prodotti dalle navi ed i residui di carico
Dlgs n. 209 del 24 giugno 2003	Attuazione della direttiva 200/53/CE relativa ai veicoli fuori uso
DPR n. 254 del 15 luglio 2003	Regolamento recante disciplina della gestione dei rifiuti sanitari

Tabella 1.1 Quadro normativo di riferimento

Gestione dei rifiuti		
Articolo	Oggetto	Attuazione
11, comma 1	Riorganizzazione catasto rifiuti	Dm 4/8/1998 n. 372
12, comma 6	Modello uniforme di registro di carico/scarico	Dm 1/4/1998 n. 148 Circolare 4/8/1998
15, comma 5	Modello uniforme di formulario di identificazione per il trasporto	Dm 1/4/1998 n. 148 Circolare 4/8/1998
16, comma 3	Criteri e norme per la spedizione transfrontaliera dei rifiuti	Dm 3/9/1998 n. 370
18, comma 2, lett. a)	Definizione valori limite di emissione e norme tecniche riguardanti le caratteristiche e le condizioni di esercizio degli impianti di incenerimento e di coincenerimento dei rifiuti pericolosi	Dm 25/2/2000 n.124
26	Istituzione osservatorio nazionale sui rifiuti	Dm 18/4/2000 n.309
30	Disciplina dell'albo delle imprese che effettuano la gestione dei rifiuti	Dm 28/4/1998 n.406 e successive modifiche
56, comma 2 e 2-bis	Abrogazione norme incompatibili con il Dlgs 22/1997 (anche relative agli oli usati)	Non attuato

Tabella 1.2 Quadro normativo di riferimento di attuazione del Dlgs 22/1997 relativo all'area tematica: Gestione dei rifiuti

Smaltimento in discarica		
Articolo	Oggetto	Attuazione
5, comma 6	Norme tecniche per lo smaltimento in discarica dal recepimento della direttiva 1999/31/CEE	Dlgs 13/1/2003 n. 36 Dm 13/3/2003
28, comma 2	Catalogazione e identificazione dei rifiuti pericolosi ai fini dello smaltimento in discarica	Dm 11/3/1998 n.141

Tabella 1.3 Quadro normativo di riferimento di attuazione del Dlgs 22/1997 relativo all'area tematica: Smaltimento in discarica

Recupero di materiale		
Articolo	Oggetto	Attuazione
19, comma 4	Metodologie di calcolo e definizione di materiale riciclato in base alle quali le Regioni devono adottare le disposizioni occorrenti affinché uffici, Enti pubblici e società a prevalente capitale pubblico coprano il fabbisogno annuale di manufatti e beni con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato non inferiore al 30% del loro fabbisogno	In elaborazione
31, comma 2 33, comma 2	Norme tecniche per il recupero dei rifiuti non pericolosi come materiali	Dm 5/2/1998 e successive modifiche
31, comma 2 33, comma 2	Norme tecniche per il recupero dei rifiuti pericolosi come materiali	Dm 12/6/2002 n. 161
31, comma 5	Determinazione diritto annuale di iscrizione negli Albi della Provincia	Dm 21/7/1998 n. 350

Tabella 1.4 Quadro normativo di riferimento di attuazione del Dlgs 22/1997 relativo all'area tematica: Recupero di materiale

Recupero energetico		
Articolo	Oggetto	Attuazione
5, comma 4	Norme tecniche per il calcolo su base annua dell'energia utile ottenuta dai rifiuti negli impianti di incenerimento	Non attuato
6, comma 1, lett. p)	Norme tecniche sulle caratteristiche del combustibile derivato da rifiuti (CDR)	Dm 5/2/1998 e successive modifiche
31, commi 2 e 3 33, comma 2	Norme tecniche per il recupero energetico agevolato dei rifiuti non pericolosi	Dm 5/2/1998 e successive modifiche
31, comma 2 32	Norme tecniche per l'autosmaltimento dei rifiuti non pericolosi	Non attuato
33, comma 9	Determinazione modalità, condizioni e misure degli incentivi finanziari previsti da disposizioni legislative per l'utilizzo di rifiuti come combustibile per produrre energia elettrica	Non attuato

Tabella 1.5 Quadro normativo di riferimento di attuazione del Dlgs 22/1997 relativo all'area tematica: Recupero energetico

Bonifiche		
Articolo	Oggetto	Attuazione
17, comma 1	Definizione limiti di accettabilità della contaminazione; delle procedure di riferimento per prelievo ed analisi dei campioni; dei criteri per la messa in sicurezza, bonifica e redazione progetti di bonifica	Dm 25/10/1999 n. 471
17, comma 1-bis	Mappatura nazionale dei siti oggetto dei censimenti e loro verifica con le Regioni	Dm 18/9/2001 n. 468 Dm 18/3/2003 n. 101

Tabella 1.6 Quadro normativo di riferimento di attuazione del Dlgs 22/1997 relativo all'area tematica: Bonifiche

Compost, rifiuti sanitari, amianto, veicoli a motore, beni durevoli, oli vegetali, polietilene, rifiuti urbani		
Articolo	Oggetto	Attuazione
6, comma 1 lett q)	Norme tecniche sul compost ottenuto dalla frazione organica dei rifiuti urbani	Dm 5/2/1998
44, comma 4	Introduzione cauzione obbligatoria sui beni durevoli in caso di particolari necessità	Non attuato
45, comma 4	Rifiuti sanitari	Dm 26/6/2000 Abrogato dal Dpr 15/7/2003 n. 254
46, comma 3	Conferimento ai centri di raccolta dei veicoli o rimorchi rinvenuti da organi pubblici o non reclamati dai proprietari e di quelli acquisiti ex artt 923,927 e 929 C.c.	Dm 22/9/1999 n. 460
46, comma 10	Norme tecniche sulle caratteristiche degli impianti di autodemolizione, operazioni di messa in sicurezza e individuazione parti di ricambio attinenti alla sicurezza	Non attuato
47, comma 2	Approvazione statuto consorzio obbligatorio oli e grassi vegetali ed animali esausti	Dm 5/4/2004
47, comma 9	Determinazione contributo di riciclaggio per gli oli ed i grassi vegetali	Dm 27/11/2003
48, comma 8	Approvazione statuto Consorzio polietilene (POLIECO)	Dm 15/7/1998
18, comma 2 lett b)	Disciplina del recupero di prodotti di amianto e dei beni e dei prodotti contenenti amianto	In elaborazione
18, comma 2 lett d)	Determinazione criteri quali-quantitativi per l'assimilazione agli urbani dei rifiuti speciali	In elaborazione
49, comma 5	Elaborazione metodo normalizzato tariffa rifiuti urbani	Dpr 12/4/1999 n. 158 Modificato dalla Finanziaria 2000 art 33 Finanziaria 2003 art 31 Finanziaria 2004 art 4

Tabella 1.7 Quadro normativo di riferimento di attuazione del Dlgs 22/1997 relativo alle aree tematiche: Compost, rifiuti sanitari, amianto, veicoli a motore, beni durevoli, oli vegetali, polietilene, rifiuti urbani

Imballaggi		
Articolo	Oggetto	Attuazione
36, comma 4	Adozione misure tecniche per imballaggi primari di apparecchiature mediche e prodotti farmaceutici; per piccoli imballaggi ed imballaggi di lusso	Non attuato
37, comma 3	Adozione misure economiche sugli imballaggi a seguito del mancato raggiungimento degli obiettivi di recupero e riciclaggio	Non attuato
37, comma 4	Adozione e aggiornamento obiettivi di recupero e riciclaggio in caso di mancato raggiungimento di quelli previsti	Non attuato
40, comma 2	Approvazione statuti consorzi di filiera	DD.MM. 15/7/1998
41, comma 6	Approvazione statuto CONAI	Dm 29/10/1997
41, comma 8	Nomina di un rappresentante dei consumatori nel CONAI	Designato (Arcangelo Spagnoli)
42, comma 3	Approvazione programma generale imballaggi predisposto dal CONAI e trasmesso all'Osservatorio nazionale sui rifiuti	Approvato
42, comma 4	Elaborazione programma generale imballaggi da parte dell'Osservatorio nazionale sui rifiuti, in caso di mancata predisposizione da parte del CONAI	Non predisposto
43, comma 5	Determinazione delle esclusioni per i limiti di metalli pesanti negli imballaggi	Non predisposto

Tabella 1.8 Quadro normativo di riferimento di attuazione del Dlgs 22/1997 relativo all'area tematica: Imballaggi

Accordi di programma		
Articolo	Oggetto	Attuazione
4, comma 4	Autorità competenti e soggetti economici: riutilizzo, riciclaggio e recupero con particolare riferimento al reimpiego delle materie prime e dei prodotti di raccolta differenziata	
22, comma 11	Ministri Ambiente/Attività produttive (d'intesa con la Regione): recupero nell'ambito di insediamenti produttivi esistenti	
25, comma 1	Ministri Ambiente/Attività produttive, Enti pubblici, imprese e associazioni di categoria: piani di settore e riduzione dei rifiuti	CDR, compost, rifiuti cellulosici, pneumatici, inerti, amalgame dentarie, imballaggi per liquidi alimentari – birra.
25, comma 2	Ministri Ambiente/Attività produttive Enti pubblici, imprese e associazioni di categoria: per Ecolabel, Ecoaudit e ritiro dei beni di consumo (si aggiunge il Ministro delle Politiche agricole per le attività collegate alla produzione agricola)	
44, comma 2	Ministri Ambiente/Attività produttive, distributori, importatori di beni durevoli e soggetti che effettuano la gestione dei relativi rifiuti	In elaborazione

Tabella 1.9 Quadro normativo di riferimento di attuazione del Dlgs 22/1997 relativo all'area tematica: Accordi di programma

Capitolo 2

LCA: Definizioni, fasi ed applicazione ai sistemi di gestione integrata dei rifiuti

2.1 LCA: Definizione e fasi

L'Analisi del Ciclo Vita (Life Cycle Assessment – LCA) fa parte dei nuovi strumenti metodologici, messi a punto negli ultimi anni, per valutare la sostenibilità delle attività umane, al fine di sviluppare, soprattutto, interventi di natura preventiva.

La definizione di LCA più accreditata, è quella proposta dalla SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry), oggi formalizzata in Italia dalla norma UNI EN ISO 14040:

“E’ un procedimento oggettivo di valutazione dei carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo od un’attività, effettuato attraverso l’identificazione dell’energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell’ambiente. La Valutazione include l’intero ciclo vita del processo od attività, comprendendo l’estrazione ed il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l’uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale”.

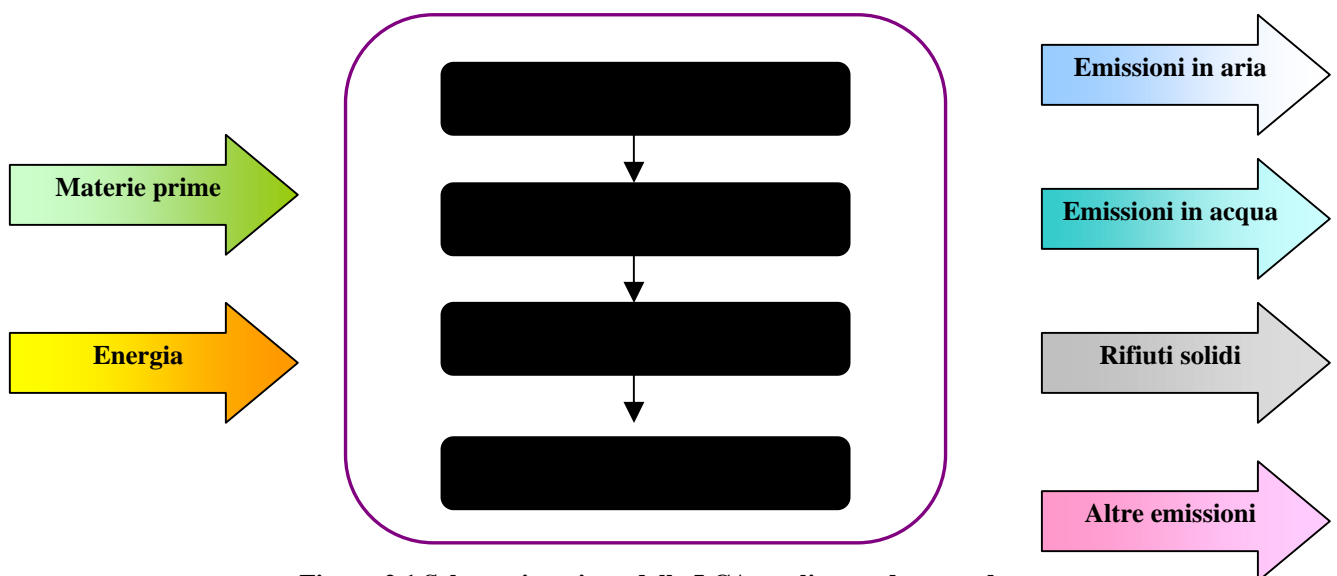


Figura 2.1 Schematizzazione della LCA applicata ad un prodotto
nell'arco del suo intero ciclo vita, così come mostrato in Fig. 2.1, seguendo passo passo il

cammino percorso dalle materie prime e dell'energia, dalla loro acquisizione, attraverso i processi di trasformazione, di trasporto, fino allo smaltimento finale, andando a determinare tutti i rilasci nell'ambiente, praticamente dalla “culla alla tomba” (from cradle to grave) o se si vuole sottolineare il concetto di riciclo di alcuni materiali, si parla anche di analisi dalla “culla alla culla”. Questo approccio prende in considerazione il miglioramento dell'intera filiera produttiva e non solo dei singoli processi.

Tutt'ora in fase di sviluppo, la metodologia è stata standardizzata a livello internazionale attraverso la pubblicazione di quattro Norme della serie ISO 14040.

In Italia i quattro standard ISO dedicati specificamente alla LCA sono stati recepiti come:

- UNI EN ISO 14040 1997: Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita- Principi e quadro di riferimento. Vengono definiti i principi e la struttura.
- UNI EN ISO 14041 1998: Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita- Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione e analisi dell'inventario.
- UNI EN ISO 14042 2000: Gestione ambientale – Valutazione dell'impatto del ciclo di vita- Definisce come condurre la fase di Valutazione degli Impatti (Life Cycle Impact Assessment);
- UNI EN ISO 14043 2000: Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita- Interpretazione del ciclo di vita.

La LCA è l'unico strumento che possieda un riconoscimento scientifico tale da essere “consigliato” da normative sia comunitarie che nazionali:

- Il **Regolamento CEE n. 880/92** (Concernente un sistema comunitario di assegnazione di un marchio di qualità ecologica) e il **Regolamento Ecolabel** (Norma ISO 14024, riguardante l'etichettatura ecologica di tipo I) propongono la LCA come uno strumento adatto ad analizzare il ciclo di vita di un prodotto.
- Il D. Lgs. n. 22 del 5/2/1997 cosiddetto “**Decreto Ronchi**” ha inserito a livello normativo, per la prima volta in Italia, la richiesta esplicita dell'analisi del ciclo di vita per l'esecuzione dei piani di smaltimento dei rifiuti.

Inoltre, questa metodologia è accettata dalla comunità scientifica internazionale ed è riconosciuta:

- idonea per imprese che vogliono diventare ambientalmente efficienti;
- utile agli organismi pubblici per la gestione di politiche ambientali.

La LCA può dare supporto a:

- Identificare le opportunità di migliorare gli aspetti ambientali dei prodotti nei diversi stadi della loro ciclo di vita;
- Prendere delle decisioni nell'industria e nelle organizzazioni governative e non governative (per esempio pianificazione strategica, scelta di priorità, progettazione o riprogettazione di prodotti o di processi);
- Scegliere indicatori rilevanti di prestazione ambientale con le relative tecniche di misurazione;
- Commercializzare un prodotto (per esempio mediante una dichiarazione ecologica, un sistema di etichetta a ecologica o un'asserzione di prodotto ecologico).

La LCA, così come mostrato in Fig. 2.2, è una metodologia di tipo dinamico ed iterativo, articolata lungo le seguenti fasi:

1. Definizione degli obiettivi e del campo d'applicazione dello studio (Goal definition and scoping): è la fase preliminare in cui vengono definiti le finalità dello studio, l'unità funzionale, i confini del sistema studiato, il fabbisogno di dati, le assunzioni ed i limiti.
2. Analisi di inventario (Life Cycle Inventory, LCI): è la parte del lavoro dedicata allo studio del ciclo vita del processo, lo scopo principale è quello di ricostruire il percorso dei materiali attraverso tutto il processo produttivo.
3. Analisi degli impatti (Life Cycle Impact Assessment, LCIA): è lo studio dell'impatto ambientale generato dal processo o attività, ha lo scopo di valutare l'entità delle modificazioni generate a seguito dei rilasci nell'ambiente e dei consumi delle risorse che sono stati evidenziati nell'Inventario. Si arriva ad un giudizio di pericolosità ambientale.
4. Interpretazione e miglioramento (Life Cycle Interpretation): è la parte conclusiva il cui scopo è proporre gli interventi necessari a ridurre l'impatto ambientale dei

processi considerati; la valutazione andrà fatta in maniera iterativa con la stessa metodologia LCA in modo da non attuare azioni tali da peggiorare lo stato di fatto.

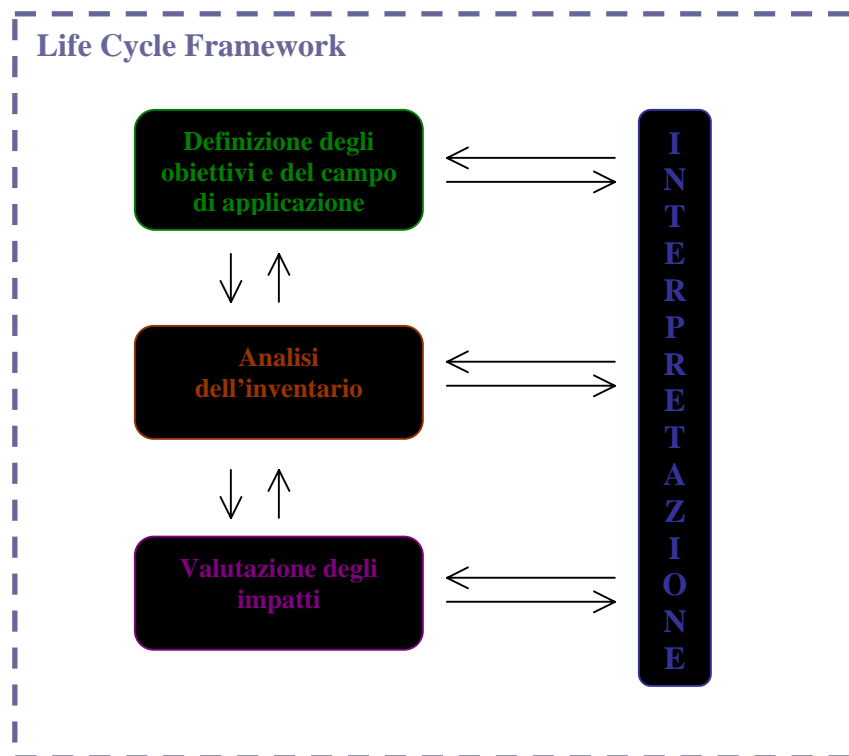


Figura 2.2 Struttura del LCA secondo la norma UNI 14040

2.1.1 Definizione degli obiettivi e della portata dello studio

La Norma UNI EN ISO 14040 definisce questa prima fase nel seguente modo: “*Gli obiettivi e gli scopi dello studio LCA devono essere definiti con chiarezza ed essere coerenti con l’applicazione prevista. L’obiettivo di una LCA deve stabilire senza ambiguità quali siano l’applicazione prevista, le motivazioni che inducono a realizzare lo studio e il tipo di pubblico a cui è destinato, cioè a quali persone si intendono comunicare i risultati dello studio*”.

Tale fase costituisce lo step preliminare di uno studio LCA. Gli obiettivi dello studio (Goal Definition) devono essere specificati in maniera univoca e non lasciare spazio ad interpretazioni, così come per la definizione dei confini (Scope Definition), in questa fase devono essere specificati:

- Le funzioni e le caratteristiche del **sistema** che si intende analizzare, un sistema viene definito come un insieme di dispositivi che realizzano una o più precise operazioni industriali aventi una determinata funzione, esso è delimitato da confini fisici con l'ambiente circostante e con questo ha rapporti di scambio caratterizzati da una serie di input ed output, i sistemi contengono una serie operazioni collegate tra loro, anche in modo molto complesso, dai flussi di materiali, di energia e di prodotti finali, è necessario pertanto definire le singole operazioni componenti come **“operazioni unitarie”**, considerando che gli output di una singola operazione unitaria coincidono con gli input della successiva operazione unitaria, tali operazioni unitarie sono facilmente individuabili qualora si consideri il sistema in condizioni stazionarie (Fig. 2.3);
- **L'unità funzionale**² è un'unità di misura di riferimento con cui trattare ed esporre i dati e le informazioni di una LCA, è l'unità a cui si riferiscono tutte le unità di bilancio, è l'unità a cui normalizzare tutte le informazioni è arbitraria e dipende dallo scopo per cui i sottosistemi ed il sistema globale sono stati creati, ad esempio l'unità funzionale per comparare diversi contenitori per bevande può essere considerata il volume di bevanda consegnato al consumatore o al contrario la quantità di imballaggio necessaria per contenere un determinato volume;
- La profondità, l'ampiezza dell'analisi ed i **confini del sistema** in esame, una prima delimitazione dei confini verrà effettuata in base a criteri geografici, fisici e tecnologici, ma la definizione dei confini può proseguire andando ad escludere operazioni non rilevanti o per le quali è troppo oneroso ottenere informazioni dettagliate, la scelta dei confini del sistema deve essere motivata e sempre segnalata nella redazione dello studio;
- Le assunzioni e le semplificazioni effettuate;
- Le limitazioni dello studio.

² UNI EN ISO 14040, Par. 5.1.2.1: “Una unità funzionale costituisce una misura della prestazione del flusso in uscita funzionale del sistema prodotto. 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 di una LCA. La comparabilità dei risultati di una LCA è particolarmente critica quando si valutano sistemi differenti, perché ci si deve assicurare che le comparazioni siano fatte su base analoga. Un sistema può avere un gran numero di funzioni possibili e la funzione scelta per lo studio dipende dall'obiettivo e dal campo di applicazione. La corrispondente unità funzionale deve essere definita e misurabile.”. Praticamente è una unità di riferimento per quantificare il rendimento in termini di LCA di un sistema produttivo.

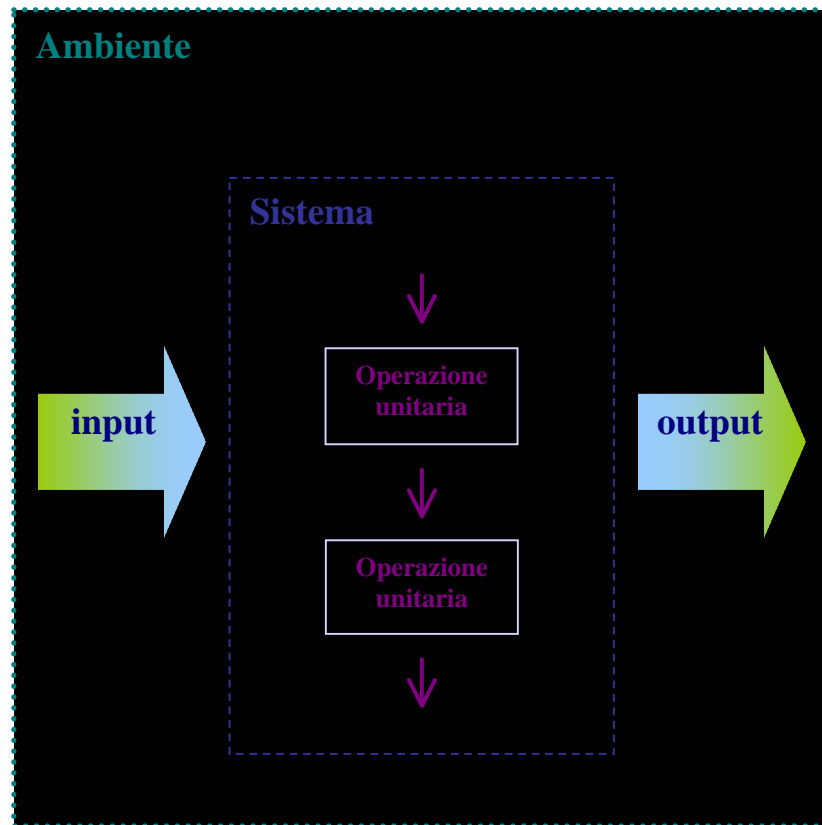


Figura 2.3 Relazioni tra il sistema in esame e l'ambiente circostante e la sua scomposizione in operazioni unitarie

2.1.2 Analisi di inventario

La norma ISO 14040 definisce l'analisi di inventario come la *“Fase della LCA che prevede la raccolta e la quantificazione degli input e degli output per un dato sistema/prodotto lungo il suo ciclo di vita.”*

In questa fase, che costituisce il nucleo centrale e più impegnativo di uno studio di LCA, vengono raccolti i dati necessari e viene preparato il modello che rappresenta l'intero ciclo di vita dei prodotti, dei processi e delle attività.

Questa è la fase che negli ultimi anni si è maggiormente sviluppata e che ha raggiunto un livello di unificazione praticamente definitivo. Nell'inventario, cuore della metodologia, vanno quantificati ed individuati tutti i parametri caratteristici degli input ed output del ciclo vita del prodotto/attività oggetto dello studio, limitatamente alle operazioni ed ai processi individuati nelle fase precedente.

L'analisi di Inventario deve modellizzare il sistema indagato come una sequenza complessa di operazioni unitarie che comunicano tra loro e con l'ambiente attraverso una serie di input ed output, questo processo come suggerito dalle SETAC, almeno nella fase iniziale, può essere impostato così come mostrato in figura 2.4.

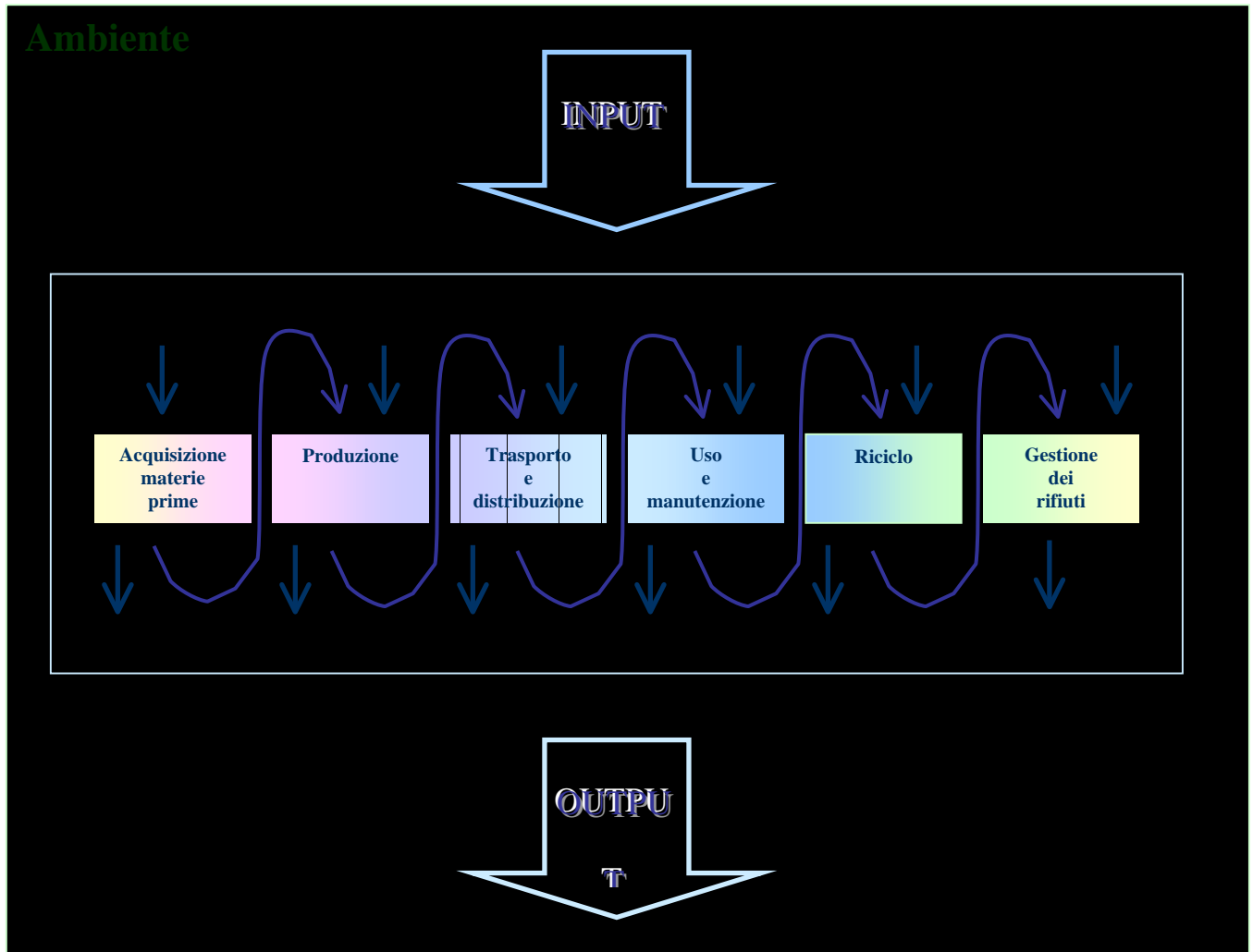


Figura 2.4 Individuazione degli input e degli output interni ed esterni al sistema

In questa fase non si devono fornire valutazioni o giudizi, ma solo individuare e fornire dati oggettivi che verranno elaborati in seguito.

Per evitare di avere stesure dell'Inventario soggettive, la ISO 14040 prevede che la stesura di questa fase comprenda:

- La stesura di un **diagramma di flusso**, opportunamente dettagliato delle operazioni che compongono in sistema in esame.

- La **raccolta dei dati** deve essere per quanto possibile effettuata sul campo (primary data), nel caso in cui non sia possibile ottenere dati direttamente bisogna servirsi dei dati derivati (secondary data) ossia di dati ricavati dalla letteratura o da banche dati appositamente costruite.
- La definizione delle **procedure di allocazione**³. Affinché gli input e gli output siano assegnati correttamente ai singoli sottosistemi è necessario procedere con un'operazione di allocazione, che consiste nell'associare i carichi energetici ed ambientali ai vari prodotti e sottoprodotto di un processo.

2.1.3 Analisi degli impatti

La norma ISO 14040 definisce la fase di valutazione degli impatti come *“Fase di una LCA destinata allo studio e alla valutazione del potenziale impatto ambientale provocato dal sistema-prodotto in esame, che ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni generate a seguito dei consumi di risorse e dei rilasci nell'ambiente calcolati nell'inventario”*.

È la fase di passaggio dalla raccolta e analisi dei dati allo studio degli effetti ambientali. In pratica è il momento in cui si deve quantificare l'entità del contributo di ogni singolo processo al danno complessivo. L'analisi degli impatti ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni ambientali che si generano a seguito dei rilasci nell'ambiente e del consumo di risorse necessario all'attività produttiva.

Gli elementi necessari per la valutazione degli impatti sono:

- La selezione delle categorie di impatto (effetti ambientali) e degli indicatori ambientali che le rappresentano.
- L'attribuzione dei risultati dell'analisi d'inventario alle categorie di impatto selezionate (classificazione) in base agli effetti che esse provocano o possono provocare sull'ambiente.

Viene cioè attribuito un “peso” alle diverse sostanze. Tale peso, che è un valore adimensionale, è attribuito in relazione all'effetto più o meno intenso che le sostanze hanno sull'ambiente.

³ UNI EN ISO 14040 par 3.1: “Allocazione: Ripartizione dei flussi in ingresso o uscita di un processo unitario appartenente al sistema-prodotto studiato.”. Attribuzione, nel presente contesto, secondo regole e metodologie particolari, del carico di energia, di materiali ed emissioni corrispondente ad un output del sistema produttivo in esame.

Durante la fase di Analisi degli Impatti, praticamente vengono quantificati gli impatti ambientali provocati dal flusso di materia e energia attraverso il sistema. L'inventario fornisce, infatti, un lungo elenco dei dati relativi all'utilizzo delle risorse ed alle emissioni relative al sistema in esame, i dati raccolti vengono trasformati in un numero ridotto di categorie d'impatto sulla base delle quali è possibile effettuare le valutazioni. Le valutazioni vengono fornite sotto forma di profilo ambientale per una decina di tematiche ambientali.

Lo schema operativo dell'Analisi degli Impatti (LCIA) secondo la ISO 14042 è il seguente:

- **Classificazione** ovvero la scelta degli effetti ambientali (o categorie di impatto) sui quali sarà basata l'analisi. Le categorie d'impatto più frequentemente riportate sono: l'effetto serra a 100 anni (GWP_{100}), l'acidificazione potenziale (AP), la formazione di smog fotochimico (POCP), il buco nell'ozono (OD), l'eutrofizzazione potenziale (EP), la tossicità per l'uomo e per l'ambiente ed il consumo di risorse rinnovabili. Gli effetti ambientali saranno esaminati in maniera più approfondita nel prossimo capitolo.
- I metodi di **caratterizzazione** permettono di determinare in modo omogeneo e quantitativo il contributo delle singole emissioni.
- **Normalizzazione**: confronto degli indicatori ambientali calcolati con dei valori di riferimento.
- **Valutazione**: determinazione e confronto dell'importanza dei singoli effetti ambientali.

I metodi di valutazione e normalizzazione sono molteplici ed ancora a livello sperimentale, quelli più comunemente utilizzati sono i seguenti:

- Il **Metodo EDIP (Environmental Design of Industrial Product)** (*Haushild & Wenzel, 1997*) è stato sviluppato in Danimarca a partire dal 1993, la fase di normalizzazione che caratterizza tale metodo consiste nell'esecuzione di un confronto degli impatti potenziali calcolati ed un valore di riferimento rispetto al quale sono note le conseguenze ambientali. Detta "i" l'emissione generica di una generica sostanza che ha una magnitudo pari a Q_i e un fattore di caratterizzazione

EF(j) relativo alla generica categoria d'impatto ambientale (j), il contributo potenziale della generica sostanza i alla categoria d'impatto j viene calcolata nel modo seguente:

$$EP(j)_i = Qi * EP(j)_i$$

Per calcolare il contributo di più sostanze alla stessa categoria d'impatto, vengono sommati i singoli contributi calcolati nel modo precedente:

$$EP(j) = \sum_i EP(j)_i = \sum_i (Qi * EP(j)_i)$$

L'impatto potenziale normalizzato si calcola eseguendo il rapporto tra l'impatto potenziale e il coefficiente di normalizzazione, in definitiva l'unità normalizzata è definita persona-equivalente, ad esempio per l'effetto serra si prende in considerazione il valore di concentrazione della CO₂-equivalente causato dal sistema industriale in esame e lo si divide per la media annua delle emissioni di CO₂-abitante della terra (8.2*10⁶ g/ab).

- **Metodo Critical Surface – Time 95** è una procedura basata su considerazioni sia scientifiche, sia di tipo socio-economico, che utilizza quindi due diversi coefficienti per la pesatura degli impatti. Questo metodo, sviluppato nel 1994 presso l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne), si caratterizza per un particolare riguardo nei confronti della valutazione di tipo tossicologico. Il CST95 utilizza come unità di valutazione un valore considerato critico (critical flow) il quale può essere rappresentato dal limite di legge stabilito per i diversi tipi di emissione nei vari paesi in cui viene svolta l'indagine. Le emissioni sono pesate in base al limite di legge e sono sommate tra loro, un volume critico è, ad esempio, il totale delle quantità di aria che è necessario impiegare per mantenere l'emissione al sotto del limite scelto. Tale metodo ha incontrato alcune critiche poiché i limiti di legge spesso non hanno effettivo significato di limite nocivo ed inoltre variano da nazione a nazione rendendo il metodo poco flessibile.
- **Metodo EPS (Enviromental Priority Strategies)**, prevede un approccio di tipo economico al problema, riferendosi all'unità di carico ambientale (ELU, *Enviromental Load Unit*) basata sulla quantificazione in termini monetari di quanto sarebbe necessario spendere per mantenere inalterata la situazione ambientale o per ripristinare quella esistente prima degli effetti ambientali generati dal processo

produttivo. Più che strumento di normalizzazione è uno strumento di valutazione d'impatto basato sulla quantificazione monetaria dei cinque soggetti principali (safeguard subjects): *la salute umana, la biodiversità, la perdita di risorse, la perdita di produzione (industriale e biologica) ed il valore estetico*. Un'unità ELU può corrispondere ad un euro, ad un dollaro USA o come più comunemente adottato ad un ECU, per unità di misura fisica di riferimento m^2 , Kg (ELU/Kg). La sua entità viene misurata moltiplicando il quantitativo di una data emissione per l'indice di carico ambientale caratteristico. Più è basso l'indice ELU migliore è la soluzione scelta tra diverse alternative analizzate. La difficoltà nel determinare gli indici di carico ambientale rende problematica l'applicazione di tale metodo.

- **Metodo degli Eco-indicatori (Eco-indicator).** E' un metodo di pesatura e valutazione degli effetti ambientali che danneggiano gli ecosistemi o la salute umana su scala europea, è uno strumento di semplice utilizzo per la valutazione, in fase progettuale, delle diverse opzioni che possono presentarsi durante l'analisi di un prodotto/processo definito. E' utilizzabile anche per risolvere i problemi dell'utilizzo del LCA durante il processo progettuale, con particolare riguardo alla difficoltà di interpretazione dei risultati, permette infatti di pervenire al calcolo di un unico valore quantificabile dell'impatto totale sull'ambiente: l'Eco-indicator, permettendo così una univoca valutazione dell'impatto totale sull'ambiente che negli altri casi rimaneva indeterminato. Gli Eco-indicatori, basati sull'analisi di una serie di LCA svolte su materiali e processi, permettono di stabilire un impatto sull'ambiente del prodotto/servizio oggetto dell'indagine, maggiore è il valore dell'Eco-indicatore maggiore è l'impatto potenziale. Gli effetti ambientali considerati sono quelli che si ritiene che danneggino l'ecosistema o la salute umana a scale regionale o planetaria: *effetto serra, distruzione dello strato di ozono, acidificazione, eutrofizzazione, smog e sostanze tossiche* (metalli pesanti, sostanza cancerogene, pesticidi), non sono invece considerati gli effetti ambientali "locali": le sostanze tossiche che rappresentano un problema solo sui luoghi di lavoro, il consumo di materie prime (l'indicatore non tiene conto della rarità della materia prima, ma solo delle emissioni legate al processo estrattivo) ed i rifiuti (sono considerate le emissioni relative alla gestione dei rifiuti, ma non la quantità di rifiuti prodotta e nemmeno lo spazio sottratto all'ambiente necessario allo smaltimento). Il punto debole di tutta la metodologia risiede nella definizione dei fattori utilizzati

nella pesatura degli impatti, in quanto differenti effetti ambientali causano differenti tipi di danno, l'importanza relativa dei diversi effetti dovrebbe allora esser stabilita attraverso opportuni fattori di pesatura che consentano il confronto della gravità dei diversi impatti potenziali, normalizzati su una stessa scala di riferimento. Per questo tale metodo utilizza il criterio del "Distance to target", che presuppone l'esistenza di una correlazione tra la gravità di un determinato effetto e la distanza tra il livello attuale ed un livello obiettivo prefissato. I livelli di danno che sono stati assunti come equivalenti sono i seguenti:

- ✓ Numero di morti causati da effetti ambientali (il livello accettabile è di 1 morto per milione).
- ✓ Numero di persone che si ammalano come conseguenza degli effetti ambientali.
- ✓ Degradazione dell'ecosistema (5% di degrado max per il successivo periodo).

Il metodo Eco-indicator, a differenza del metodo CST95 è basato su informazioni di tipo scientifico, ma la definizione di questi livelli di equivalenza resta tuttavia una scelta soggettiva e pertanto suscettibile di presupporre differenti assunzioni e pervenire quindi a diversi valori dei fattori per la pesatura.

2.1.4 Interpretazione e miglioramento

Nella norma ISO 14040 la fase di interpretazione e miglioramento è definita come *"Fase di una LCA in cui i risultati dell'Inventario e/o della analisi degli impatti sono elaborati in accordo con l'obiettivo e lo scopo dello studio in modo tale da raggiungere conclusioni e raccomandazioni."*

È la fase conclusiva di una LCA, che ha lo scopo di proporre i cambiamenti necessari a ridurre l'impatto ambientale.

Si possono individuare quattro stadi principali:

1. identificazione degli impatti più significativi
2. valutazione della metodologia e dei risultati (completezza, sensibilità, consistenza)
3. controllo che le conclusioni siano congruenti con gli obiettivi e la portata dello studio

4. reiterazione del ciclo vita nel caso in cui i tre punti precedenti non siano soddisfatti.

Dopo aver identificato, qualificato, quantificato, controllato e valutato tutti i parametri emersi durante l'analisi dell'inventario e durante la valutazione degli impatti con questa fase si riduce il numero dei dati dalla tabella di inventario e degli impatti ambientali a pochi risultati significativi, in modo da facilitare il processo decisionale orientato ad obiettivi di eco-sostenibilità e di eco-efficienza.

2.2 La procedura LCA applicata ai processi e sistemi di gestione integrata dei rifiuti

La LCA, quindi, è una tecnica sviluppata originariamente al fine di valutare gli impatti ambientali dei prodotti e dei processi produttivi. Negli ultimi anni il metodo è stato sviluppato per essere applicato a tutte le attività umane che comportano delle interazioni con l'ambiente. La LCA si è venuta affermando negli ultimi anni come strumento di supporto nella pianificazione strategica di sistemi di gestione integrata dei rifiuti. Nei primi anni '90 l'applicazione della metodologia LCA ha permesso la comparazione di diverse opzioni tecnologiche, la valutazione di scenari differenti di gestione dei rifiuti e la valutazione specifica di opzioni di riciclaggio finalizzate all'individuazione di un tasso ottimale di riciclo.

La LCA applicata ai sistemi di gestione integrata dei rifiuti costituisce un campo relativamente nuovo di applicazione e presenta grandi potenzialità di sviluppo come supporto decisionale dei pianificatori e delle aziende che gestiscono i servizi di raccolta, trasporto e smaltimento/riciclaggio dei rifiuti.

Nel caso della gestione dei rifiuti gli input sono costituiti dagli scarti delle attività umane e produttive e gli output sono le emissioni finali nell'ambiente (solide, liquide e gassose) ed i nuovi prodotti utili (materiali riciclati, energia, compost).

La gestione dei rifiuti si presenta infatti come un sistema estremamente complesso la cui ottimizzazione presuppone la capacità di valutare l'insieme dei flussi di massa e di energia e i conseguenti impatti ambientali associati alle singole fasi che compongono la filiera del rifiuto: dal conferimento dei rifiuti ai cassonetti, alle operazioni di raccolta, di trasporto, il trattamento, il recupero, il riciclaggio sino allo smaltimento finale dei residui di processo.

La metodologia LCA consente di valutare questi aspetti fornendo indicazioni sugli impatti ambientali dell'intero sistema di gestione; permettendo allo stesso tempo di effettuare analisi di tipo comparativo per la valutazione di differenti scenari di gestione integrata mostrando gli impatti ambientali dei diversi scenari lungo tutte le fasi della filiera.

Capitolo 3

I principali Effetti Ambientali

Nel contesto della LCA con il termine “impatto” si intende un risultato fisico immediato di una data operazione consistente nell’emissione nell’ambiente circostante di determinate sostanze, ad un impatto possono essere associati uno o più effetti ambientali, dove per “effetto” si intende una modificazione peggiorativa dello stato dell’ambiente. La CO_2 emessa da un processo di combustione ad esempio è l’impatto che concorre potenzialmente ad incrementare l’effetto serra.

L’impatto precede temporalmente l’effetto, ma non è possibile quantificare il secondo sulla base del primo, ossia è possibile determinare la quantità di CO_2 emessa (impatto), ma non è possibile quantificare esattamente quanto concorre all’aumento dell’effetto serra (effetto), così come mostrato in figura 3.1

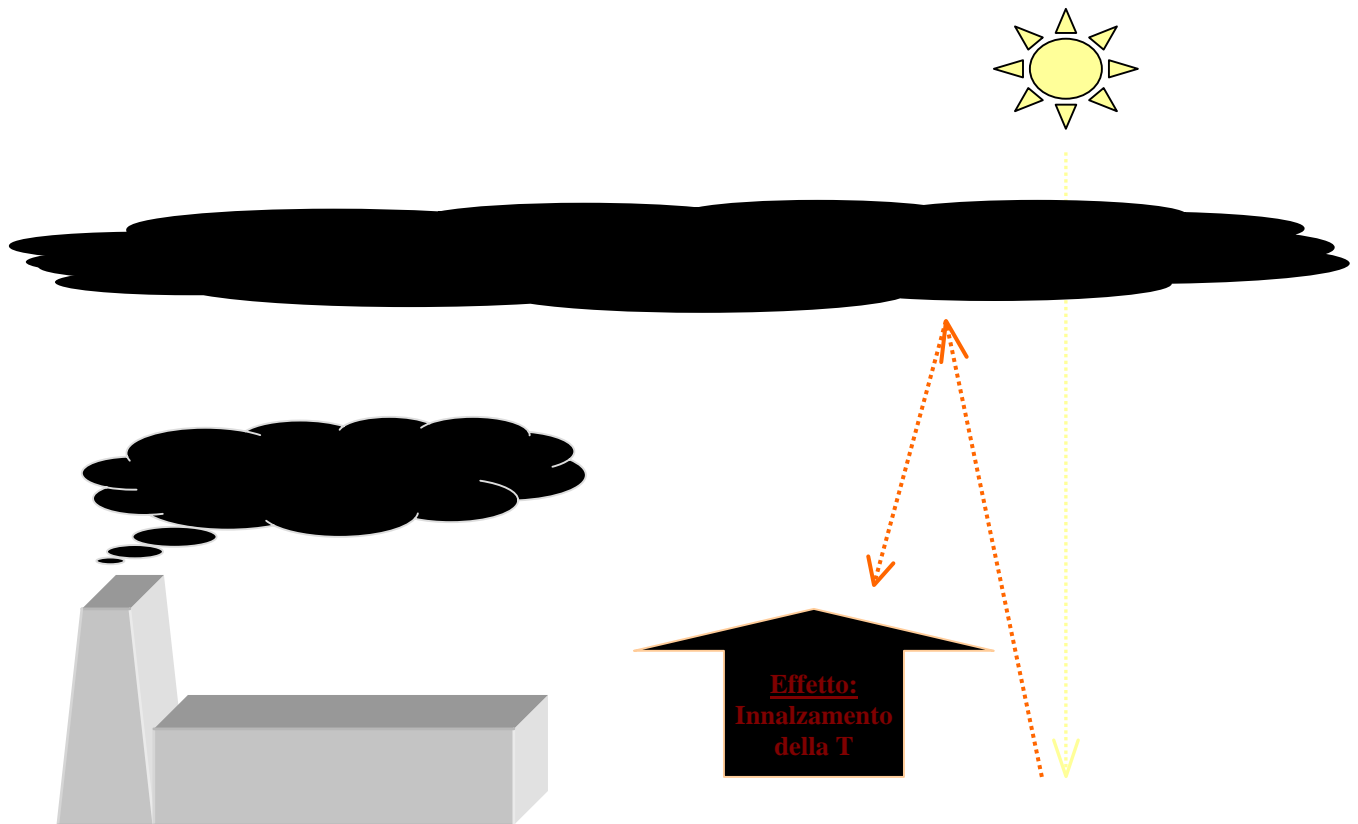


Figura 3.1 Differenza tra impatto ed effetto

Gli effetti è possibile classificarli in base alla scala di azione: globali, regionali o locali (fig.3.2), a seconda che possano avere un'influenza su tutto il pianeta (buco nella fascia di ozono), sulla regione di interesse (eutrofizzazione) o che abbiano una ricaduta nelle immediate vicinanze (rumore).

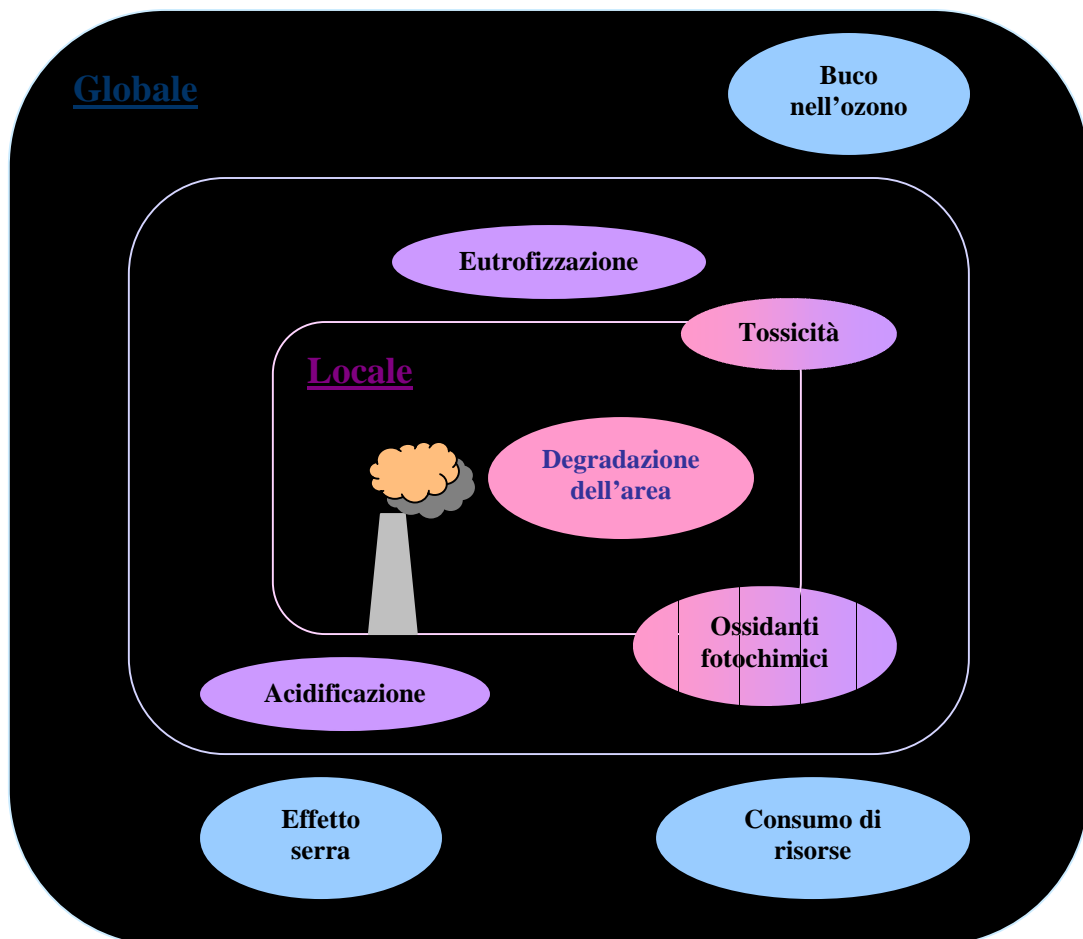


Figura 3.2 Scala di azione degli effetti ambientali

Le sostanze nocive emesse possono essere soggette a trasformazioni chimiche, fisiche o biologiche dando origine agli inquinanti secondari o di neoformazione, da qui si può capire come risulti ancora più difficile associare gli effetti ad un determinato impatto.

Gli effetti presi in considerazione da una LCA sono i seguenti:

- ✓ Effetto serra (global warming)
- ✓ Assottigliamento della fascia di ozono (stratospheric ozone depletion)
- ✓ Acidificazione (acidification)
- ✓ Eutrofizzazione (nutrient enrichment)
- ✓ Formazione di smog fotochimica (photosmog formation)
- ✓ Tossicità per l'uomo e per l'ambiente (human and eco-toxicity)
- ✓ Consumo di risorse non rinnovabili (energia e materiali) (resources depletion)

e sono caratterizzanti delle seguenti categorie di impatto:

- ✓ Ecologia: effetti su popolazioni ed ecosistemi (ecological effects)
- ✓ Salute: effetti su salute e sicurezza dell'uomo (human Health and safety effects)
- ✓ Risorse: esaurimento di risorse ed energia e di materiali (resources depletion)
- ✓ Riflessi sociali: impatto su tutte le attività umane che interagiscono con il sistema considerato e con il degrado del habitat (habitat degradation)

<i>Effetto</i>	<i>Scala</i>
Effetto serra	Globale
Assottigliamento della fascia di ozono	Globale
Consumo di risorse non rinnovabili	Globale
Acidificazione	Regionale
Eutrofizzazione	Regionale
Formazione di smog fotochimica	Regionale
Tossicità cronica	Regionale
Tossicità acuta	Locale
Degradazione dell'area	Locale
Disturbi di tipo fisico (rumore)	Locale

Tabella 3.1 I principali effetti ambientali e la loro scala d'azione

3.1 Effetto serra

L'effetto serra è causato dalla presenza nell'atmosfera di gas (CO_2 , vapore acqueo, CH_4 , N_2O e O_3) in grado di assorbire e riemettere energia radiante alle lunghezze d'onda dell'infrarosso (radiazione termica terrestre), mentre risultano trasparenti alla radiazione solare incidente di breve lunghezza d'onda. Ciò significa che questi gas lasciano pervenire sulla terra le radiazioni solari a onda corta, che ne riscaldano la superficie, ma non fanno passare le radiazioni a onda lunga riflesse dalla stessa, assorbendo così una parte del calore irradiato dalla terra e impedendogli di sfuggire nello spazio cosmico: si forma così a contatto con la superficie terrestre uno strato di aria calda. Nell'atmosfera sono stati sempre presenti dei gas serra naturali e la loro funzione è quella di permettere alla temperatura della superficie terrestre di rimanere entro valori compatibili con il mantenimento della vita sul pianeta e perfettamente bilanciate dalle reazioni di rimozione degli stessi (Fig 3.3).

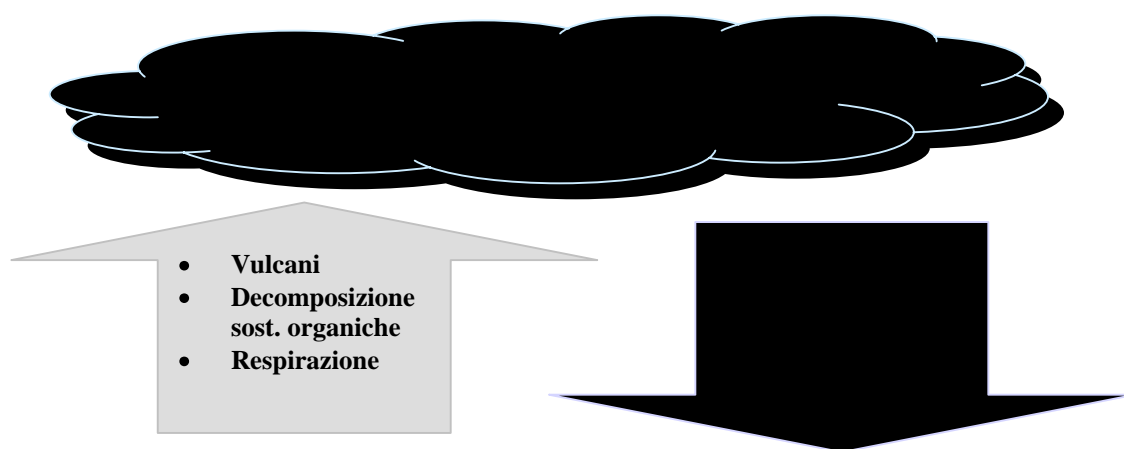


Figura 3.3 Reazioni naturali di produzione e rimozione della CO_2 .

La maggioranza dei climatologi oggi ritiene che vi sia una reale e significativa minaccia di riscaldamento del pianeta: il tasso di riscaldamento della terra, secondo gli scienziati dell'IPCC (Intergovernmental Panel Climate Change) consisterebbe in un aumento della temperatura intorno a $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ per decennio, dovuto ai gas serra di origine antropica (CO_2 , vapore acqueo, CH_4 , N_2O , O_3 , CFC e HCFCs) le quantità emesse e la velocità con cui cresce la loro concentrazione superano i limiti naturali di rimozione.

Il gas serra di origine antropica che genera le maggiori preoccupazioni è proprio l'anidride carbonica, che deriva principalmente dalla combustione di combustibili fossili e dalla distruzione della foresta pluviale dei tropici (80% della domanda mondiale di energia viene soddisfatta con combustibili fossili ed ogni anno viene bruciata una superficie di foresta tropicale pari a due terzi dell'Italia). Le misure di concentrazione di CO₂ effettuate a Mauna Loa (Hawaii) indicano un incremento pressoché lineare: queste sono le ragioni per cui l'anidride carbonica viene considerata la principale responsabile dell'effetto serra.

I quantitativi di gas serra oggetto dell'analisi vengono espressi in Kg di CO₂-equivalente attraverso un'operazione di standardizzazione basata sui potenziali di riscaldamento globale (GWP_s, Global Warming Potentials).

Questi potenziali, adottati dall'IPCC, sono calcolati per ciascuno gas serra tenendo conto della sua capacità di assorbimento delle radiazioni e del tempo della sua permanenza in atmosfera.

Il GWO di una sostanza che abbia le caratteristiche del gas serra è in pratica misurato dal rapporto tra il contributo che all'assorbimento della radiazione calda fornisce il rilascio istantaneo di 1 Kg di tale sostanza e quello fornito dall'emissione di 1 Kg di CO₂, essendo entrambi i contributi valutati per un periodo di tempo di T anni di permanenza del gas nell'atmosfera¹. Il GWP misura il potenziale contributo di una sostanza all'effetto serra, sulla base della concentrazione e del tempo di esposizione, rispetto a quello provocato da una stessa quantità di anidride carbonica.

I GWP vengono calcolati su diversi periodi di esposizione, "tempi orizzonte", pari a 100, 200 e 500 anni, in genere si fa riferimento ad un tempo orizzonte di 100, al crescere del tempo di integrazione crescono le incertezze della stima. Come si può osservare nella tabella AI-1 più l'orizzonte temporale è lontano e minore è l'impatto che alcune sostanze hanno in quanto nel tempo si immagina una loro reazione con altri componenti l'atmosfera che causa una degradazione e un minore effetto.

Il GPW, espresso in Kg di CO₂-equivalente, di una sostanza è dato dal prodotto tra il relativo fattore di caratterizzazione (Tab. 3.2) e la quantità, in Kg, emessa.

Il contributo totale dei diversi gas serra risulta pari a :

¹ Houghton J.T., Jenkins G.J., Ephraums (1991) – *Climate Change. The IPCC scientific assessment* – Cambridge University Press, Cambridge

$$GWP = \sum_i GWP_i * m_i$$

dove:

GWP_i è il potenziale di riscaldamento della sostanza *i-esima* e m_i è la massa della sostanza emessa in Kg.

Sostanza	Formula	Fattore di conversione	
		100 anni	500 anni
Anidride carbonica fossile	CO ₂	1	1
Monossido di carbonio	CO	2	2
Protossido di azoto	N ₂ O	320	180
Metano	CH ₄	25	8
Composti organici volatili non metanici	NM-COV	3	3

Tabella 3.2 Fattori di caratterizzazione delle diverse sostanze relativamente all'effetto serra

Si può notare come il protossido di azoto abbia un elevato effetto negativo rispetto ad alla CO₂, ma si deve anche aggiungere che tale composto è prodotto in quantità minime rispetto al biossido di carbonio. Anche il metano ha un potenziale 25 volte superiore a quello della CO₂, ma si deve sempre considerare che il metano è normalmente prodotto in piccole quantità.

Questa procedura è stata sviluppata da esperti del settore ed è ormai universalmente accettata. (Heijungs, 1992; Hauschild and Wenzel, 1998).

Nella tabella il fattore indicato per i composti organici volatili non metanici è un valore medio rappresentativo dei vari composti appartenenti a questa categoria di sostanze.

3.2 Assottigliamento dello strato di ozono stratosferico

La stratosfera (zona compresa tra i 15 ed i 50 Km al di sopra della superficie terrestre) è caratterizzata dalla presenza di uno strato di ozono (O_3) di fondamentale importanza perché scherma in maniera praticamente completa le radiazioni solari con lunghezza d'onda inferiori a 2900 Å e impediscono che i raggi ultravioletti, che sono una componente delle radiazioni solari raggiungano la superficie del nostro pianeta. Se le radiazioni UV raggiungessero la superficie terrestre, produrrebbero effetti nocivi sugli esseri viventi: carcinomi cutanei, danni al sistema immunitario, effetti nocivi su molti processi biologici che hanno luogo sulla biosfera. L'ozono si forma continuamente nella stratosfera in seguito dell'assorbimento radiazioni UV a bassa lunghezza d'onda e, contemporaneamente è distrutto in seguito a diverse reazioni chimiche che lo convertono in ossigeno molecolare.

I principali responsabili della rottura delle molecole di ozono sono i clorofluorocarburi (CFC), utilizzati come refrigeranti in impianti frigoriferi e condizionatori d'aria, come propellenti per bombolette, agenti schiumogeni e detergenti per componenti elettrici. Questi prodotti sono molto stabili e raggiungono inalterati la stratosfera dove liberano gli atomi di cloro, con l'incontro dei raggi UV, il cloro funziona da catalizzatore nella decomposizione dell'ozono stratosferico.

L'importanza del problema ha portato ad un controllo dell'uso delle sostanze che contribuiscono alla formazione del buco dell'ozono concordato a livello internazionale nel protocollo di Montreal (1987).

L'indicatore di categoria è il CFC11 ($CFC13$); i fattori di caratterizzazione si intendono in grammi di CFC11 equivalente per grammo della relativa sostanza (Tab. 3.3).

I diversi gas responsabili di questo effetto, si standardizzano sulla base degli ODP (Ozone Depletion Potentials). L'OD (Ozone Depletion) complessivo è ottenuto dalla somma dei singoli ODP_i moltiplicati per i quantitativi di sostanza i emessa (m_i):

$$OD = \sum_i ODP_i * m_i$$

Formula	Sostanza	Fattore di caratterizzazione
CFCl_3	CFC11	1
CF_2Cl_2	CFC12	0.82
$\text{CF}_2\text{ClCF}_2\text{Cl}$	CFC114	0.85
$\text{CF}_2\text{ClCFCl}_2$	CFC113	0.4
CCl_4	Tetraclorometano	1.2
CHF_2Cl	HCFC22	0.04
CFCl_2CH_3	HCFC141b	0.1
CF_2ClCH_3	HCFC142b	0.05
TCE	Triclorometano	0.12
CF_3Br	Halon 1301	12
CF_2ClBr	Halon 1211	5.1
CH_3Br	Bromometano	0.64

Tabella 3.3 Fattori di caratterizzazione relativamente all'assottigliamento dello strato di ozono

3.3 Acidificazione dell'aria

La causa fondamentale dell'acidificazione dell'aria è il progressivo aumento delle immissioni in atmosfera di sostanze che sono in grado di aumentare la concentrazione degli ioni idrogeno e quindi contribuire notevolmente alla acidificazione dell'aria. Tali sostanze, come l'anidride solforosa (SO_2), gli ossidi di azoto (NO_x) e di carbonio (CO_x) ed altre sostanze come l'acidi fluoridrico, fosforico, tipici di inquinamenti di origine industriale, possono dare luogo a diversi tipi di fenomeni come: **la deposizione secca**, il pulviscolo acido sedimentando al suolo modifica il pH del terreno ed agisce direttamente ed indirettamente sull'assorbimento radicale e sulla flora microbica ambientale, il fenomeno delle **piogge acide** che danneggia la vegetazione boschiva, gli edifici, i monumenti e acidificano le acque dolci, interferendo così con gli ecosistemi naturali, ed infine la **deposizione umida**, ovvero quella provocata dalle cosiddette precipitazioni occulte: nebbia, brina, rugiada, neve, responsabili di una deposizione acida per via umida che non viene rilevata dai comuni misuratori pluviometrici, si tratta di un fenomeno importante in quanto le goccioline di acqua della nebbia contengono concentrazioni di ioni idrogeno sensibilmente più elevate delle grosse gocce di pioggia sia per fenomeni di assorbimento e generazione diretta sia per il relativo minore quantitativo d'acqua che rende più elevato il rapporto contaminante/acqua.

Il numero di sostanze che possono essere considerate con potenziale impatto acidificante, non sono molte e presentano tutte potenziali di impatto che rientrano all'interno dello stesso ordine di grandezza. Nonostante il breve tempo di vita di tali sostanze in atmosfera, la velocità di spostamento delle grandi masse d'aria contenenti tali sostanze, estende l'area di potenziale impatto ad alcune centinaia di chilometri dalle sorgenti di emissione. La recente tendenza a costruire ciminiere sempre più elevate per eliminare problemi di inquinamento locale, ossia per ridurre le concentrazioni al suolo degli inquinanti in modo da rientrare negli standard di qualità dell'aria, ha avuto come conseguenza di trasformare problemi locali in problemi regionali o a scala più grande. L'emissione di gas nell'atmosfera a quote più elevate ne favorisce il trasporto a distanze maggiori.

Il calcolo per quantificare l'effetto è sempre lo stesso:

$$AP = \sum_i Ap_i * m_i$$

Il metodo usato in questo modello per esprimere il livello di acidificazione basa la determinazione del potenziale di acidificazione per una determinata sostanza sulla valutazione del numero di moli di idrogeno che possono teoricamente essere rilasciati nel corpo recettore da una mole di sostanza in questione. Il *potenziale di acidificazione* (AP) o *fattore di equivalenza* (ac) viene espresso come emissione equivalente di una sostanza di riferimento. La sostanza di riferimento è l'anidride solforosa, SO₂, e viene calcolato nel modo seguente:

$$EF_i(ac) = \frac{n}{2M_i} * 64.06 = \frac{n}{M_i} * 32.03$$

dove:

EF_i è l'acronimo di equivalent factor riferito alla sostanza i

ac indica che il fattore di equivalenze è relativo all'acidification

n è il numero di ioni idrogeno rilasciato nel corpo recettore come risultato della conversione della sostanza

2 è il numero di ioni idrogeno rilasciati dalla conversione dell' SO₂ in H₂SO₄

M_i è il peso molecolare della sostanza emessa (g/mole)

64.06 g/mole è il peso molecolare dell' SO₂

Formula	Sostanza	Fattore di caratterizzazione
SO ₂	Anidride solforosa	1
SO ₃	Anidride solforica	0.80
NO ₂	Biossido di azoto	0.70
NO	Monossido di azoto	1.07
NO _x	Ossidi di azoto	0.70
HCl	Acido cloridrico	0.88
H ₂ SO ₃	Acido solforico	0.65
HF	Acido fluoridrico	1.60
H ₂ S	Acido solfidrico	1.88
NH ₃	Ammoniaca	1.88

Tabella 3.4 Fattori di caratterizzazione relativamente al fenomeno di acidificazione dell'aria

3.4 Eutrofizzazione

L'eutrofizzazione è un fenomeno dovuto all'eccessivo arricchimento delle acque di nutrienti in particolare fosforo e azoto. Si manifesta inizialmente con un'abnorme proliferazione delle vegetazione sommersa (macrofite) e/o delle alghe microscopiche (microplankton) successivamente queste si decompongono determinando un'eccessiva riduzione dell'ossigeno disciolto nell'acqua con conseguenze instaurarsi di un ambiente anaerobico che altera se non impedisce lo svolgersi della vita della flora e della fauna acquatica.

L'eutrofizzazione può avere origine naturale o antropica, nel secondo caso le cause principali sono da imputare all'uso di fertilizzanti, detersivi contenenti polifosfati, scarichi industriali, etc.

Contribuiscono all'eutrofizzazione anche le emissioni in aria di ossidi di azoto e di ammoniaca responsabili allo stesso tempo dell'acidificazione dell'aria e dello smog fotochimico.

L'indicatore di categoria è lo ione nitrato (NO_3^-); i fattori di caratterizzazione si intendono in grammi di NO_3^- equivalente per grammo della relativa sostanza

Formula	Sostanza	Fattore di Caratterizzazione
NO_3^-	Ione nitrico	1
N_2O	Monossido d'azoto	2.82
NO_x	Ossidi di azoto	2.07
NH_3	Ammoniaca	3.64
CN^-	Ione cianuro	2.38
Azoto totale		4.43
PO_4^{---}	Ione fosforoso	10.45
$\text{P}_2\text{O}_7^{--}$	Ione fosforico	11.41

Tabella 3.5 Fattori di caratterizzazione relativi all'eutrofizzazione

3.5 Smog fotochimico

L'inquinamento fotochimico dell'aria è prodotto dalle reazioni termiche e di fotossidazione (provocate dalla luce solare) degli inquinanti primari emessi nell'atmosfera dai processi di combustione da sorgenti mobili e/o da impianti fissi in particolari condizioni geografiche e meteorologiche. Le reazioni che portano alla formazione degli ossidanti fotochimici sono dovute alla presenza contemporanea nell'atmosfera di ossidi di azoto e di idrocarburi reattivi e alla concomitanza di un'intensa radiazione solare e di elevate temperature, la reazione che avviene è una reazione di ossidazione, la quale si manifesta sotto l'influenza della luce solare. In questa reazione gli ossidi di azoto non vengono degradati, ma presentano una funzione di tipo catalitico.

Nelle atmosfere fredde tende invece a formarsi lo smog riducente o invernale, nel quale sono presenti anidride solforosa, composti parzialmente combusti e particolato carbonioso.

Poiché l'emissione contemporanea di ossidi di azoto e di idrocarburi è dovuta principalmente alla motorizzazione, lo smog fotochimico è una tipica forma di inquinamento delle aree urbane. Sono frequenti casi di inquinamento fotochimico in aree rurali dovuto al trasporto dei venti.

Nelle zone altamente inquinate, alcuni dei prodotti risultanti dall'ossidazione dei composti gassosi sono poco volatili e quindi, anche se si formano allo stato gassoso, la loro concentrazione raggiunge rapidamente il punto di saturazione. Condensando danno origine ad un aerosol detto appunto "smog fotochimico".

I principali effetti si evidenziano a carico dell'apparato respiratorio con stati infiammatori ed alterazioni della permeabilità sia degli epitelii di rivestimento che degli endoteli vascolari e acutizzazione degli stati allergici. L'insieme degli effetti porta ad una riduzione della funzione polmonare, comparsa di iperattività bronchiale fino alla possibile insorgenza di edema polmonare.

La tabella sottostante riassume brevemente i principali effetti per tipologia di sostanza:

Inquinante	Effetti
Ossidi di azoto	<ul style="list-style-type: none"> • Diminuzione della visibilità • Problemi cardiaci e respiratori • Crescita delle piante compromessa • Resistenza alle infezioni ridotta • Favoriscono l'insorgenza dei tumori
COV (Composti Organici Volatili)	<ul style="list-style-type: none"> • Irritazione agli occhi • Irritazione dell'apparato respiratorio • Alcuni COV sono cancerogeni • Diminuzione della visibilità
Ozono	<ul style="list-style-type: none"> • Costrizione bronchiale • Tosse e difficoltà respiratoria • Irritazione dell'apparato respiratorio • Crescita ritardata delle piante • Danni ai prodotti in plastica • Odore acre
PAN (Perossi Acetil Nitrati)	<ul style="list-style-type: none"> • Irritazione agli occhi • Tossicità elevata per le piante • Danni alle proteine • Irritazione dell'apparato respiratorio

Tabella 3.6 Principali effetti dello smog fotochimico

I contributi alla formazione di ozono fotochimico, derivanti dalle singole sostanze, sono misurati con i parametri POCP (Photochemical Ozone Creation Potential) che permettono di comparare la capacità di formazione di ossidanti di sostanze emesse in aria, con il potenziale dell'etilene (C_2H_4).

A differenza di altre sostanze che contribuiscono alla categoria d'impatto in esame, il contributo degli NO_x non può essere calcolato in quanto il sistema di fattori di equivalenza utilizzato per il calcolo del POCP non rende possibile il calcolo di un fattore di equivalenza per gli NO_x . L'importanza degli NO_x evidenziata dal fatto che vengono utilizzati due set di fattori di equivalenza, uno per le emissioni in aree con alte concentrazioni di fondo di NO_x e l'altro con più basse concentrazioni. Il confine tra i due livelli è una concentrazione media annuale di $0,002 \text{ mg/m}^3$.

L'indicatore di categoria, come detto, è l'etilene (C_2H_4), i fattori di caratterizzazione si intendono in grammi di C_2H_4 equivalente per grammo della relativa sostanza.

L'effetto di una sostanza viene espresso come:

$$EP(po)_i = Q * EF(po)$$

Le singole emissioni vengono sommate dopo essere state convertite in kg equivalenti di etilene.

Sostanza	Fattore di caratterizzazione
Metano	3,00E-02
Etano	3,00E-01
Propano	1,20E+00
Butano	1,20E+00
Eptano	1,70E+00
Alcani	1,20E+00
Metanolo	2,10E-01
Acetone	2,70E-01
Butene	1,20E+00
Benzene	4,50E-01
Toluene	8,30E-01
Etilbenzene	1,10E+00
Formaldeide	5,80E-01
Acetaldeide	1,20E+00
Aldeidi	1,30E+00
VOC	8,08E-01

Tabella 3.7 Fattori di caratterizzazione relativi allo smog fotochimico

3.6 Tossicità

La tossicità è una qualità intrinseca di una sostanza chimica di produrre effetti dannosi, il termine include la capacità di indurre effetti teratogeni, mutageni e cancerogeni.

Attualmente sono disponibili numerosi modelli per il calcolo della tossicità potenziale; tra tutti quelli che sono stati proposti fino ad oggi, il modello USES-LCA all'interno del progetto "Life Environmental Policy" curato dal centro delle scienze ambientali dell'università di Leiden (CML).

Il modello calcola i potenziali di tossicità umana (HTP=Human Toxicity Potential):

$$I_h = \sum_{i=1} \sum_{x=1} HTP_{x,i} * E_{x,i}$$

dove:

I_h : punteggio finale per la tossicità umana relativi ad 1 gr della sostanza di riferimento

$E_{x,i}$ è l'emissione della sostanza x nel comparto ambientale i

$HTP_{x,i}$ è la tossicità umana potenziale della sostanza x nel comparti ambientale i

n è il numero di sostanze che vengono conteggiate nell'inventario per quella categoria d'impatto

m è il numero di comparti ambientali in cui si ridistribuisce la sostanza x

i=m e x=n

Simbolo/ Formula	Sostanza	Fattore di equivalenza
Aria		
Sb	Antimonio	6,20E+03
As	Arsenico	3,70E+05
Ba	Bario	7,10E+02
Cd	Cadmio	1,60E+05
Co	Cobalto	1,90E+04
Cu	Rame	4,70E+03
Pb	Piombo	3,60E+02
Hg	Mercurio	1,20E+03
Mo	Molibdeno	4,90E+03

Ni	Nichel	3,80E+04
Se	Selenio	4,30E+04
Sn		1,20E+00
V	Vanadio	6,00E+03
Zn	Zinco	1,10E+02
NH ₃	Ammoniaca	1,00E+00
H ₂ S	Solfuro di idrogeno	7,70E-01
HCl	Cloruro di idrogeno	2,40E+00
C ₂ H ₄	Etilene	6,90E-01
CH ₂ O	Formaldeide	9,10E-01
C ₆ H ₆	Benzene	2,00E+03
C ₆ H ₅ CH ₃	Toluene	3,60E-01
C ₆ H ₅ OH	Fenoli	5,70E-01
CHCl ₃	Cloroformio	1,20E+01
1,2CH ₂ ClCH ₂ Cl	Dicloroetano	7,00E+00
Acqua		
Sb	Antimonio	8,80E+02
As	Arsenico	5,70E+02
Ba	Bario	2,30E+02
Cd	Cadmio	2,10E+02
Co	Cobalto	9,90E+01
Cu	Rame	1,30E+00
Pb	Piombo	1,20E+00
Hg	Mercurio	2,50E+02
Mo	Molibdeno	5,00E+03
Ni	Nichel	3,10E+02
Se	Selenio	5,10E+04
Sn		1,70E-02
V	Vanadio	2,90E+03
Zn	Zinco	5,70E-01
CH ₂ O	Formaldeide	4,00E-02
C ₆ H ₆	Benzene	1,90E+03
C ₆ H ₅ CH ₃	Toluene	3,30E-01
C ₆ H ₅ OH	Fenoli	5,40E-02
Suolo		
As	Arsenico	4,90E+02
Ba	Bario	9,00E+01
Cd	Cadmio	6,10E+01
Co	Cobalto	3,20E+00
Cu	Rame	1,80E+02

Pb	Piombo	2,00E+02
Hg	Mercurio	2,80E+03
Mo	Molibdeno	1,60E+02
Ni	Nichel	2,50E+04
Se	Selenio	1,00E+05
Sn		3,20E+01
V	Vanadio	1,60E+03
Zn	Zinco	3,50E-01
C ₆ H ₅ Cl	Clorobenzene	7,10E+00

Tabella 3.8 Fattori di equivalenza relativi alla tossicità di diverse sostanze

3.7 Impoverimento delle risorse non rinnovabili

Resource depletion può essere definito come il decremento delle disponibilità di risorse naturali. Le risorse non rinnovabili includono sia le risorse che non sono rigenerabili, sia quelle, il cui tasso di rigenerazione è così basso da non incidere in maniera significativa praticamente sulla disponibilità della risorsa stessa. Le risorse fossili come il petrolio, il carbone, il gas naturale, e tutti i metalli, sono esempi di risorse non rinnovabili. Sono escluse le risorse biotiche e gli impatti associati al loro consumo, come l'estinzione della specie e la perdita di biodiversità.

Il metodo usato in questo studio per esprimere la riduzione delle risorse non rinnovabili associata al ciclo vita del processo di incenerimento considerato, è il metodo CML (Heijngs, 1992); il consumo di risorse non rinnovabili viene espresso in termini di frazione delle riserve conosciute, adottando un opportuno fattore di peso:

$$F_i = \frac{1}{R_i}$$

dove:

R_i espresso in Kg indica la riserva ancora disponibile riferita alla risorsa in questione.

Il valore complessivo dell'indice R (riduzione delle risorse non rinnovabili), che qualifica l'impatto complessivo sulla categoria in questione viene pertanto calcolato nel modo seguente:

$$R = \sum_i F_i * m_i$$

dove:

F_i è il fattore di peso della i -esima risorsa consumata

m_i è la massa in Kg di risorsa consumata.

Nella tabella seguente sono riportati valori di R_i ed i corrispondenti F_i relativi ai consumi di risorse presenti in inventario.

Sostanza	R_i	F_i : frac of reserve
Oil (in ground)	2,40E+14	4,17E-15
Natural gas	1,30E+14	7,69E-15
Uranium (ore)	1,30E+10	7,69E-15
Copper (ore)	6,10E+11	1,64E-12
Lead (ore)	1,20E+11	8,33E-12
Nichel	1,10E+11	9,09E-12
Zinco	3,30E+11	3,03E-12
Bauxite	2,80E+13	3,57E-14
Iron	1,00E+14	1,00E-14
Manganese	5,00E+12	2,00E-13
Silver	4,20E+08	2,38E-09
Coal (in ground)	3,00E+15	3,33E-16

Tabella 3.9 Fattori utilizzabili nel calcolo per la determinazione del consumo di risorse non rinnovabili.

Capitolo 4

Gestione integrata dei rifiuti (GIR): definizioni ed analisi dei costi e degli impatti ambientali

Per gestione dei rifiuti si intende l'insieme di tutte operazioni che vanno dalla raccolta allo smaltimento finale. Quando si parla ottimizzazione del sistema di gestione integrata si intende non solo un miglioramento delle singole prestazioni ambientali dei singoli processi connessi al ciclo dei rifiuti, ma anche un miglioramento complessivo del sistema di gestione stesso.

Come già detto il sistema di gestione dei rifiuti urbani è individuato da diversi processi e dalle loro interrelazioni (Fig 4.2) che riguardano la raccolta, la separazione, il trattamento e lo smaltimento finale.

I processi, gli impianti, le attività e le operazioni associati alla gestione dei RU sono molteplici, il seguente elenco non è esaustivo, ma vuole essere indicativo dei processi maggiormente applicati ed analizzati in questo capitolo:

- Raccolta
- Trasporto
- Piattaforme di recupero
- Stazioni di trasferimento
- Impianti di selezione
- Impianti di produzione e raffinazione di CDR
- Impianti di compostaggio e stabilizzazione aerobica
- Termotrattamento con/senza valorizzazione energetica
- Digestione anaerobica
- Smaltimento finale in discarica

Ognuna di questi presenta degli impatti ambientali e dei costi molto diversi tra loro dovuti alle diverse tecnologie applicate, alla tipologia di impianto più o meno complessa, come già ricordato in precedenza non esiste un sistema di trattamento migliore in assoluto, ma esiste un sistema di gestione migliore in assoluto che deve tener conto della minimizzazione dei costi e degli impatti ambientali relativamente alla situazione impiantistica, geografica, ambientale e morfologica del sito in esame.

La prevenzione nella produzione dei rifiuti dovrebbe essere il primo dei “trattamenti” facenti parte del sistema di gestione integrata dei rifiuti.

Nel panorama europeo, sebbene con notevoli differenze tra i paesi settentrionali e quelli mediterranei la maggior parte dei rifiuti viene smaltita in discarica, in quanto rappresenta l'opzione meno costosa per il trattamento dei rifiuti. Le politiche ambientali volte a promuovere i processi di valorizzazione dei rifiuti hanno favorito in ambito europeo un aumento del compostaggio, del riciclaggio e del recupero energetico, anche in Italia si sta assistendo ad un progressivo mutamento del quadro impiantistico, dall'entrata in vigore del Decreto Ronchi (Tab. 4.1) comunque siamo ancora lontani dalla media europea.

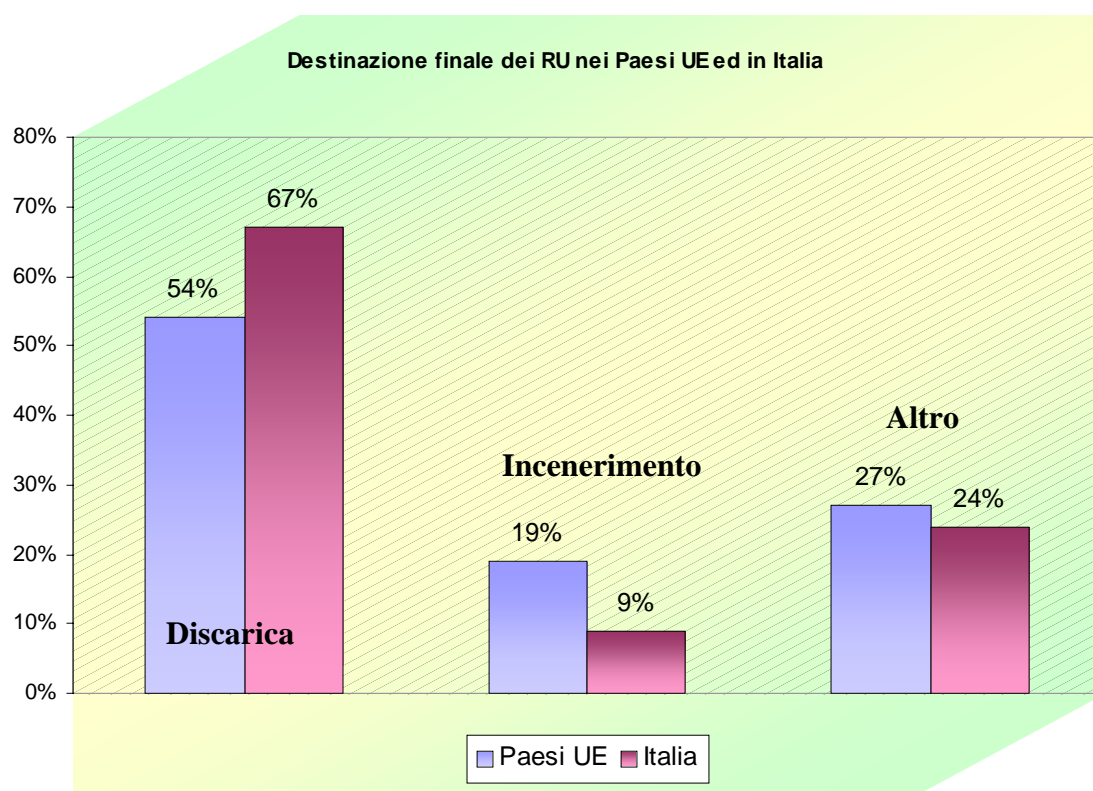
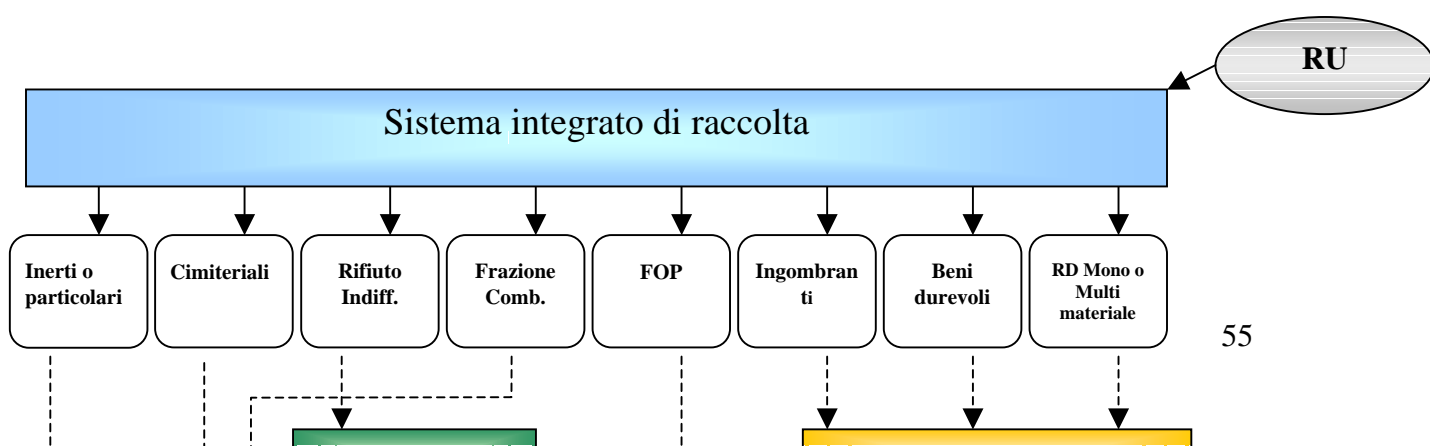


Figura 4.1



E' importante conoscere il grado di complessità tecnologica ed analizzare dal punto di vista ambientale ed economico tutte le attività legate al sistema di gestione dei rifiuti, per

arrivare al sistema di gestione integrata ottimale, ma anche per ottimizzare la singola attività.

L'analisi delle singole attività sarà condotta nel modo seguente: dopo una breve⁴ descrizione dell'attività esaminata, che permette di stabilire se si tratta di un'attività a tecnologia semplice o complessa, di individuare gli input, gli output e il campo di applicazione, si conduce l'analisi dei costi, andando a determinare le equazioni che definiscono i costi capitale ed i costi di gestione e manutenzione infine viene condotta l'analisi degli impatti ambientali considerando che ogni attività presenta degli impatti differenti che dipendono dalla natura stessa dell'attività in questione. In questa analisi si è voluto tener conto della produzione di inquinanti aerei, di inquinanti dispersi nel mezzo acquoso, di rifiuti solidi e dei consumi energetici (Fig. 4.3).

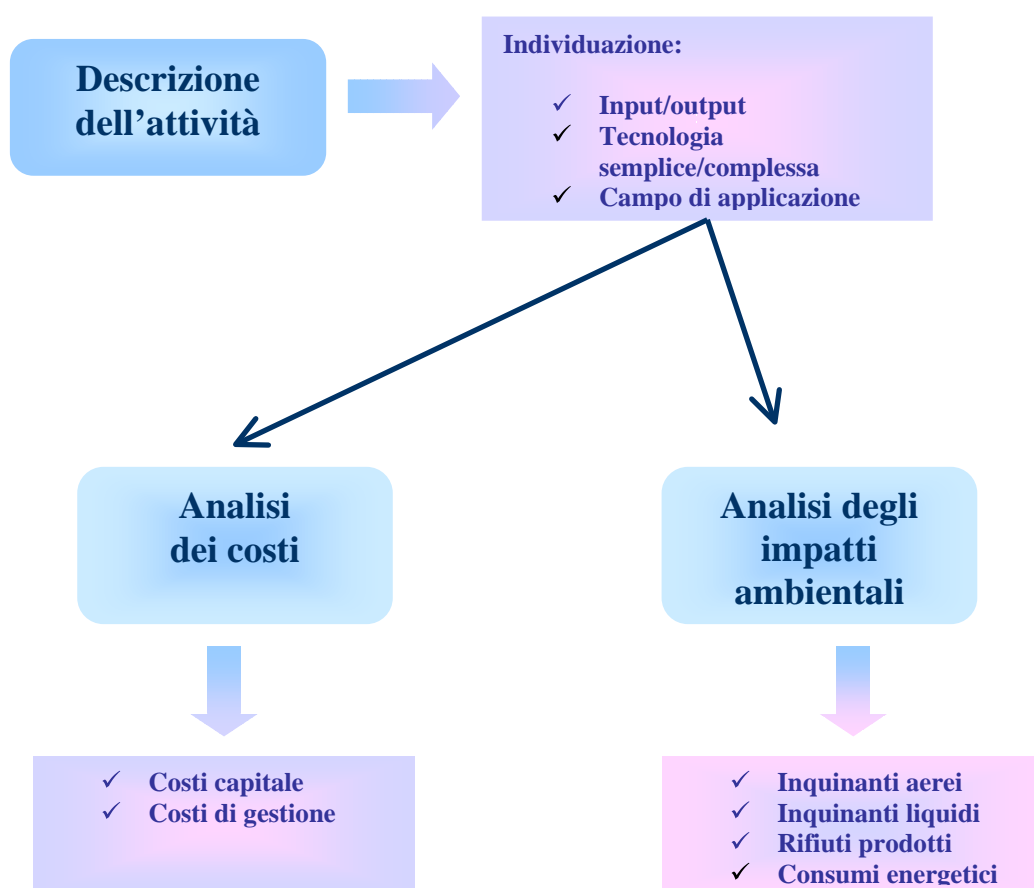


Figura 4.3 Schema operativo seguito per l'analisi delle singole attività

⁴ L'utente interessato potrà trovare trattazioni più o meno approfondite dei diversi processi applicati alla gestione dei rifiuti.

Le equazioni, frutto di questa analisi possono essere utilizzate agevolmente dal utente qualora voglia condurre un'analisi dei costi e degli impatti ambientali relativamente anche ad un solo processo o attività facente parte del sistema di gestione dei RU.

Ovviamente non sono state determinate le equazioni per ogni singolo caso possibile relativo ad ognuna delle molteplici attività applicabili alla gestione dei rifiuti, ma a questo livello di studio sono state determinate solo le equazioni relative ad un caso per ogni attività, ciò che è importante è la definizione di una metodologia comune applicabile poi ad ogni singolo caso, l'utente interessato infatti sarà in grado da solo di arrivare a definire le equazioni caratteristiche applicabili al suo caso specifico.

In genere durante un analisi LCA vengono presi in considerazione due tipi di emissioni ambientali: le emissioni dirette che sono prodotte durante le normali attività del sistema in esame e quelle indirette che sono quelle associate con la produzione ed il trasporto dei materiali necessari alla costruzione ed al funzionamento dell'impianto. Le emissioni indirette includono le emissioni che si hanno durante la produzione del carburante utilizzato o durante la generazione dell'energia elettrica necessaria.

Le equazioni fanno riferimento a dei valori medi di emissioni ricavabili dalla letteratura scientifica.

Allo stato attuale l'analisi dei costi e degli impatti ambientali ancora non è stata completata sulle seguenti operazioni: trattamenti anaerobici, selezione e discarica.

4.1 Raccolta

Per raccolta si intende l'insieme delle operazioni di raccolta e trasporto che vanno dal ritiro del rifiuto dal singolo punto di prelievo sino al conferimento ad un impianto a tecnologia più o meno complessa per lo smaltimento dei rifiuti.

Tutte le operazioni che permettono il trasferimento del RU da un impianto all'altro verranno analizzate nel paragrafo relativo al trasporto, mentre non saranno prese in considerazione le operazioni relative allo spazzamento e pulitoria delle strade.

Esistono numerose opzioni per effettuare il servizio integrato di raccolta dei RU che dipendono da numerosi parametri (Fig. 4.4), le diverse scelte determinano una diversa incidenza dei costi e degli impatti ambientali (Fig. 4.5).

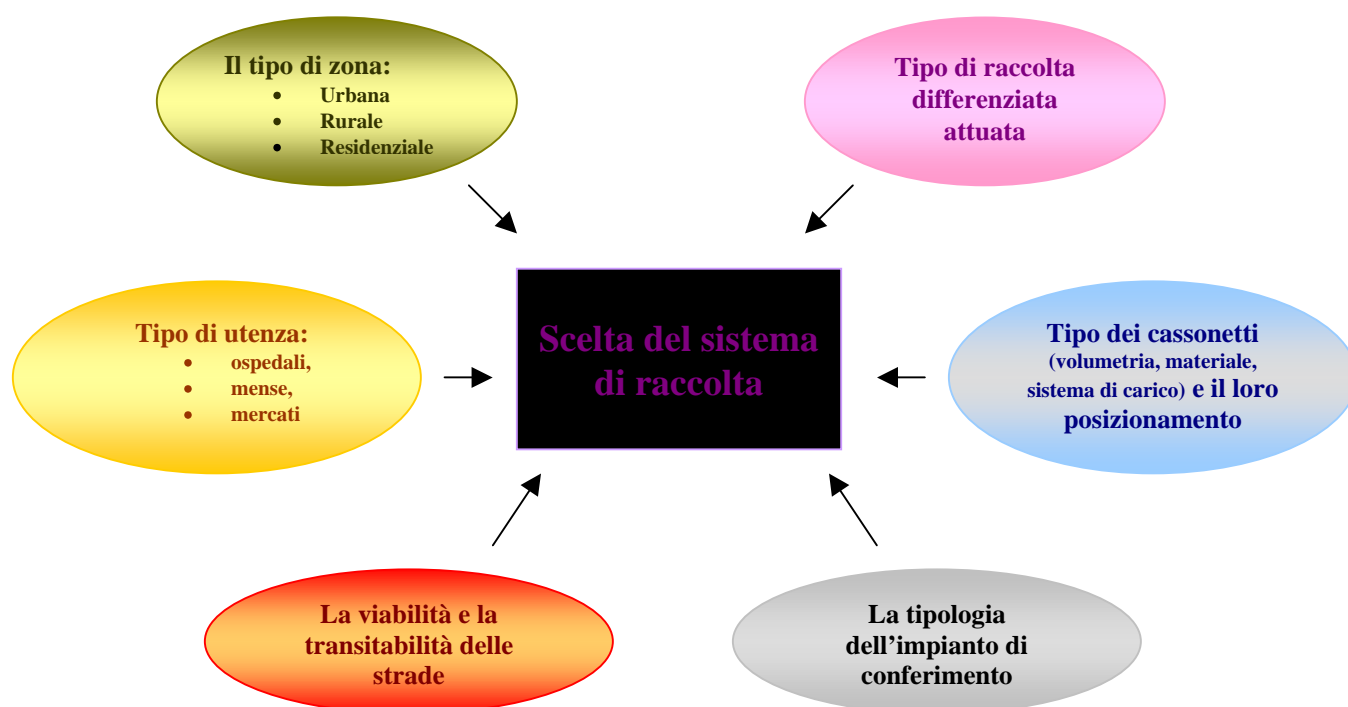


Figura 4.4 Parametri decisionali per la definizione di un servizio di raccolta

Figura 4.5 Incidenze economico-ambientali relative ad un sistema integrato di raccolta.

Scelto il sistema integrato di raccolta ottimale, è possibile definire l'area in esame (Fig. 4.6) e procedere al dimensionamento determinando:

- il **numero e la tipologia di cassonetti**, in base alla volumetria degli stessi, al materiale scelto, alla tipologia di raccolta differenziata attuata, alla quantità di rifiuti prodotti ed alle caratteristiche di viabilità dell'area da servire;
- il loro **posizionamento** determinato sulla base della densità abitativa, ma considerando anche che ogni utente non deve percorrere più di 100 - 150 m per arrivare a conferire il rifiuto nel cassonetto;
- il **numero ed il tipo degli automezzi** necessari ed il loro giro di raccolta;
- il **numero di attrezzature accessorie**: macchine lavacassonetto, spazzatrici stradali, veicoli satellite;
- il **personale necessario**.



Figura 4.6 L'area da servire viene suddivisa in *aree di raccolta*, omogenee per densità, tipologia del rifiuto, all'interno di queste, vengono individuate, delle *zone di raccolta* servite da un solo automezzo, il quale individua in un solo giro di raccolta dei *moduli di raccolta*, i *punti di prelievo* sono le posizioni in cui si trovano uno o più contenitori.

Si possono ipotizzare differenti scenari dove effettuare il servizio di raccolta dei rifiuti urbani, i quali influenzano le scelte progettuali riguardanti il tipo, il numero, il percorso degli automezzi adibiti al servizio di raccolta.

La letteratura scientifica riporta numerose equazioni, che variano al variare delle condizioni iniziali, per determinare il numero degli automezzi, il numero di giri necessari, il percorso ottimale, determinati tutti questi parametri è possibile effettuare l'analisi dei costi e degli impatti ambientali relativi al servizio di raccolta.

Fra i diversi scenari possibili, l'analisi è stata condotta considerando il servizio di raccolta del rifiuto indifferenziato da zone ad alta densità abitativa.

In questo esempio si suppone che la raccolta, in area ad alta densità abitativa, venga effettuata disponendo nei punti di raccolta determinati, il numero di contenitori necessari. I veicoli adibiti alla raccolta, escono dalla rimessa e dopo aver caricato l'eventuale squadra di raccolta iniziano il loro giro di raccolta raccogliendo i rifiuti sino a raggiungere la loro capacità massima a questo punto raggiungono la stazione di trasferimento svuotano il carico ed iniziano un nuovo giro. Finito il turno di lavoro riportano l'automezzo nella rimessa.

Sono state scelte le seguenti equazioni relative a questo scenario:

Produzione settimanale di rifiuti per punto di prelievo:

$$G_{mf} = \frac{GR * mf_{pop} * 7 \text{ day/week}}{H_{mf}}$$

Dove:

G_{mf} : produzione settimanale di rifiuti per punto di prelievo [kg/punto di prelievo a settimana]

GR : produzione media di rifiuti per abitante/giorno [kg/persona al giorno]

mf_{pop} : numero di residenti [n. persone]

H_{mf} : numero dei punti di prelievo [n. punti di prelievo]

Numero dei punti di prelievo che un automezzo può visitare durante un giro di raccolta sino al raggiungimento della sua capacità massima:

$$H_t = \frac{U_t * V_t * Fr}{(G_{mf} / D_{msw})}$$

Dove:

H_t : numero di punti di prelievo per viaggio di raccolta [punti di prelievo visitati/giro di raccolta]

U_t : fattore di utilizzazione del veicolo (rappresenta la capacità effettivamente utilizzata rispetto a quella massima) [m^3 utilizzabili/capacità massima del vicolo in m^3]

V_t : capacità del veicolo [m^3 /viaggio]

D_{msw} : densità media del rifiuto [kg/m^3]

Fr : Frequenza di raccolta (cicli di raccolta a settimana) [giri di raccolta/settimana]

G_{mf} : produzione settimanale per punto di prelievo [kg/settimana per punto di prelievo]

Tempo impiegato da un automezzo per completare un giro di raccolta:

$$T_c = [T_{btw} * (H_t - 1)] + [TL * H_t] + (2 * T_f) + S$$

Dove:

T_c : tempo impiegato per giro di raccolta [minuti per giro]

T_{btw} : tempo di viaggio tra due punti di prelievo [minuti]

TL : tempo necessario per effettuare lo svuotamento del contenitore [minuti]

T_f : tempo impiegato per percorrere la distanza tra l'inizio/fine del giro di raccolta e la stazione di trasferimento [minuti]

S : tempo impiegato per scaricare l'automezzo alla stazione di trasferimento [minuti]

Numero di giri di raccolta che un automezzo può effettuare durante una giornata di lavoro

$$RD = \frac{(WV * 60) + (F1 + F2 + T_{gr} + T_{gf}) + [0.5 + (T_{fr} + S)]}{T_c}$$

Dove:

RD : Giri di raccolta al giorno per automezzo [viaggi/giorno/veicolo]

WV : ore di lavoro al giorno [ore/giorno/veicolo]

$F1$: pausa pranzo [minuti/giorno/veicolo]

$F2$: break time [minuti/giorno/veicolo]

T_{gr} : tempo trascorso tra la rimessa e l'inizio del giro di raccolta [minuti]

T_{gf} : Tempo necessario tra la rimessa e la stazione di trasferimento [minuti]

Numero di automezzi necessari adibiti alla raccolta

$$RT = \frac{H - mf}{H_t}$$

Dove:

RT : numero di giri di raccolta [viaggi]

H_t : numero di punti di prelievo per viaggio di raccolta [punti di prelievo/viaggio]

H_{mf} : numero dei punti di prelievo [punti di prelievo]

Numero di automezzi necessari per visitare tutti i punti di prelievo durante un ciclo di raccolta

$$N_t = \frac{RT}{RD} * \frac{Fr}{CD}$$

Dove:

N_t : numero di automezzi [automezzi]

CD : numero di giorni lavorativi a settimana [giorni/settimana]

RT : numero di giri di raccolta [viaggi]

RD : giri di raccolta al giorno per automezzo [viaggi/giorno/automezzo]

Fr : frequenza di raccolta [cicli di raccolta/settimana]

A questo punto sono stati determinati tutti i parametri necessari per condurre l'analisi dei costi e degli impatti ambientali.

4.1.1 Analisi dei costi

L'analisi dei costi è stata condotta suddividendo i costi in costi capitale e costi di gestione e manutenzione. Nei costi capitale sono stati inseriti i costi relativi agli automezzi destinati alla raccolta, agli automezzi accessori (veicoli satellite, macchine lavacassonetto, spazzatrici stradali, contenitori, etc) e le rate amministrative che includono i costi relativi all'acquisto della rimessa degli automezzi e di eventuali mezzi necessari alla manutenzione. I costi capitale vengono espressi in termini annuali usando un tasso di ammortamento che tiene conto del tasso di sconto e della vita stimata degli automezzi sia di quelli adibiti alla raccolta che di quelli accessori, della rimessa e degli eventuali mezzi acquistati per la manutenzione.

I costi di gestione e manutenzione includono i costi relativi al lavoro, alle tasse, alle spese di amministrazione, alle assicurazioni, i costi indiretti, i costi del carburante, i consumi elettrici e la manutenzione.

Sono stati considerati inoltre i seguenti costi unitari utili, ad esempio, per poter effettuare il confronto tra differenti scenari:

- Costo annuo del servizio di raccolta
- Costo annuo degli automezzi adibiti alla raccolta

- Costo annuo dei punti di prelievo
- Costo annuo per tonnellata di rifiuto raccolto

Il costo annuo del servizio di raccolta è stato determinato moltiplicando il costo annualizzato degli automezzi e dei contenitori per il numero degli automezzi e dei contenitori necessari. Considerando che il numero ed il tipo di automezzi, così come il numero ed il tipo di contenitori necessari varia in base alle differenti aree servite, tale costo è quindi funzione del numero di abitanti presenti, è l'unico tra i costi unitari ad essere funzione del numero di abitanti.

Il costo annuo degli automezzi adibiti alla raccolta è la somma dei costi capitali e di gestione annualizzati relativi ad un singolo automezzo più i costi capitale annualizzati relativi ai contenitori serviti da quel automezzo.

Il costo annuo dei punti di prelievo è dato dalla somma dei costi annui relativi a ciascun automezzo diviso per il numero di punti di prelievo serviti da quel automezzo più il costo annualizzato di ogni contenitore presente nel singolo punto di prelievo.

Il costo annuo per tonnellata di rifiuto raccolto è stato trovato dividendo il costo annuo per punto di prelievo per il peso, in tonnellate, di rifiuti prodotti in quel punto di prelievo.

Costi capitali

$$C_{cap} = (1 + e) * Pt * CRF$$

Dove:

C_{cap} : costi capitali per automezzo ammortizzati rispetto alla vita utile [€/anno]

e : spese amministrative [€ di spese amministrative/€ di costi capitali o spese amministrative]

Pt : prezzo di acquisto dell'automezzo[€]

CRF : tasso annuo di ammortamento [anni⁻¹]

$$CRF = \frac{i * (1 + i)^L}{(1 + i)^L - 1}$$

Dove:

i : tasso di sconto annuo [anni⁻¹]

L: vita economica di un automezzo adibito alla raccolta [anni]

Costi di gestione

$$C_{op} = (1 + e) * \left\{ (1 + a) * \left[(1 + bw) * (Wa * Nw + Wd) * WP * CD * \frac{365 \text{ days/year}}{7 \text{ days/week}} \right] + c + [d * (Nw + 1)] \right\}$$

Dove:

C_{op}: costi di gestione annui [€/anno]

e: spese amministrative [€ di spese amministrative/€ di costi capitali o spese amministrative]

a: spese dovute a benefit aggiuntivi [€ di benefit/€ di salario]

bw: tasso di riserva per lavoratori [%]

Wa: paga oraria per lavoratore [€/ora]

Nw: numero di addetti a veicolo [n. lavoratori]

Wd: paga oraria dell'autista del automezzo [€/ora/lavoratore]

WP: ore di lavoro per addetto al giorno [ore/lavoratore/giorno]

c: costi annuali di gestione e manutenzione per automezzo [[€/anno/veicolo]

d: spese generiche [[€/lavoratore/anno]

Costo annuale per automezzo:

$$C_{vehicle} = (1 + bv) * C_{cap_v} + C_{op}$$

Costi annuali di raccolta

$$C_{ann} = Nt * C_{vehicle}$$

Numero di punti di prelievo che un solo automezzo può visitare durante un giro di raccolta

$$H_{-c} = \frac{H_t * RD * CD}{Fr}$$

Costi annuali per punto di prelievo

$$C_{-location} = \frac{C_{-vehicle}}{H_{-c}}$$

Costi totali di raccolta per tonnellata di rifiuto

$$C_{-ton} = \frac{C_{-location} * 2000 \text{ lb/tonn} * 7 \text{ days/week}}{G_{-msw} * 365 \text{ days/year}}$$

4.1.2 Analisi degli impatti ambientali

Gli impatti più importanti generati dal servizio di raccolta possono essere individuati nelle emissioni degli inquinanti aerei derivanti degli automezzi, rilevante è anche il consumo di acqua necessario per il lavaggio dei contenitori, degli automezzi, per la pulizia delle strade, dall'analisi di consumi elettrici si può risalire al totale delle emissioni indirette prodotte per generare l'energia elettrica consumata, inoltre devono essere considerati i rifiuti prodotti dal servizio di raccolta.

L'analisi degli impatti ambientali è stata impostata determinando il totale in peso degli inquinanti aerei emessi per tonnellata di materiale raccolto usando i Km percorsi ed il carburante utilizzato. Possono essere utilizzati dati di default o ricavati dall'utente relativi ai Km percorsi ed ai consumi di carburante. Questi vengono moltiplicati per dei fattori relativi alle emissioni dei diversi inquinanti per arrivare a valutare il totale delle emissioni inquinanti in atmosfera, in acqua e la produzione di rifiuti solidi prodotti per tonnellata di rifiuti urbani raccolti.

La quantità di carburante consumato durante il servizio di raccolta è calcolato basandosi sulle quote standard relative ai consumi.

Ovviamente la quantità ed il tipo di inquinanti varia in funzione del tipo di raccolta applicato, anche per l'analisi degli impatti ambientali è stato preso in considerazione lo stesso scenario utilizzato per l'analisi dei costi.

E' possibile determinare le quote di rilascio per i seguenti inquinanti:

- | | |
|---|---------------------------------|
| • CO | • Idrocarburi ad esclusione del |
| • NO _x | metano |
| • Particolato totale | • Metano |
| • PM ₁₀ | • Pb |
| • CO ₂ da combustibili fossili | • NH ₃ |
| • CO ₂ | • HCl |
| • SO _x | |

L'ammontare totale del generico inquinante p per tonnellata di rifiuto risulta pari a:

$$A_{ton_p} = A_{cv_{ton_p}} + A_{gar_{ton_p}}$$

Dove:

A_{ton_p} : quota di rilascio in atmosfera relativa al generico inquinante p [kg/tonnellata]

$A_{cv_{ton_p}}$: quota di rilascio in atmosfera associato all'automezzo relativa all'inquinante p [kg/tonnellata]

$A_{gar_{ton_p}}$: emissioni associate al garage relative al generico inquinante p [kg/tonnellata]

Qualora si prenda in considerazione una tipologia di raccolta con piattaforma di recupero si devono considerare anche le emissioni del veicolo privato usato per trasportare il rifiuto alla piattaforma.

Rilasci in atmosfera a seguito della combustione del carburante

$$A_{fuel_{ton_p}} = \frac{EF_p * 0.002205 \frac{lb}{g} * MiD}{Re fD}$$

Dove:

$A_{fuel_ton_p}$: quota di rilascio in atmosfera dell'inquinante p dovuta alla combustione del carburante [kg/tonnellata]

EF_p : fattore di emissione del generico inquinante p associato al veicolo [kg/tonnellata]
 MiD : Km percorsi giornalmente dal veicolo [km/giorno]

$RefD$: peso totale dei rifiuti raccolti per veicolo [kg/veicolo/giorno]

In questo caso $A_{fuel_ton}=A_{cv_ton}$, senza considerare le emissioni dovute alla trasformazione del petrolio greggio in combustibile le quali risultano pari a :

$$A_{pc_ton_p} = Fuelton * d_{em_p}$$

Dove:

$A_{pc_ton_p}$ = quota di rilascio in atmosfera relativa al generico inquinante p dovuta alla raffinazione [kg/tonnellata]

$Fuelton$ = quantità di combustibile usato per tonnellata di rifiuto raccolto [litri/tonnellata]

D_{em_p} = fattore di emissione dovuto alla raffinazione relativo al generico inquinante p [kg/tonnellata]

Le emissioni che è possibile ricondurre all'utilizzo del garage sono quelle relative ai consumi elettrici, ovvero quelle generate dalla produzione di energia elettrica.

Il contributo di quattro diversi gas (CO_2 , CH_4 , NO_x e HC) responsabili principali dell'effetto serra è stato calcolato pari a:

$$GGE_p = A_{ton_p} * GWP_p$$

Dove:

GGE_p : Gas serra equivalenti per tonnellata di rifiuto dove p rappresenta CO_2 , CH_4 , NO_x e HC [equivalenti/tonnellata]

A_{ton_p} : rilasci totali in atmosfera relative all'inquinante p [kg/tonnellata]

GWP_p : potenziale di riscaldamento globale relativo all'inquinante p [equivalenti/kg]

La somma di questi quattro componenti rappresenta il totale dei gas serra equivalenti per tonnellata di rifiuto

$$GGE_{tot} = \sum_p GGE_p$$

Gli inquinanti rilasciati in acqua importanti dal punto di vista ambientale sono:

- | | |
|----------------------------------|------|
| • Solidi disciolti | • Cd |
| • Solidi sospesi | • As |
| • BOD | • Hg |
| • COD | • P |
| • Olio | • Se |
| • H ₂ SO ₄ | • Cr |
| • Fe | • Pb |
| • NH ₃ | • Zn |
| • Cu | |

La somma tra le emissioni associate all'utilizzo dell'acqua necessario al servizio di raccolta e quello dovuto alla produzione di energia elettrica determina le concentrazioni totali degli inquinanti trasferiti all'acqua.

Inquinanti trasferiti all'acqua derivanti dall'utilizzo della stessa:

$$W_water_ton_p = Waterton * EF_p$$

Dove:

$W_water_ton_p$: Quota dell'inquinante generico p trasferito all'acqua dovuto all'utilizzo della stessa [kg/tonnellata]

$Waterton$: quantità di consumi idrici per veicolo di raccolta [litri/tonnellata]

EF_p : fattore di rilascio dovuto al lavaggio relativo al generico inquinante p [kg/litro]

$$WatrTon = \frac{W_{cv} + W_{gar}}{RefD}$$

Dove:

W_{cv} : consumi idrici giornalieri per veicolo di raccolta

W_{gar} : consumi idrici derivanti dal garage

$RefD$: peso di RU raccolti giornalmente da un solo automezzo

$$W_{pc_ton} = Fuelton * d_{em_p}$$

Inoltre bisogna tener conto dei rifiuti che hanno un impatto sull'ambiente che si generano a seguito del normale utilizzo degli automezzi come:

- Olio esausto
- Fluido esausto della trasmissione
- Fluido idraulico esausto
- Copertoni usati
- Filtri usati (olio, trasmissione, etc)
- Cinghie usate

4.2 Trasporto

Per trasporto si intende il trasferimento dei RU tra i diversi impianti di trattamento. Questo modello prende in considerazione tutte le tipologie di trasporto di RU, eccetto le operazioni

di trasporto relative alla raccolta ed al conferimento degli utenti alle piattaforme di recupero.

Le modalità di trasporto analizzate includono:

- Trasporto su rotaia
- Trasporto su gomma a mezzo di:
 - ✓ Automezzi pesanti alimentati a diesel
 - ✓ Automezzi leggeri alimentati a diesel
 - ✓ Automezzi leggeri alimentati a benzina
 - ✓ Veicoli di raccolta dei RU
 - ✓ Automezzi alimentati da combustibile ricavato negli stessi impianti di trattamento

Tenendo conto che tipicamente i mezzi pesanti ed ultrapesanti vengono utilizzati per coprire grandi distanze, per economizzare i costi di trasporto, mentre gli automezzi leggeri vengono utilizzati per coprire piccole distanze.

Destinazione																	
Org	rt	s	slt5	slt7	slt9	t1	t3	t5	t6	t7	t8	D1	d2	d3	f	r	c
Tr																	
Rt																	
S																	
slt5																	
slt7																	
slt8																	
t1																	
t3																	
t5																	
t6																	
t7																	
t8																	

Tabella 4.1 Individuazione dei punti nodali di un sistema integrato di raccolta

Nella Tabella 1 sono individuati i punti nodali tra gli impianti che entrano a far parte del sistema di gestione integrato del trasporto dei rifiuti, sono indicati inoltre i modi possibili di trasporto tra due punti nodali. Ogni riga rappresenta un punto di partenza ed ogni colonna rappresenta un punto di destinazione.

I nodi sono classificati come stazioni di trasferimento (tr), stazioni di trasferimento ferroviarie (rt), impianti di selezione (s), impianti di trattamento (t) e discariche(d). Il numero a pedice di ogni singolo nodo indica la tipologia di impianto adottata, come specificato di seguito:

- **Stazioni di trasferimento**
 - tr: stazioni di trasferimento
 - rt: stazione di trasferimento ferroviaria
- **Impianti di selezione**
 - s: impianto di selezione
 - s₁₅: impianto di selezione finalizzato alla produzione di CDR
 - s₁₇: impianto di selezione finalizzato alla produzione di compost
 - s₁₉: impianto di selezione finalizzato alla digestione anaerobica
- **Impianti di trattamento**
 - t3: termovalorizzazione
 - t5: impianto di produzione del CDR
 - t7 stabilizzazione aerobica
 - t9 stabilizzazione anaerobica
- **Smaltimento finale**
 - d1: discarica per rifiuti inerti
 - d2: discarica per rifiuti non pericolosi
 - d3: discarica per rifiuti pericolosi
- **Destinazioni dei prodotti**
 - f: frazione combustibile avviata al recupero energetico
 - r: impianti di riciclaggio
 - c: compost di qualità

Oltre ai nodi di processo, sono determinati dei fattori di trasporto determinati in base alla destinazione finale dl rifiuto, convertito in combustibile (f), riciclato e rilavorato (r), e compostato (c). Il trasporto su rotaia in Italia è in realtà ancora poco sfruttato, viene utilizzato solo per trasferire i rifiuti da una stazione di traferenza ferroviaria ad un'altra

L'obiettivo del modello di processo relativo ai trasporti è di calcolare i costi ed gli impatti ambientali relativi al trasporto del rifiuto indifferenziato, dei prodotti degli impianto di selezione e trattamento (CDR, compost, materiali recuperati, etc) e dei materiali provenienti dalla raccolta differenziata.

4.2.1 Analisi dei costi

I costi capitale del sistema integrato di trasporto includono i costi relativi all'acquisto degli automezzi necessari, nei costi di gestione e manutenzione vengono compresi tutti quei costi relativi alla manutenzione, al lavoro, alle tasse, alle spese di amministrazione, alle assicurazioni, i costi indiretti, i costi del carburante, i consumi elettrici e la manutenzione.

I costi relativi al trasporto ferroviario e su gomma sono stati calcolati sia per l'indifferenziato che per i diversi materiali, perché la diversa densità del materiale ha notevole influenza sui costi.

Costi ferroviari di trasporto del rifiuto indifferenziato:

$$TRSP_COST_FER = rail_cost_r * tr_di * rt_trip$$

Dove:

$TRSP_COST_FER$ = costi ferroviari per tonnellata di rifiuto trasportata [€/tonnellata]

$rail_cost_r$ = prezzo relativo al trasporto [€/tonnellata/km]

tr_di = distanza percorsa in km [km]

rt_trip = 1 o 2 a seconda che sia un solo viaggio o andata e ritorno

Costo del trasporto su gomma del rifiuto indifferenziato, del CDR e del compost

$$TRSP_COST = \frac{tr_m_cost * tr_di * rt_trip}{wt_cap}$$

Dove:

$TRSP_COST$ = costi di trasporto per tonnellata di rifiuto trasportato [€/tonnellata]

$tr_m_cost_r$ = quota di trasporto [€/Km]

tr_di = distanza percorsa in Km [km]

rt_trip = 1 o 2 a seconda che sia un solo viaggio o andata e ritorno

wt_load = capacità di carico [tonnellate]

Costo del trasporto su gomma dei materiali riciclabili

$$vol_TRSP_COST = \frac{tr_m_cost_r * tr_di * rt_trip}{vol_cap}$$

Dove:

vol_TRSP_COST = costi di trasporto per volume di tonnellata trasportata [€/m³]

$tr_m_cost_r$ = quota di trasporto [€/km]

tr_di = distanza percorsa [km] (solo viaggio di andata)

rt_trip = 1 o 2 a seconda che sia un solo viaggio o andata e ritorno

vol_cap = volume del veicolo [m³]

I costi per tonnellata relativamente ad ogni specifico materiale sono calcolati suddividendo il costo trovato precedentemente per la densità media del materiale.

$$item_TRSO_COST_COEF = \frac{vol_TRSP_COST}{item_density}$$

4.2.2 Analisi degli impatti ambientali

La produzione di inquinanti ambientali relativi ad un sistema di trasporto sono quelli generati dalla combustione e dalla produzione⁵ del carburante usato dagli automezzi. La produzione di inquinanti sarà ovviamente diversa a seconda che il trasporto avvenga su gomma o su rotaia.

Trasporto su rotaia:

Energia

⁵ Come specificato precedentemente sono state prese in considerazione anche le emissioni indirette, ossia quelle generate a seguito dei processi di produzione del carburante.

Energia totale richiesta è data dalla somma dell'energia richiesta per la produzione del combustibile e l'energia utilizzata dai motori ferroviari:

$$TRSP_ENG_COEF = eng_use_pc + eng_use_c$$

Dove:

$TRSP_ENG_COEF$ = energia totale utilizzata in Btu/tonnellata di rifiuto trasportato
 eng_use_pc = energia utilizzata per la produzione in Btu/tonnellata di rifiuto trasportato
 eng_use_c = energia utilizzata per la combustione in Btu/tonnellata di rifiuto trasportato

L'energia utilizzata nella produzione è pari a:

$$eng_use_pc = rail_fuel * d_pc_engr$$

Dove:

$rail_fuel$ è il combustibile utilizzato in litri/tonnellata di rifiuto trasportato e risulta pari a:

$$rail_fuel = tr_mg * tr_di * rt_trip$$

tr_mg rappresenta l'efficienza del combustibile ferroviario in litri/tonnellate/km

tr_mg è la distanza percorsa in km

d_pc_engr = è il fattore di conversione l'energia necessaria alla produzione del combustibile/energia necessario

L'energia utilizzata durante la combustione risulta pari a:

$$eng_use_c = rail_fuel * d_c_eng$$

Dove:

$rail_fuel$ è il combustibile utilizzato in litri/tonnellata di rifiuto trasportato

d_c_eng è l'energia consumata durante la combustione del diesel

Emissioni

E' stato calcolato il totale delle emissioni prodotte come somma tra quelle prodotte durante la produzione di combustibile e quelle prodotte dalla combustione vera e propria.

E' stato calcolato come esempio il totale delle emissioni prodotte relativamente al PM10.

$$TRSP_PM10_COEF = PM10_pc + PM10_c$$

Dove:

$TRSP_PM10_COEF$ = PM10 totali rilasciati kg/t rifiuti trasportati

$PM10_pc$ = PM10 rilasciati in seguito della precombustione in kg/t di rifiuto trasportato

$PM10_c$ = PM10 rilasciati in seguito della combustione in kg/t di rifiuto trasportato

Le emissioni relative alla combustione ed alla produzione del combustibile/energia necessari sono basate sui litri di combustibile usato per tonnellata di rifiuto trasportato.

Trasporto su gomma:Energia

L'energia totale richiesta è data dalla somma dell'energia spesa per la produzione del combustibile e di quella usata per alimentare gli automezzi:

$$TRSP_ENG_COEFF = eng_use_pc + eng_use_c$$

Dove:

$TRSP_ENG_COEF$ = energia totale utilizzata in Btu/tonnellata di rifiuto trasportato

eng_use_pc = energia utilizzata per la produzione di combustibile/energia in Btu/tonnellata di rifiuto trasportato

eng_use_c = energia utilizzata per la combustione in Btu/tonnellata di rifiuto trasportato è pari a:

$$eng_use_pc = rdw_nr_fuel * fuel_pc_enrg$$

Dove:

rdw_nr_fuel è la quantità di combustibile utilizzato e risulta pari a:

$$rdw_nr_fuel = \frac{tr_di * rt_trip}{tr_mg * wt_load}$$

Dove: wt_load rappresenta la capacità di carico del mezzo in tonnellate

$$eng_use_c = rdw_nr_fuel * fuel_c_eng$$

Emissioni

E' stato calcolato il totale delle emissioni prodotte come somma tra quelle prodotte durante la produzione di combustibile e quelle prodotte dalla combustione vera e propria.

E' stato calcolato come esempio il totale delle emissioni prodotte relativamente al PM10.

$$TRSP_PM10_COEF = PM10_pc + PM10_c$$

Dove:

$TRSP_PM10_COEF$ = PM10 totali rilasciati kg/t rifiuti trasportati

$PM10_pc$ = PM10 rilasciati in seguito della produzione in kg/t di rifiuto trasportato

$PM10_c$ = PM10 rilasciati in seguito della combustione in kg/t di rifiuto trasportato

Le emissioni relative alla combustione ed alla produzione sono basate sui litri di combustibile usato per tonnellata di rifiuto trasportato.

$$PM10_pc = rdw_nr_fuel * PM10_fuel_pc_em$$

Dove:

$PM10_fuel_pc_em$ è il tasso di rilascio relativo al PM₁₀ dipende dal combustibile utilizzato e dalla modalità di trasporto adottata.

$$PM10_c = rdw_nr_fuel * PM10_mode_c_em$$

Dove:

PM10_mode_c_em è il tasso di rilascio del PM10 dipendente dalla modalità di trasporto adottata.

Per calcolare i costi e gli impatti ambientali relativi al trasporto dei materiali riciclabili si può far riferimento ai volumi trasportati e non alle quantità trasportate, in quanto i materiali riciclabili (vetro, plastica, carta, legno, alluminio, ferro, etc) presentano densità e pesi specifici molto diversi tra loro.

4.3 Stazioni di trasferimento

In un servizio di raccolta e trasporto dei RU ci sono dei mezzi che sono adibiti sia alla raccolta che al trasporto a breve distanza. Se la sede di trattamento o di smaltimento definitivo, verso la quale sono stati destinati, è molto distante dalla zona in cui viene effettuata la raccolta, può non essere conveniente per i singoli mezzi effettuare il trasporto dei rifiuti sino a tale sito. In questo caso, per motivi economici, si introduce un'area intermedia, area di trasferimento, dove giungono i mezzi adibiti alla raccolta, da qui i rifiuti vengono “trasferiti” su mezzi di dimensioni maggiori, adibiti solo al trasporto e trasferiti al sito di interesse.

La necessità di realizzare stazioni di trasferimento è legata al fatto che gli impianti di trattamento sono distanti dai luoghi di produzione dei rifiuti, quando questa distanza è superiore ad un certo valore soglia si prevedono delle stazioni di trasferimento perché altrimenti sarebbe economicamente svantaggioso.

Questa soglia al di sotto della quale non conviene realizzare la stazione di trasferimento si calcola considerando i costi di trasporto in funzione della distanza. Ipotizzando un andamento lineare della retta dei costi senza stazione di trasferimento dove la pendenza è pari al costo specifico per tonnellata e per chilometro percorso. La retta che descrive l'andamento dei costi con una stazione di trasferimento invece parte da un certo valore, dato dai costi capitale, manutenzione ed esercizio della stazione, presenta una pendenza minore e l'intersezione tra le due rette determina il punto di soglia. (Grafico 2.3.1)

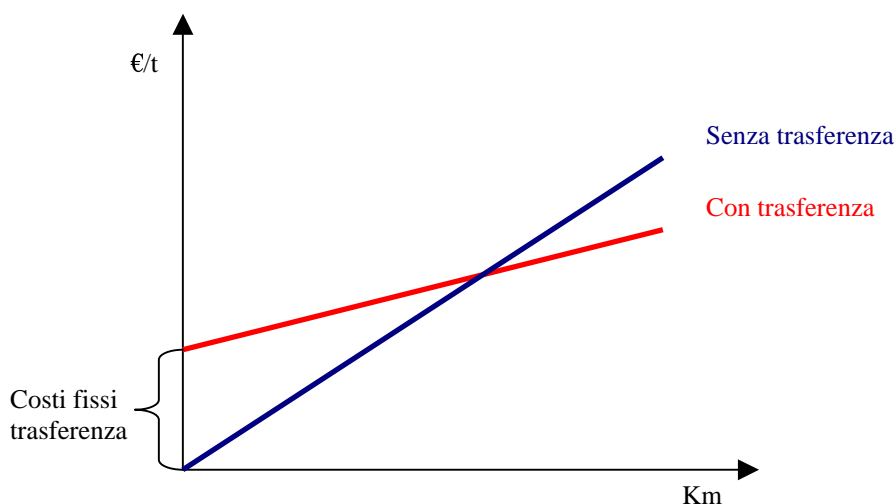


Grafico 4.1 Individuazione del punto di soglia.

Le stazioni di trasferimento vengono indicate come aree intermedie attrezzate (AIA) in quanto sono dotate di attrezzature ausiliarie come:

- Unità di separazione dei materiali

- Unità di compattazione perché a parità di quantità trasportate posso ottenere volumi sempre più piccoli
- Unità per ridurre impatti: sistemi captazione polveri, sistemi di drenaggio del percolato e sistema di abbattimento degli odori.

Le stazioni di trasfenza possono essere di diverso tipo a seconda del fatto che venga effettuata o meno una ulteriore compattazione del rifiuto e dell'andamento temporale delle quantità di rifiuti conferite dai mezzi di raccolta.

Aree a trasferimento diretto

Tali stazioni sono organizzate su due livelli. Il livello superiore è quello in cui transitano i mezzi per la raccolta, il livello inferiore è quello in cui sono posti i mezzi adibiti al trasporto. Il trasferimento è diretto in quanto i mezzi di raccolta, dal piano superiore, scaricano i rifiuti direttamente nei mezzi di trasporto situati al piano inferiore. Per come avviene il trasferimento tali mezzi sono aperti superiormente e non possono essere dotati di un sistema di compattazione. Quindi di fatto i volumi rimangono invariati o addirittura aumentano per l'allentamento che subiscono nel trasferimento.

Un trasferimento di questo tipo può essere effettuato solo se la legge con cui vengono utilizzati i mezzi di trasporto è temporalmente coincidente con la legge con cui in mezzi di raccolta arrivano alla stazione di trasfenza, quindi non è possibile svincolare il trasporto a lunga distanza dalla raccolta, si verificherebbe altrimenti un accumulo di rifiuti.

Aree a trasferimento indiretto

Sistema equivalente al precedente, ma realizzato in modo diverso. La stazione è organizzata infatti su un solo livello. In questo sistema, i rifiuti vengono scaricati su di un nastro trasportatore, il quale li convoglia poi nel mezzo di trasporto. Tale sistema evita la caduta dei rifiuti ingombranti durante le operazioni di trasferimento.

Aree di trasfenza con stoccaggio realizzate su di un solo livello

L'operazione di stoccaggio permette di svincolare le due operazioni di raccolta e trasporto. L'area è organizzata su di un solo livello che comprende un'area di stoccaggio, di accumulo dei rifiuti. I mezzi di raccolta scaricano i rifiuti nell'area di stoccaggio i quali poi tramite pala gommata vengono trasferiti nei mezzi adibiti al trasporto.

Aree di trasfenza con stoccaggio realizzata su due livelli

L'area è organizzata su due livelli, il mezzo di raccolta dal piano superiore scarica i rifiuti in una fossa di accumulo situata al piano inferiore, dopodiché una benna li solleva e li conferirà al mezzo di trasporto.

In questi sistemi che prevedono lo stoccaggio intermedio si deve evitare per quanto possibile la formazione di percolato, quindi è necessario che tale area abbia una copertura, ma va anche previsto un sistema di drenaggio delle acque.

Aree di trasfenza con compattazione

Se il sito per lo smaltimento è molto distante può essere necessaria una **compattazione del rifiuto**, compattazione che può avvenire o all'interno di **container**, i quali dopo aver raggiunto la capacità massima vengono agganciati ai mezzi di trasporto, o direttamente all'interno del **cassone del mezzo di trasporto** se questo è dotato di un sistema di compattazione, la compattazione può essere effettuata anche tramite imballatrice. Il vantaggio consiste nel poter trasportare un maggiore quantitativo di rifiuti, ma qualora si dovesse rompere il sistema di compattazione l'area si blocca in quanto non è facile sostituirlo in tempi brevi.

4.3.1 Analisi dei costi

Il costo totale per tonnellata di rifiuto processato (TR_COST_FACTOR) in €/ tonnellata risulta pari a:

$$TR_COST_FACTOR = \frac{(FAC_AC + EQ_COST + OP_AC)}{ywd}$$

Dove:

FAC_AC = costo capitale annuo dell'impianto [€/tonnellate/giorno/anno]

EQ_AC = costo capitale annuo dell'attrezzatura [€]

OP_COST = costi annui di gestione [€/tonnellate/giorno/anno]

ywd = giorni lavorativi annui [giorni/anno]

$$FAC_A = (STR_A + LD_A + CV_UL_A) * (1 + off_area_r)$$

Dove:

STR_A rappresenta l'area adibita allo stoccaggio (m^2 /tonnellate giorno)

$$STR_A = \frac{1,25 * stor}{ht * D_cv}$$

$stor$ è il tempo di stoccaggio [giorni]

ht è l'altezza dei rifiuti stoccati [metri]

D_cv rappresenta la densità del rifiuto [kg/m^3]

1,25 tiene conto dell'allentamento del rifiuto

LD_A è l'area adibita alle operazioni di carico/scarico

$$LD_A = \frac{ld_bay_a * (load_hr + tr_rep_hr) * 2000}{Ewh_d * tr_vol_cap * tr_d}$$

Dove:

ld_bay_a area richiesta per le operazioni di carico [m^2]

$load_hr$ tempo di carico di un automezzo [ore]

tr_rep_hr tempo di rimpiazzo di un automezzo [ore]

Ewh_d durata effettiva di una giornata di lavoro [ore/giorno]

tr_vol_cap capacità effettiva di un automezzo adibito al trasporto [m^3]

tr_d densità del rifiuto [kg/m^3]

CV_UL_A rappresenta l'area di scarico degli automezzi adibiti alla raccolta espressa in m^2 /tonnellate/giorno

$$CV_UL_A = \frac{single_cv_ul_a * cv_ul_hr * peak_fct}{EWh_d * cv_load}$$

$single_cv_ul_a$ è l'area necessaria allo scarico di un singolo automezzo [m^2]

cv_ul_hr è il tempo necessario allo scarico di un singolo automezzo [ore]

$peak_fct$ è il fattore di punta di arrivo degli automezzi[]

Ewh_d è la durata effettiva di una giornata lavorativa [ore/giorno]

cv_load è il peso effettivo dei RU nel singolo veicolo di raccolta [kg]

off_area_r rappresenta la frazione dell'impianto destinata agli uffici [].

Determinata l'area necessaria (FAC_A) è possibile determinare il costo capitale totale relativo alle costruzioni sommando i seguenti costi:

I costi di costruzione dell'impianto ($const_C$):

$$const_C = FAC_A * const_c$$

$const_c$ rappresentano i costi di costruzione [€/m²]

I costi di pavimentazione e delle opere accessorie ($sitew_C$) [€/m²]:

$$sitew_C = FAC_A * land_area_r * sitew_c$$

$land_area_r$ rapporto tra area costruita ed area pavimentata[m²/m²]

$sitew_c$ costo per la pavimentazione e le opere accessorie[€/m²]

I costi imputabili alla progettazione, permessi ed imprevisti (eng_C):

$$eng_C = (const_C + sitew_C) * eng_r$$

eng_r [€/tonnellata/giorno]rappresenta i costi di progettazione, permessi ed imprevisti come una frazione dei costi di costruzione.

I costi di acquisizione dell'area:

$$land_C = FAC_A * land_area_r * land_c$$

$land_c$ prezzo di acquisto del terreno [€/m²]

I costi capitali relativi all'impianto (EQ_AC) si trovano come somma dei costi di installazione ed acquisto e dipendono dalla tipologia di stazione di trasferimento adottata:

$$EQ_AC = RS_TC + COMP_TC$$

Dove:

Comp_tc sono i costi di acquisto del sistema di compattazione e RS_TC rappresenta il prezzo d'acquisto ed i costi d'installazione del nastro trasportatore e risulta pari a:

$$RS_TC = [RS_cost * (1 + eq_inst_r)] * i$$

RS_cost sono i costi di acquisto del nastro trasportatore

eq_inst_r sono i costi di installazione espressi come frazione del prezzo di acquisto

I costi di gestione (OP_AC) includono i consumi energetici, i salari e la manutenzione dell'impianto e risultano pari a:

$$OP_AC = WG_AC + \sum_i^{Equipment\ and\ facility} E_AC + \sum_i^{Equipment\ and\ facility} M_AC$$

WG_AC : costi salariali

$$WG_AC = op_wagw * ywd * op_req * (1 + mang_r)$$

op_wage : costi della manodopera [€/giorno]

op_req : personale richiesto in [ore/tonnellata/giorno]

ywd : giorni lavorativi annui [giorni/anno]

$mang_r$: costi del management espressi come frazione dei costi salariali []

E_AC : consumi energetici relativi al sistema di compattazione, nastro trasportatore e dell'impianto [€/tonnellata/giorno].

M_AC : costi di gestione [€/tonnellata/giorno].

4.3.2 Analisi degli impatti ambientali

Consumi elettrici

Il totale dei consumi elettrici è dato come somma dell'energia e del diesel richiesti ($TR_TL_ENG_FACTOR$):

$$TR_TL_ENG_FACTOR = TR_ELEC_FACTOR + TR_DIES_FACTOR$$

Dove:

TR_ELEC_FACTOR [Btu/tonnellata] è il totale di energia richiesta per tonnellata di rifiuto processato e risulta pari a :

$$TR_ELEC_FACTOR = (fac_e * FAC_A + comp_e) * region_btu_per_elec_kwh$$

fac_e : sono i consumi elettrici relativi alle costruzioni[kWh/m²/giorno]

$comp_e$: sono i consumi elettrici relativi al sistema di compattazione [kWh/tonnellata]

$region_btu_per_elec_kWh$: energia consumata per kWh prodotto [Btu/kWh]

TR_DIES_FACTOR [Btu/tonnellata] rappresenta il totale dei consumi di diesel degli automezzi alimentati con il diesel e risulta pari a:

$$TR_DIES_FACTOR = DIESEL_COMB + DIESEL_PREC$$

$DIES_COMB$: energia utilizzata dai nastri trasportatori [Btu/tonnellata]

$$DIES_COMB = rs_e * dsl_enrg$$

rs_e =diesel utilizzato dai nastri trasportatori [litri/tonnellata]

dsl_enrg = energia del carburante [Btu/litro]

Consumi idrici

I consumi idrici ($TR_WR_USE_FACTOR$) di una stazione di trasferimento sono pari a:

$$TR_WRUSE_FACTOR = \frac{wash_r * fac_wr * FAC_A * 12}{ywd}$$

wash_r: frequenza di lavaggio[lavaggi/mese]

fac_wr: richiesta di acqua[litri/m²]

ywd: giorni lavorativi annui[giorni/anno]

12 fattore di conversione mesi/anni

Emissioni di inquinanti in atmosfera

Le equazioni per calcolare il rilascio degli inquinanti in atmosfera sono le stesse per tutti i seguenti inquinanti:

- Particolato totale
- PM10
- NO_x
- Idrocarburi
- SO_x
- NH₃
- Pb
- CH₄
- HCL
- Gas serra equivalenti
- CO2

Per il particolato le emissioni totali (TR_pm_FACTOR) [kg/tonnellate] risultano pari a:

$$TR_pm_FACTOR = pm_elec + pm_rs_pc + pm_rs_c$$

Dove:

pm_elec= particolato totale rilasciato a seguito dei consumi elettrici [kg/tonnellate]

$$pm_elec = (comp_e + fac_e * FAC_A) * PM_r_tot$$

comp_e=consumi energetici del sistema di compattazione [kWh/tonnellate]

PM_r_tot= questo fattore tiene conto delle emissioni di particolato dovute alla produzione di energia elettrica[kg/kWh]

pm_rs_pc = particolato totale rilasciato a seguito della produzione del diesel in kg/t di RU[]

$$pm_rs_pc = rs_e * pm_dies_pc$$

rs_e =diesel utilizzato dai nastri trasportatori [litri/tonnellate]

pm_dies_pc =emissioni di particolato relative alla produzione del diesel

pm_rs_c = particolato rilasciato a seguito delle combustione del diesel in [kg/tonnellate RU].

Tale valore può essere un dato di input relativo alla stazione di trasfereza in esame o come dato di default determinato come risultato di un regressione lineare sui dati relativi alle emissioni di particolato di diverse stazioni di trsfereza.

I gas serra equivalenti sono stati calcolati con la seguente formula:

$$\begin{aligned} TR_gwp_FACTOR &= TR_CO_{2biomass} _FACTOR * GWP_CO_{2biomass} \\ &+ TR_CO_{2fossil} _FACTOR * GWP_CO_{2fossil} \\ &+ TR_CH_4 _FACTOR * GWP_CH_4 \\ &+ TR_NO_x _FACTOR * GWP_NO_x \\ &+ TR_HC _FACTOR * GWP_HC \end{aligned}$$

Le equazioni per il calcolo delle emissioni sono le stesse di quella utilizzata per il calcolo del articolato, per i potenziali di emissione ($GWP_inquinante$) si può far riferimento a quelli a 20 anni o oltre.

Produzione di rifiuti solidi

La produzione di rifiuti solidi associata ad una stazione di trasfereza risulta pari a:

$$TR_sw_FACTOR = sw_elec + sw_rs_pc$$

sw_elec =produzione di rifiuti solidi associata alla generazione elettrica [kWh/tonnellate di RU]

$$sw_elec = (comp_e + fac_e * FAC_A) * SW_r_tot$$

SW_r_tot = è il fattore di produzione di rifiuti relativo [kg/kWh]

Sw_rs_pc = rappresenta la produzione di rifiuti associata alla generazione del diesel

$$sw_rs_pc = rs_e * sw_dies_em$$

$sw_dies_pc_em$ = produzione di rifiuti associata alla generazione del diesel[]

Inquinanti acquatici

I rilasci totali degli inquinanti trasportati dall'acqua (TR_ds_FACTOR) sono ottenuti come somma degli inquinanti dei rilasci a seguito delle operazioni di lavaggio e della produzione di energia elettrica e del carburante.

$$TR_ds_FACTOR = ds_wwr + ds_elec + ds_rs$$

dove: ds_wwr sono i solidi disciolti a seguito dei lavaggi in kg/tonnellata di RU

$$ds_wwr = TR_WRUSE_FACTOR * DS_wwr_r$$

TR_WRUSE_FACTOR = consumi idrici [litri]

DS_wwr_r = solidi disciolti a seguito del lavaggio[kg/litro]

ds_elec = solidi disciolti dovuti alla generazione di energia elettrica

$$ds_elec = (fac_e * FAC_A + com_e) * DS_elec$$

DS_elec emissione di solidi dalla generazione dell'energia elettrica[]

Ds_rs solidi disciolti dovuti alla produzione del combustibile:

$$ds_rs = rs_e * ds_dies_pc_em$$

4.4 Impianti di selezione

La funzione di un impianto di selezione è di separare le diverse frazioni merceologiche al fine di produrre correnti di materiale che possano essere poi trattate e/o valorizzate (Fig 4.7).

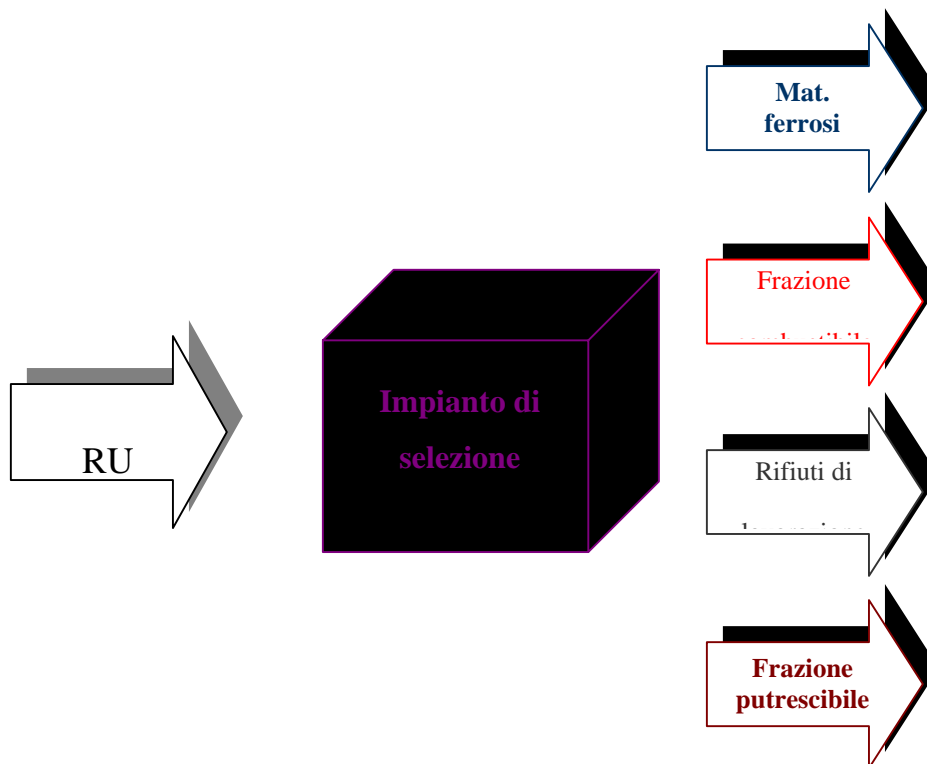


Figura 4.7 Flussi in ingresso ed in uscita di un impianto di selezione dei RU

Poiché risulta quasi sempre impossibile separare i rifiuti all'origine, si sono sviluppate una serie di impianti e macchinari destinati ad effettuare la cernita in modo automatico, sulla base delle proprietà dei materiali da separare (peso specifico, magnetizzazione, etc.). La separazione di certe categorie di materiali può essere dettata dall'esigenza di eliminare componenti nocive (es. plastica dalla frazione organica da avviare a compostaggio) per la prosecuzione dei processi, oppure da quella di recuperare un determinato materiale che verrà avviato a specifici processi di riutilizzo (es. ferro da riciclare dai RSU)

Le caratteristiche dell'impianto di selezione dipendono in generale dal tipo di materiale in ingresso:

- Rifiuto indifferenziato
- Residuale della raccolta differenziata

- Rifiuti provenienti dalla raccolta differenziata multimateriale
- Rifiuti provenienti dalla raccolta differenziata monomateriale

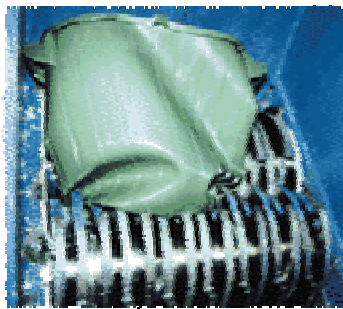
In base al materiale in ingresso in un impianto di selezione saranno presenti le seguenti unità:

Riduzione dimensionale (mulini a martelli, frantoi a mascelle, trituratori a coltelli, etc)

Una delle operazioni fondamentali nei cicli di recupero e riciclaggio è quella della riduzione della pezzatura del materiale. Questo avviene tramite una triturazione, che può essere più o meno spinta a seconda della spaziatura della griglia. I trituratori sono tra gli elementi del ciclo più soggetti ad usura ed hanno pertanto alti costi di manutenzione.

Le tecnologie utilizzate per la triturazione sono:

- **mulini a martelli**, i martelli agiscono con un impatto ad alta velocità sul materiale



- **i coltelli**. Si tratta di lame rotanti che provocano un'azione di taglio sul materiale; operano a velocità ridotte e il risultato della triturazione è piuttosto omogeneo



- **le sfere**. La triturazione avviene per un'azione di mista di lacerazione ed impatto grazie a sfere di acciaio

Altre attrezzature:

- **cippatrici** (trituratori da giardino)
- **granulatori**
- **macinatori** sono macchine per la produzione di macinato da materiali non ferrosi o minerali rigidi, con costi contenuti. Vengono utilizzati anche per tessuti, fibre, cavi plastici, pallets, imballi e per i materiali soggetti in genere a sfilacciamento.

Separazione dimensionale che può avvenire tramite:

- Vagli rotanti
- Separatori a disco
- Vagli a coclea
- Separatori balistici
- Separatori vibranti

Essi generalmente provocano la separazione del materiale in due frazioni, sulla base del diametro dei fori di passaggio. L'efficienza di vagliatura è data dal rapporto tra la frazione fine vagliata dal separatore (in peso) e la frazione fine in ingresso (in peso). I separatori in commercio possono raggiungere efficienze del 90%. I separatori balistici hanno un'efficienza maggiore. L'efficienza comunque è influenzata da molti fattori (numero di passaggi, umidità del rifiuto, velocità, frequenza delle vibrazioni, ecc.). I separatori a vaglio sono soggetti ad intasamento dei fori, con conseguente decadimento delle prestazioni. E' necessaria quindi un'onerosa manutenzione. Per limitare questo problema si ricorre all'utilizzo di trituratori all'interno della catena di vagliatura, per ridurre ulteriormente la granulometria del rifiuto.

Separazione magnetica/elettrostatica (separatore magnetico a tamburo, separatore magnetico a nastro, separatore magnetico a correnti indotte per materiali non ferrosi, etc). I separatori magnetici hanno il compito sia di recuperare le sostanze ferrose che possono essere riciclate, sia di "ripulire" il materiale da scarti ferrosi che potrebbero sia degradarne la qualità, sia danneggiare i macchinari delle successive fasi di trattamento. Nella maggior parte dei casi si hanno separatori magnetici a nastro, a puleggia o a tamburo. Nel sistema **a nastro**, quest'ultimo attira e trascina via il materiale ferroso che scorre su un altro nastro sottostante. I separatori **a tamburo** sono dei rulli magnetici che catturano i pezzi ferrosi dal flusso di materiale in arrivo; sono indicati per la rimozione delle particelle più fini al posto dei sistemi a puleggia. I separatori **a puleggia** sono i meno costosi e sono indicati per la separazione di piccole e medie pezzature. La puleggia può essere inserita al posto di un normale tamburo all'estremità dei nastri trasportatori.



Altre unità di separazione (classificatori ad aria, classificatori balistici, etc.). Sono usati generalmente per separare rifiuti di due sole tipologie in ingresso. In tali impianti il flusso di aria trascina le particelle con velocità terminale di caduta inferiore a quella del flusso, mentre quelle più pesanti (con velocità terminale superiore) si raccolgono sul fondo. La frazione leggera dovrebbe essere idealmente costituita da materiale combustibile (carta, plastica leggera). Per avere efficienze migliori si sono sviluppati dei classificatori "pulsanti" in cui la velocità del flusso d'aria non è costante, ma varia o nel tempo ("attivi") o nello spazio ("passivi") lungo il percorso. In questo modo si ottiene una separazione basata effettivamente sulla densità dei materiali. L'efficienza del classificatore per una certa velocità è data da:

$$E = \left(\frac{C_{out}}{C_{in}} * \frac{N_r}{N_{in}} \right) * 100$$

dove:

C_{out} = frazione combustibile estratta dal classificatore

C_{in} = frazione combustibile in ingresso al classificatore

N_r = frazione non combustibile rigettata dal classificatore

N_{in} = frazione non combustibile in ingresso al classificatore

Confezionamento. Può essere necessario confezionare il materiale separato per facilitare le operazioni di trasporto.

In un impianto di selezione del rifiuto urbano tal quale o del residuo della raccolta differenziata sono, in genere, presenti anche delle unità di trattamento della frazione organica putrescibile (FOP) che rappresenta uno dei flussi in uscita dal processo di

selezione e un'unità di trattamento della frazione combustibile (CDR), un altro dei flussi in uscita, il quale può essere lasciato sotto forma di fluff e venire quindi semplicemente imballato per favorire le operazioni di trasporto o essere trattato tramite addensamento, per aumentare il peso per unità di volume, o pellettizzazione per ottenere un materiale con caratteristiche di pezzatura fissate.

In questo lavoro sono stati analizzati i costi e gli impatti ambientali di un impianto tipo di selezione dei RU, che prevede le seguenti linee di trattamento:

- ricezione dei rifiuti;
- prima selezione dei RU con mezzi meccanici, finalizzata alla separazione dei rifiuti ingombranti per la successiva triturazione;
- selezione automatica dei RU allo scopo di:
 - eliminare i rifiuti ingombranti ed omogeneizzare la massa dei RU;
 - ridurre il volume dei rifiuti da avviare in discarica;
 - attuare la separazione dei seguenti materiali:
 - ◆ frazione organica umida da avviare al compostaggio;
 - ◆ frazione secca ad elevato potere calorifico da avviare alla produzione di CDR;
 - ◆ materiale ferroso grezzo da avviare al riutilizzo;

4.4.1 Analisi dei costi

Il costo totale per tonnellata di rifiuto processato (MRF_COST_FACTOR) in €/ tonnellata risulta pari a:

$$MRF_COST_FACTOR = \frac{(FAC_AC + EQ_COST + OP_AC)}{ywd}$$

Dove:

FAC_AC = costo capitale annuo dell'impianto [€/tonnellate/giorno/anno]

EQ_AC = costo capitale annuo dell'attrezzatura [€]

OP_COST = costi annui di gestione [€/tonnellate/giorno/anno]

ywd = giorni lavorativi annui [giorni/anno]

$$FAC_A = (STR_A + LD_A + CV_UL_A + S_A) * (1 + off_area_r)$$

Dove:

STR_A rappresenta l'area adibita allo stoccaggio (m²/tonnellate giorno)

$$STR_A = \frac{1,25 * stor}{ht * D_cv}$$

$stor$ è il tempo di stoccaggio [giorni]

ht è l'altezza dei rifiuti stoccati [metri]

D_cv rappresenta la densità del rifiuto [kg/m³]

1,25 tiene conto dell'allentamento del rifiuto

LD_A è l'area adibita alle operazioni di carico/scarico

$$LD_A = \frac{ld_bay_a * (load_hr + tr_rep_hr) * 2000}{Ewh_d * tr_vol_cap * tr_d}$$

Dove:

ld_bay_a area richiesta per le operazioni di carico [m²]

$load_hr$ tempo di carico di un automezzo [ore]

tr_rep_hr tempo di rimpiazzo di un automezzo [ore]

Ewh_d durata effettiva di una giornata di lavoro [ore/giorno]

tr_vol_cap capacità effettiva di un automezzo adibito al trasporto [m³]

tr_d densità del rifiuto [kg/m³]

CV_UL_A rappresenta l'area di scarico degli automezzi adibiti alla raccolta espressa in m²/tonnellate/giorno

$$CV_UL_A = \frac{single_cv_ul_a * cv_ul_hr * peak_fct}{EWh_d * cv_load}$$

$single_cv_ul_a$ è l'area necessaria allo scarico di un singolo automezzo [m²]

cv_ul_hr è il tempo necessario allo scarico di un singolo automezzo [ore]

$peak_fct$ è il fattore di punta di arrivo degli automezzi []

Ewh_d è la durata effettiva di una giornata lavorativa[ore/giorno]

cv_load è il peso effettivo dei RU nel singolo veicolo di raccolta[kg]

S_A è l'area coperta adibita alla selezione[m²]

off_area_r rappresenta la frazione dell'impianto destinata agli uffici [m²].

Determinata l'area necessaria (FAC_A) è possibile determinare il costo capitale totale relativo alle costruzioni sommando i seguenti costi:

I costi di costruzione dell'impianto ($const_C$):

$$const_C = FAC_A * const_c$$

$const_c$ rappresentano i costi di costruzione [€/m²]

I costi di pavimentazione e delle opere accessorie ($sitew_C$) [€/m²]:

$$sitew_C = FAC_A * land_area_r * sitew_c$$

$land_area_r$ rapporto tra area costruita ed area pavimentata[m²/m²]

$sitew_c$ costo per la pavimentazione e le opere accessorie[€/m²]

I costi imputabili alla progettazione, permessi ed imprevisti (eng_C):

$$eng_C = (const_C + sitew_C) * eng_r$$

eng_r [€/tonnellata/giorno]rappresenta i costi di progettazione, permessi ed imprevisti come una frazione dei costi di costruzione.

I costi di acquisizione dell'area:

$$land_C = FAC_A * land_area_r * land_c$$

$land_c$ prezzo di acquisto del terreno [€/m²]

I costi capitali relativi all'impianto (EQ_AC) si trovano come somma dei costi di installazione ed acquisto e dipendono dalla tipologia di impianto di selezione adottata:

$$EQ_AC = RS_TC + COMP_TC + DF_TC + S_TC$$

Dove:

$COMP_TC$ sono i costi di acquisto del sistema di compattazione, DF_TC è il costo di acquisto del sistema di defferizzazione, S_TC è il costo d'acquisto del sistema di selezione (vaglio rotante) e RS_TC rappresenta il prezzo d'acquisto ed i costi d'installazione del nastro trasportatore e risulta pari a:

$$RS_TC = [RS_cost * (1 + eq_inst_r)] * i$$

RS_cost sono i costi di acquisto del nastro trasportatore

eq_inst_r sono i costi di installazione espressi come frazione del prezzo di acquisto

I costi di gestione (OP_AC) includono i consumi energetici, i salari e la manutenzione dell'impianto e risultano pari a:

$$OP_AC = WG_AC + \sum_i^{Equipment\ and\ facility} E_AC + \sum_i^{Equipment\ and\ facility} M_AC$$

WG_AC : costi salariali

$$WG_AC = op_wagw * ywd * op_req * (1 + mang_r)$$

op_wagw : costi della manodopera [€/giorno]

op_req : personale richiesto in [ore/tonnellata/giorno]

ywd : giorni lavorativi annui [giorni/anno]

$mang_r$: costi del management espressi come frazione dei costi salariali []

E_{AC} : consumi energetici relativi al sistema di compattazione, di deferizzazione, al vaglio rotante e al nastro trasportatore dell'impianto [€/tonnellata/giorno].

M_{AC} : costi di gestione [€/tonnellata/giorno].

4.4.2 Analisi degli impatti ambientali

Consumi elettrici

Il totale dei consumi elettrici è dato come somma dell'energia e del diesel richiesti ($MRF_TL_ENG_FACTOR$):

$$MRF_TL_ENG_FACTOR = MRF_ELEC_FACTOR + MRF_DIES_FACTOR$$

Dove:

MRF_ELEC_FACTOR [Btu/tonnellata] è il totale di energia richiesta per tonnellata di rifiuto processato e risulta pari a :

$$MRF_ELEC_FACTOR = (fac_e * FAC_A + comp_e) * region_btu_per_elec_kwh$$

fac_e : sono i consumi elettrici relativi alle costruzioni[kWh/m²/giorno]

$comp_e$: sono i consumi elettrici relativi al sistema di compattazione [kWh/tonnellata]

$region_btu_per_elec_kWh$: energia consumata per kWh prodotto [Btu/kWh]

MRF_DIES_FACTOR [Btu/tonnellata] rappresenta il totale dei consumi di diesel degli automezzi alimentati con il diesel e risulta pari a:

$$MRF_DIES_FACTOR = DIESEL_COMB + DIESEL_PREC$$

$DIESEL_COMB$: energia utilizzata dai nastri trasportatori [Btu/tonnellata]

$$DIESEL_COMB = rs_e * dsl_enrg$$

rs_e=diesel utilizzato dai nastri trasportatori [litri/tonnellata]

dsl_enrg= energia del carburante [Btu/litro]

Consumi idrici

I consumi idrici (*MRF_WR USE_FACTOR*) di una stazione di trasferimento sono pari a:

$$MRF_WRUSE_FACTOR = \frac{wash_r * fac_wr * FAC_A * 12}{ywd}$$

wash_r: frequenza di lavaggio[lavaggi/mese]

fac_wr: richiesta di acqua[litri/m²]

ywd: giorni lavorativi annui[giorni/anno]

12 fattore di conversione mesi/anni

Emissioni di inquinanti in atmosfera

Le equazioni per calcolare il rilascio degli inquinanti in atmosfera sono le stesse per tutti i seguenti inquinanti:

- Particolato totale
- PM10
- NO_x
- Idrocarburi
- SO_x
- NH₃
- Pb
- CH₄
- HCL
- Gas serra equivalenti
- CO2

Per il particolato le emissioni totali (*TR_pm_FACTOR*) [kg/tonnellate] risultano pari a:

$$MRF_pm_FACTOR = pm_elec + pm_rs_pc + pm_rs_c + pm_deff + pm_s$$

Dove:

pm_elec= particolato totale rilasciato a seguito dei consumi elettrici [kg/tonnellate]

$$pm_elec = (comp_e + fac_e * FAC_A) * PM_r_tot$$

$comp_e$ =consumi energetici del sistema di compattazione [kWh/tonnellate]

PM_r_tot = questo fattore tiene conto delle emissioni di particolato dovute alla produzione di energia elettrica[kg/kWh]

pm_rs_pc = particolato totale rilasciato a seguito della produzione del diesel in kg/t di RU[]

$$pm_rs_pc = rs_e * pm_dies_pc$$

rs_e =diesel utilizzato dai nastri trasportatori [litri/tonnellate]

pm_dies_pc =emissioni di particolato relative alla produzione del diesel

pm_rs_c = particolato rilasciato a seguito delle combustione del diesel in [kg/tonnellate RU].

pm_deff e pm_s particolato rilasciato a seguito delle operazioni di selezione e defferrizzazione.

Tale valore può essere un dato di input relativo all'impianto di selezione in esame o come dato di default determinato come risultato di un regressione lineare sui dati relativi alle emissioni di particolato di impianti di selezione.

I gas serra equivalenti sono stati calcolati con la seguente formula:

$$\begin{aligned} MRF_gwp_FACTOR &= TR_CO_{2biomass} _FACTOR * GWP_CO_{2biomass} \\ &+ MRF_CO_{2fossil} _FACTOR * GWP_CO_{2fossil} \\ &+ MRF_CH_4 _FACTOR * GWP_CH_4 \\ &+ MRF_NO_x _FACTOR * GWP_NO_x \\ &+ MRF_HC _FACTOR * GWP_HC \end{aligned}$$

Le equazioni per il calcolo delle emissioni sono le stesse di quella utilizzata per il calcolo del articolato, per i potenziali di emissione (GWP_inquinante) si può far riferimento a quelli a 20 anni o oltre.

Produzione di rifiuti solidi

La produzione di rifiuti solidi associata ad un impianto di selezione risulta pari a:

$$MRF_sw_FACTOR = sw_elec + sw_rs_pc + sw_s$$

sw_elec =produzione di rifiuti solidi associata alla generazione elettrica
[kWh/tonnellate di RU]

$$sw_elec = (comp_e + fac_e * FAC_A) * SW_r_tot$$

SW_r_tot = è il fattore di produzione di rifiuti relativo [kg/kWh]

Sw_rs_pc = rappresenta la produzione di rifiuti associata alla generazione del diesel

$$sw_rs_pc = rs_e * sw_dies_em$$

$sw_dies_pc_em$ = produzione di rifiuti associata alla generazione del diesel[]

sw_s = produzione di rifiuti solidi associata al processo di selezione

Inquinanti acquatici

I rilasci totali degli inquinanti trasportati dall'acqua (MRF_ds_FACTOR) sono ottenuti come somma degli inquinanti dei rilasci a seguito delle operazioni di lavaggio e della produzione di energia elettrica e del carburante.

$$MRF_ds_FACTOR = ds_wwr + ds_elec + ds_rs$$

dove: ds_wwr sono i solidi disciolti a seguito dei lavaggi in kg/tonnellata di RU

$$ds_wwr = MRF_WRUSE_FACTOR * DS_wwr_r$$

MRF_WRUSE_FACTOR = consumi idrici [litri]

DS_wwr_r = solidi disciolti a seguito del lavaggio[kg/litro]

ds_elec = solidi disciolti dovuti alla generazione di energia elettrica

$$ds_elec = (fac_e * FAC_A + com_e) * DS_elec$$

DS_elec emissione di solidi dalla generazione dell'energia elettrica[]

Ds_rs solidi disciolti dovuti alla produzione del combustibile:

$$ds_rs = rs_e * ds_dies_pc_em$$

4.5 CDR

Il CDR è il risultato di un processo di selezione ed eventuale trattamento dei RU, tale processo attraverso la rimozione di sostanze indesiderate ai fini della combustione, come: materiale metallico (ferroso e non), vetro, inerti, sostanza organica umida, eventuali sostanze tossiche, ed attraverso altri possibili trattamenti, come triturazione, addensamento, essiccazione, pellettizzazione, deve garantire un adeguato potere calorifico

Il CDR quindi deriva da uno dei flussi di un processo di selezione e trattamento applicato ai rifiuti solidi urbani. Nello schema seguente si sono evidenziati, molto sinteticamente, i flussi principali di un generico processo di selezione e trattamento applicato ai RU:

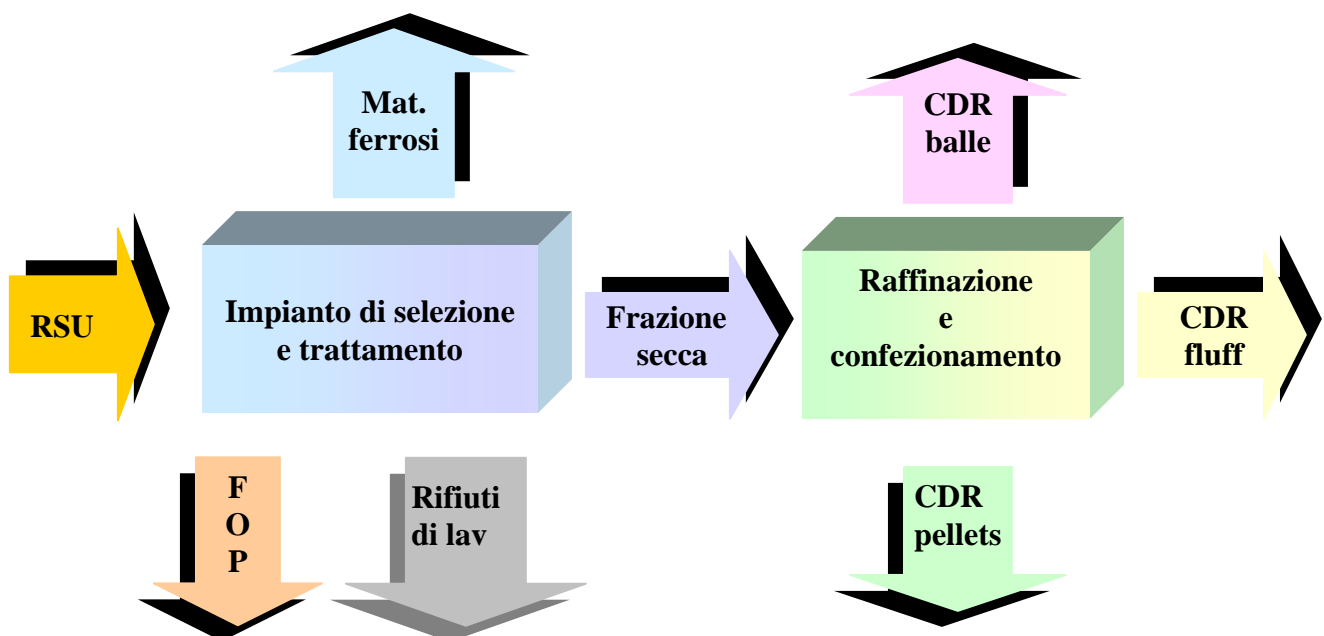


Figura 4.8 Evidenziazione dei flussi che caratterizzano la produzione del CDR

IL CDR si presenta generalmente sotto forma di:

- Coriandolato (fluff);
- Addensato (pellet, briquetts, etc);
- Imballato.

Per quanto concerne il coriandolato (UNI 9903/1) si definiscono tre diverse classi dimensionali:

- **CDR a grande pezzatura (tipo 1)**, il 90% in massa del materiale attraversa un setaccio con maglie da 125 mm.
- **CDR a pezzatura media (tipo 2)**, il 90% in massa del materiale passa attraverso un setaccio con maglie da 63 mm ed il resto passa attraverso un setaccio a 125 mm.
- **CDR a pezzatura fine (tipo 3)**, il 90% del materiale passa attraverso un setaccio con maglie da 31.5 mm ed il resto della massa passa attraverso un setaccio con maglie da 63 mm.

Il CDR addensato si presenta sotto forma di cubetti, pellet o altre forme addensate e presenta una densità maggiore di 300 Kg/m³.

La scelta sulla forma di presentazione del CDR dipende dal tipo di impianto che lo andrà a utilizzare come combustibile.

Il CDR deve rispondere a determinati requisiti imposti dalla normativa.

Il CDR è un combustibile di bassa qualità e dovrebbe trovare impiego in impianti termici e/o industriali situati in prossimità dei luoghi di produzione, per minimizzare i costi di trasporto e stoccaggio. Viene utilizzato generalmente accoppiato ad altri combustibili di qualità superiore e necessità di idonei impianti di trattamento dei fumi. Eventuali successivi trattamenti (pirolisi o gassificazione) possono migliorarne la qualità.

Le utenze che possono essere interessate al CDR sono in particolare i cementifici, perché grazie agli elevati tempi di permanenza ad alte temperature, sia delle miscele che dei fumi, le sostanze organiche inquinanti vengono completamente distrutte. Inoltre la miscela basica è in grado di neutralizzare i gas acidi che si sviluppano durante la combustione; i metalli pesanti restano fissati nelle ceneri o nelle polveri, sono facilmente abbattute dai depolveratori e vengono reimmessi nel processo produttivo: le ceneri sono inglobate nel clinker, mentre le polveri confluiscono al mulino del cotto per la produzione del cemento. Resta solo la depurazione delle acque di lavaggio. L'impiego del CDR in quantità tale da fornire fino al 20% della richiesta di calore necessaria per la produzione di clinker, non comporta variazioni rilevanti nelle emissioni inquinanti.

Vantaggi	Svantaggi
l'opinione pubblica è più favorevole;	problemi di movimentazione e stoccaggio;
maggior flessibilità gestionale;	scarsità di centrali termiche dotate di idonei

	impianti di trattamento fumi dove poter effettuare la combustione (CDR+ carbone);
maggior rendimento termico nella successiva combustione.	interesse limitato da parte di possibili utenti come ad esempio i cementifici, a causa del costo maggiore e delle prestazioni inferiori del CDR.

Tabella 4.1 Vantaggi e svantaggi dell'uso del CDR rispetto all'incenerimento del tal quale

I processi applicabili per la produzione del CDR non differiscono dai processi che possono essere adottati in un impianto generico di selezione e trattamento dei rifiuti.

Pertanto l'analisi dei costi e degli impatti ambientali può essere assimilata a quella di un impianto di selezione.

4.6 Termotrattamento

Il recupero dell'energia contenuta nei fumi caldi della combustione è una forma di recupero imposta ai nuovi impianti di termovalorizzazione dalla normativa vigente che va opportunamente vagliata portando in conto i costi del recupero e gli introiti (CIP/6) dovuti alla vendita dell'energia (termica e/o elettrica).

Altro aspetto di particolare rilevanza da dover considerare è l'operazione di pulizia dei fumi prodotti dagli impianti di trattamento termico; di fatto il settore della depurazione degli effluenti svolge un ruolo fondamentale nell'analisi di fattibilità e di impatto ambientale, in quanto dovendo assicurare oggi standard di emissione sempre più restrittivi, è necessario ricorrere a soluzioni ad alto livello tecnologico che richiedono al contempo severe misure di controllo del processo e di prevenzione. Queste ultime in particolare mirano a ridurre la presenza nel rifiuto di quei materiali, quali ad esempio le plastiche ed alcuni metalli (Cd, Hg, Cr, ecc), che maggiormente contribuiscono alla tossicità delle emissioni gassose. In tal senso l'impiego di un combustibile derivato dal rifiuto (CDR a norma), in luogo del rifiuto urbano tal quale, non solo permetterebbe di rispondere a questo obiettivo in quanto consentirebbe di separare gran parte dei metalli citati nel corso della sua preparazione, ma favorirebbe altresì tutto il processo di combustione data la sua maggiore omogeneità.

Vantaggi ulteriori dal punto di vista ambientale, ricorrono anche in conseguenza alla scelta del sistema di termoconversione dei rifiuti; oltre quindi ad essere un elemento di scelta in termini economici (visti gli elevati investimenti e spese di esercizio caratteristici), è da considerarsi oltretutto oggetto di valutazioni di impatto ambientale in quanto è anche in base alle peculiarità del processo di combustione adottato da questo che si può ottenere un elevato contenimento dei fenomeni di inquinamento indotto dai residui solidi, liquidi e gassosi del processo.

Sebbene la tecnica di termodistruzione dei rifiuti risulta ormai storica vi è da evidenziare la presenza di altre soluzioni come la gassificazione, la pirolisi ed i forni al plasma.

Il ciclo di trattamento che caratterizza gli impianti di combustione dei rifiuti è frazionabile nelle seguenti fasi principali di trattamento:

- accettazione ed accumulo,
- alimentazione,
- combustione,

- raffreddamento dei fumi della combustione e recupero del calore,
- trattamento dei residui della combustione: ceneri, fumi, scorie, acque reflue.

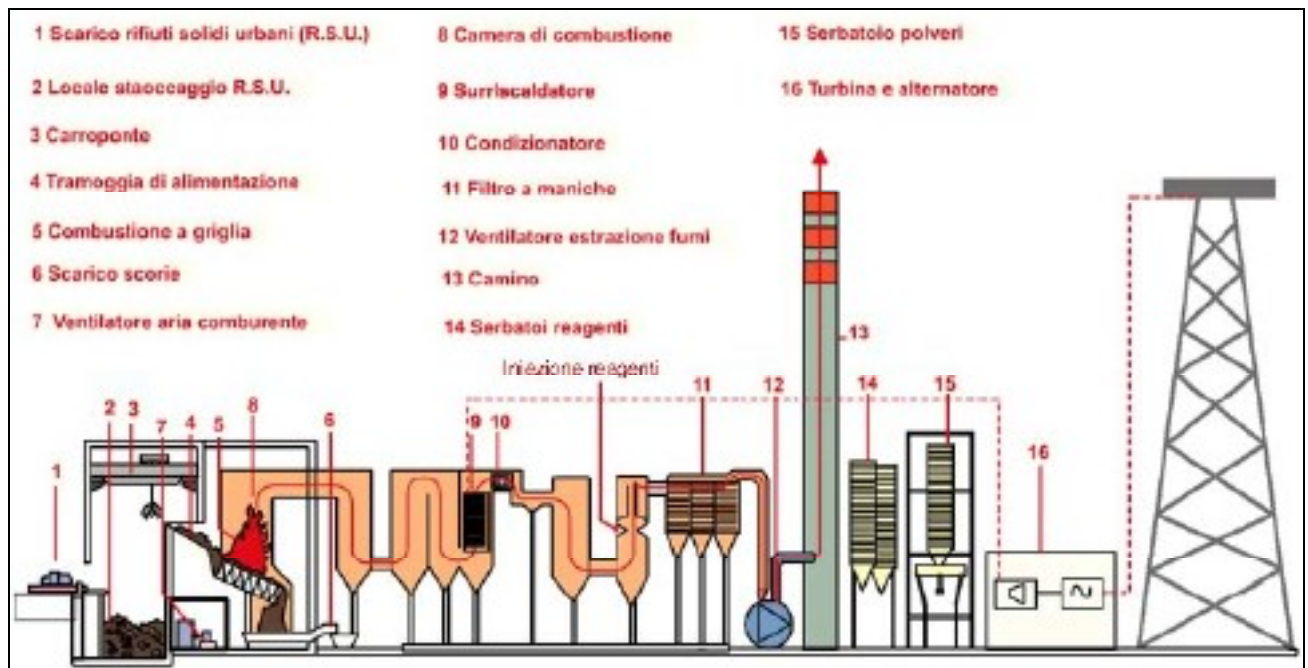


Figura 4.3 Schema di un generico impianto di termovalorizzazione

Le camere di combustione o forni possono essere di diversi tipi; i più comuni sono:

Forni a griglia. La griglia può essere fissa o mobile; nel primo caso le quantità di rifiuti trattate sono molto inferiori (qualche tonnellata al giorno) e la combustione può risultare non omogenea e incompleta, per ovviare ciò si ha un consumo maggiore di combustibile ausiliario. La griglia mobile consente un maggiore rivoltamento del materiale, per cui la combustione risulta più uniforme e completa. L'aria necessaria alla combustione viene iniettata sia da sotto la griglia (in quantità stechiometriche) sia da sopra il letto di rifiuti (aria secondaria in eccesso). Nei forni a griglia l'eccesso d'aria va dal 60% al 100%. La griglia può essere a gradini o a rulli.

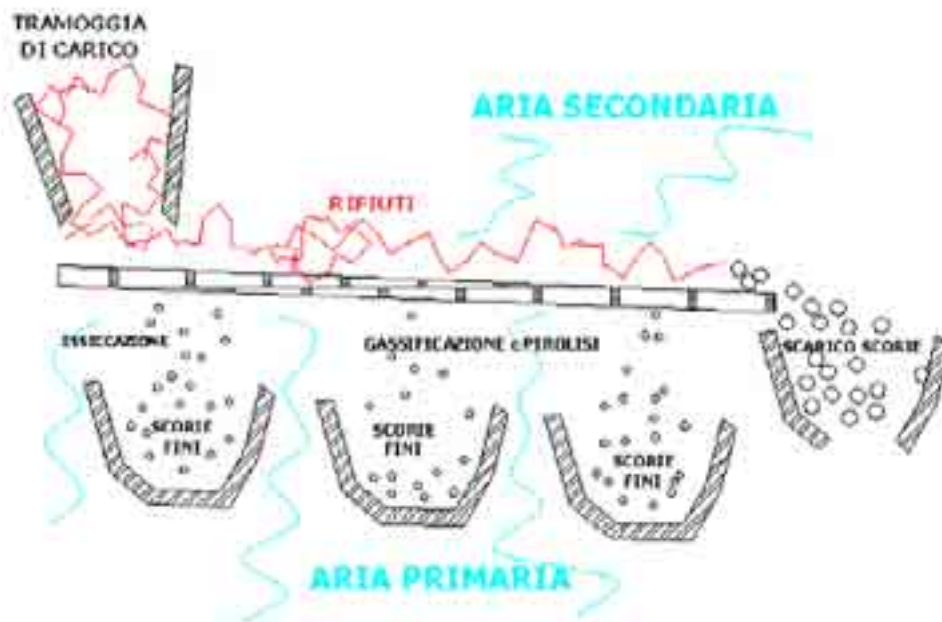


Figura 4.4 Schema di forno a griglia

Forni a tamburo rotante La combustione dei rifiuti avviene all'interno di un cilindro rotante leggermente inclinato. Le pareti sono rivestite di materiale refrattario. I rifiuti sono sottoposti ad un movimento rotatorio e ad uno longitudinale che, provocando la frantumazione e l'aumento delle superfici di contatto, aumentano l'efficienza di combustione. Tuttavia a causa sia della mancanza di insufflazione di aria, sia del mescolamento insufficiente, sia dei tempi di permanenza ridotti, è necessaria l'aggiunta a valle del forno di una camera di postcombustione; inoltre, sempre per gli stessi motivi, è opportuno operare con un eccesso d'aria del 100-150%.

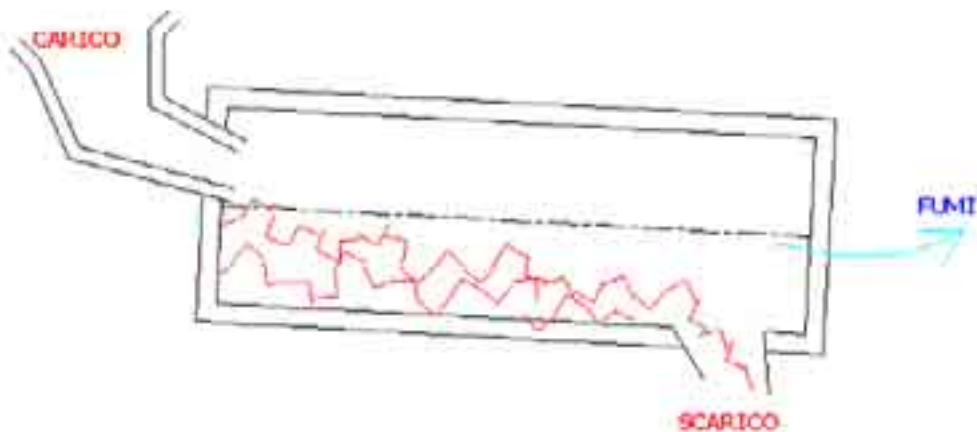


Figura 4.5 Schema di forno rotante

Il diametro minimo dei forni rotanti deve essere circa 1-2 m. La lunghezza varia tra 8 e 15 m (rapporto tra lunghezza e diametro da 2 a 5) e la potenzialità è di alcune migliaia di kg/h. Il numero di giri varia tra 0.2 e 1.2 giri/minuto. Il tempo di permanenza del rifiuto nel forno può essere stimato con la formula $t=19 (L/D)/(i r)$ con L/D il rapporto tra lunghezza e diametro, i l'inclinazione, r la velocità di rotazione in giri/minuto (t è normalmente dell'ordine di 1 ora).

Forni a letto fluido Il letto è costituito generalmente di sabbia, con eventuale aggiunta di reagenti alcalini per catturare le sostanze acide. La fluidizzazione è data da una corrente di aria (che può essere preriscaldata in caso si abbia un combustibile di basso potere calorifico). I vantaggi di questa tecnologia sono: una combustione omogenea e completa (quindi senza formazione di composti organici volatili - diossine), una emissione di fumi limitata, la possibilità di trattare diversi tipi di rifiuti (solidi, liquidi e gassosi, a diversi poteri calorifici).

In ogni caso la combustione dei rifiuti porta alla presenza di inquinanti nei fumi che, prima di essere scaricati in atmosfera devono passare tramite appositi sistemi di depurazione. I principali inquinanti presenti nei fumi e i metodi di controllo sono:

Inquinante	Metodo di controllo
particelle incombuste	operare a temperature non inferiori ai 250°C e con sistemi di rimozione quali i filtri;
composti acidi	assorbimento per via umida, secca o semisecca, mediante l'uso di soluzioni acquose alcaline
monossido di carbonio e idrocarburi (causati da cattiva combustione o eccessiva umidità, scarsità di aria o cattiva omogeneizzazione)	adeguate quantità di umidità ed aria;
microinquinanti organici (pentaclorofenoli, composti organici clorurati e composti metallici clorurati)	operare sui sistemi di combustione tramite strumenti di controllo in grado di fornire più o meno aria (quando necessaria) o tramite filtri;
ossidi di azoto	iniezioni di ammoniaca e utilizzo di catalizzatori

Tabella 4.2 Principali inquinanti nei fumi e metodologie di controllo

Trattamento al plasma. Con il termine plasma si intende una condizione in cui il materiale è soggetto a temperature talmente alte che alcuni dei suoi elettroni si separano dai nuclei atomici. Tramite arco elettrico si raggiungono temperature anche di 10.000 °C. Questa particolare forma di combustione avviene in carenza di ossigeno e i residui sono: una sorta di sostanza vetrosa altamente stabile, metalli recuperabili, gas ricco di idrogeno e quindi elettricità. Con questo trattamento si riescono a trasformare in combustibile biomasse, rifiuti domestici, RSU, rifiuti tossici, nocivi, ospedalieri, fanghi di purificazione, terreni contaminati da diossine o idrocarburi.

Il volume di residui della combustione dei rifiuti organici può arrivare ad essere anche solo il 5 % del volume originario. Le emissioni sono circa il 10 % di quelle di un impianto di incenerimento; inoltre sono praticamente assenti prodotti di combustione come le diossine e gli NO_x. Le altissime temperature garantiscono la distruzione delle molecole organiche pericolose.

Pirolisi. La pirolisi è un processo termico applicato alla parte organica dei rifiuti a temperature tra 400 °C e 900 °C in carenza di ossigeno.

Dalla combustione di 1 tonnellata di rifiuti con riscaldamento intorno ai 500 °C e a pressione atmosferica si possono ottenere:

- 120 litri olio combustibile
- 70 kg ferro
- 60 kg vetro
- 80 kg carbone
- biogas



Il combustibile liquido prodotto ha un potere calorifico medio di 20.000 kJ/kg.

Gassificazione. La gassificazione è un processo termico che, a partire da residui carboniosi (ad es. quelli della pirolisi), consente di ottenere gas combustibile e scarti vetrosi. L'impianto di gassificazione si compone di un reattore verticale, alimentato dall'alto, in cui possono individuarsi zone diverse a temperatura crescente: zona superiore di essiccamento (400 °C); zona mediana di pirolisi (750 °C); zona inferiore di combustione primaria e fusione (1400 °C).

I vantaggi principali di un impianto di gassificazione sono le dimensioni ridotte dell'impianto, le ridotte emissioni in atmosfera e la vetrificazione (inertizzazione) delle scorie.

4.6.1 Analisi dei costi

I costi relativi ad un impianto di termotrattamento con camera di combustione, sono stati divisi in cinque componenti: costi capitale, costi di gestione e manutenzione, ricavi ottenuti dal recupero di energia elettrica e dei materiali ferrosi (nel caso di incenerimento del rifiuto tal quale).

Costi capitale

I costi capitale includono tra i costi di impianto quelli relativi alla camera di combustione, al sistema di trattamento dei fumi e quelli relativi al monitoraggio dell'inquinamento aereo. I costi capitali sono calcolati, assumendo come costo capitale unitario in euro/tonnellata di capacità, considerando che l'impianto non lavora mai con la capacità massima a tempo pieno è stato preso in considerazione un fattore che tiene conto di ciò. Inoltre può essere espresso su base annua utilizzando uno speciale tasso di ammortamento: il Fattore di Recupero Capitale (CRF) che dipende dal tasso di sconto e dalla vita dell'impianto riportata dalla letteratura scientifica. Le seguenti equazioni determinano i costi capitale:

$$WTE_capital_cost_per_ton_i = \frac{Unit_WTE_capital_cost * CRF}{WTE_capacity_factor}$$

Dove:

WTE: waste to energy

$WTE_capital_cost_per_ton_i$ è il costo capitale per tonnellata di rifiuto processata dall'impianto e viene espresso in euro/tonnellata di rifiuto processato. [€/tonnellate RU]

$Unit_WTE_capital_costs$ è il costo capitale per unità di capacità dell'impianto. [€/capacità dell'impianto in tonnellate/anno]

CRF tale fattore permette la conversione dei costi capitali su base annua, è una funzione del tasso di sconto e della vita utile dell'impianto:

$$CRF = \frac{i * (1+i)^n}{1 - (1+i)^{-n}}$$

Dove i è il tasso di sconto ed n è il numero di anni di vita utile dell'impianto.

$WTE_capacity_factor$ tiene conto del fatto che l'impianto non lavora sempre con la sua capacità massima, è adimensionale ed è compreso tra zero ed 1.

Costi di gestione e manutenzione

I costi di gestione e manutenzione comprendono i costi relativi al lavoro, spese generali, tasse, amministrazione, assicurazioni, costi indiretti, costi relativi al combustibile ausiliario, costi di manutenzione. Tali costi non includono i costi relativi al trattamento ed allo smaltimento dei residui della combustione (scorie e ceneri) e non tengono in considerazione del guadagno derivante dal recupero energetico.

$$WTE_O \& M_cost = \sum WTE_O\&M_cost_per_ton * WTE_feed_rate$$

Dove:

$WTE_O\&M_cost_per_ton$ = costi annuali di gestione e manutenzione per tonnellata di RU. [€/tonnellate RU]

$WTE_O\&M_cost$ = costi unitari di gestione e manutenzione [€/anno]

Ricavo dal recupero dei ferrosi

I materiali ferrosi possono venire recuperati dalle scorie, nel caso in cui sia stato termovalorizzato in rifiuto tal quale. Il costo del magnete per rimuovere i ferrosi è sufficientemente piccolo rispetto al ricavo ottenuto dalla vendita dei ferrosi da poter essere trascurato.

La quantità di ferro recuperato (WTE_Ferr_rec) in [tonnellate di ferrosi/tonnellate di RU] è pari alla quantità di rifiuto incenerito (WTE_ton) moltiplicato per una frazione media di materiali ferrosi che è possibile trovare nelle scorie ($WTE_bottom_ash:rec_rate$) in [tonnellate di ferrosi recuperate/tonnellate di ferrosi nelle scorie], moltiplicando eventualmente per l'efficienza di rimozione del magnete deferrizzatore.

$$WTE_Ferr_rec = WTE_ton * WTE_bottom_ash_rec_rate$$

Il ricavo ottenuto dalla vendita dei materiali ferrosi ($WTE_Fe_revenue$) in [€/anno] è pari a:

$$WTE_Fe_revenue = WTE_Fe_rec * Scrap_price$$

Scrap-price è il prezzo di vendita per tonnellata di ferrosi [€/tonnellata ferrosi recuperati].

Ricavo dalla vendita dell'energia elettrica prodotta

L'elettricità prodotta ($WTE_kWh_per_ton$) per tonnellata di rifiuto trattato [kWh/tonnellata RU], dal recupero del calore generato dalla combustione, può essere venduta ed il ricavo ($Electricity_revenue_per_ton$) in [€/tonnellata RU] risulta pari a:

$$Electricity_revenue_per_ton = WTE_kWh_per_ton * Electricity_price$$

Dove:

$Electricity_price$ = prezzo di vendita dell'elettricità [€/kWh]

$WTE_kWh_per_ton$ espresso in [tonnellata RU/kWh] risulta pari a :

$$WTE_kWh_per_ton = \frac{Heating_value_waste}{Heat_rate}$$

dove. *Heating_value_waste* è il potere calorifico del rifiuto [kJ/kg]

Heat_rate tiene conto dell'efficienza del recupero del calore [kJ/kWh]

Per ottenere il ricavo totale basta moltiplicare il ricavo per tonnellate di rifiuto per il totale in tonnellate di rifiuto trattato.

I costi totali quindi risultano pari a:

$$WTE_cost = (WTE_capital_cost + WTE_O\&M_cost) - (WTE_ferrous_revenue + WTE_electricity_revenue)$$

4.6.2 Analisi degli impatti ambientali

Energia

Un impianto di termovalorizzazione proprio per le sue caratteristiche non consuma combustibili fossili ad eccezione di una piccola percentuale (meno dell'1%) utilizzata per accendere i combustori. L'energia necessaria all'impianto può essere ricavata da quella prodotta e recuperata a seguito della combustione.

Emissioni aeree

$$WTE_air_{i,p} = Flue_gas_per_ton_i * Concentration_p$$

Dove:

$WTE_{i,p}$ rappresenta l'emissione di un non-metallo p (SO₂, HCl, NO_x, CO, PM, Diossine/furani) in grammi di inquinante per tonnellata di rifiuto

$Flue_gas_per_ton$ è la corrente gassosa totale generata misurata dopo il sistema di trattamento dei fumi [m³/tonnellata RU]

$Concentration_p$ è la concentrazione dell'inquinante p dopo il trattamento fumi e viene calcolata in modo differente per i diversi inquinanti:

Per SO₂, HCl, NO_x, CO:

$$Concentration_p = ppmConcentration_p * \frac{1}{10^6} MW_p * \frac{1}{22,4} * \frac{1}{10^3} * 2,2$$

La concentrazione è espressa in ppm, MW_p rappresenta il peso molecolare degli inquinanti: SO₂, 64; HCl, 36,45; NO_x, come NO₂, 46; CO, 28 (grammi/mole)

Per PM:

$$Concentration_p = mgConcentration_p * \frac{1}{10^6} * 2,2$$

Per le diossine ed i furani:

$$Concentration_p = ngConcentration_p * \frac{1}{10^{12}} * 2,2$$

Le emissioni dei metalli (Cd, Pb, Hg, As, B, Cr, Cu, Ni, Sb, Se e Zn) sono calcolate n modo diverso e dipendono dall'efficienza di rimozione ($removal_efficiency_m$) e da un fattore che tiene conto dell'emissione dei metalli prima del trattamento fumi ($uncontrolled_emission_factor_{i,m}$) e risultano pari a :

$$WTE_air_{i,m} = Uncontrolled_emission_factor_{i,m} * (1 - Removal_efficiency_m)$$

Le emissioni totali sono ottenute come somma fra le emissioni dei metalli e dei non-metalli.

Rifiuti solidi prodotti

I residui solidi prodotti dopo un processo di termovalorizzazione sono genericamente indicati come scorie e ceneri. In realtà i rifiuti solidi prodotti classificati, secondo l'International Ash Working Group, in maniera più precisa sono:

- **Bottom ash**, scorie o ceneri pesanti, con tale termine si indica il materiale che viene scaricato dalla griglia (grate ash) dopo la combustione, nelle scorie viene ricompreso anche il cosiddetto grate siftings, ossia il residuo che cade attraverso griglia durante la combustione.
- **Heat recovery ash**, ceneri da caldaia, sono le ceneri raccolte sul sistema di recupero del calore e specificatamente in base all'area di raccolta sono chiamate: ceneri dell'economizzatore, del surriscaldatore etc...., possono essere raccolte insieme alle ceneri o insieme alle scorie, in base al tipo di impianto.
- **Fly ash**, ceneri volanti, sono le ceneri, trasportate fuori dalla camera di combustione dalla corrente gassosa, che vengono raccolte prima di ogni trattamento dei fumi, comprendendo anche tutti quegli elementi volatili che condensano con il raffreddamento dei fumi.
- **APC residues**, è il materiale che si forma a seguito del sistema di trattamento dei fumi, sistema a secco e a semisecco, comprendendo anche qualsiasi materiale assorbente iniettato (carboni attivi), e gli eventuali reagenti iniettati in eccesso. Nella terminologia anglosassone, in genere, nell' APC vengono ricomprese anche le ceneri volanti.
- **Scrubber sludge**, è il residuo solido che si forma a seguito del trattamento ad umido.
- **Combined ash**, nella terminologia anglosassone viene indicata così la miscela di scorie e ceneri, questo è tipico degli Stati Uniti dove ceneri e scorie vengono trattati assieme, mentre in Canada, Europa e Giappone scorie e ceneri vengono gestite separatamente.
- **Particelle sospese**, sono costituite da ceneri e polveri di dimensioni della grandezza di micron che non sono state abbattute nella sezione trattamento fumi e che quindi vengono immesse in atmosfera.

Per **scorie o ceneri pesanti** quindi si intende **tutto il materiale che viene scaricato dalla griglia**, nelle **ceneri leggere** vengono ricomprese sia le **ceneri volanti** che le **polveri derivanti dal sistema di trattamento dei fumi**. Le ceneri da caldaia possono essere scaricate insieme alle scorie o raccolte insieme alle ceneri.

Le **scorie** sono un materiale eterogeneo costituito in prevalenza da materiali inerti rispetto alla combustione, come vetro, porcellana, materiali metallici ferrosi e non, ed eventualmente anche da materiali incombusti che derivano dalla frazione combustibile del rifiuto, che, per difetto di mescolamento, non ha dato luogo a combustione.

Sono il rifiuto solido maggiormente prodotto, dall'80 al 95% del peso totale dei residui prodotti.

Più del 20% delle scorie presenta materiali con dimensione > ai 10 cm, composto soprattutto da materiale ferroso e non ferroso e da materiali da costruzione, tale percentuale diminuisce ovviamente nel caso in cui si utilizza il CDR poiché una parziale deferrizzazione è già stata effettuata nell'impianto di trattamento.

Le scorie sono alcaline con un range che va da 9.5 a 11.5 in pH, dovuto alla presenza di prodotti alcalini, elementi alcalino-terrosi e a ossidi di metalli che formano idrossidi durante l'idrolisi. I maggiori elementi presenti nelle scorie sono: O, Si, Fe, Ca, Al, Na, K e C (circa 80-90% in peso), sono presenti inoltre elementi come Mn, Zn, Cu, Pb, Cr, etc ed in tracce sono presenti elementi come As, Hg, Ni, etc. Alcuni di questi elementi nonostante siano sostanze volatili si trovano anche nelle scorie, è il caso del Pb ad esempio che prima di riuscire a volatilizzare fonde e cola dalla griglia di combustione. Un altro parametro che influenza la presenza di sostanze volatili, come Cd e Pb, è la tipologia d'impianto, impianti che utilizzano CDR in cui la combustione è migliore presentano una minore concentrazione di Cd e Pb nelle scorie perché riescono a vaporizzare meglio, scorie che presentano una combustione meno efficace presentano concentrazioni maggiori di Cd nelle scorie.

Le scorie presentano un'umidità compresa tra il 15% ed il 25%, il contenuto di umidità è importante per il controllo delle polveri e può essere d'aiuto nella compattazione. Il contenuto ottimale d'umidità è pari al 16%.

Le **ceneri** sono un materiale fine, più omogeneo da un punto di vista fisico rispetto alle scorie, le particelle che presentano dimensioni maggiori sono quelle che provengono dalle ceneri volanti. I maggiori elementi presenti sono: O, Si, Al, Cl, Na, K, S, e Fe; i metalli

sono prevalentemente presenti sotto forma di ossidi, cloruri, fluoruri e solfati. Nelle ceneri troviamo anche quei metalli pesanti volatili, che hanno successivamente condensato. Le ceneri contengono inoltre sali con elevata solubilità.

Con l'incenerimento si è arrivati ad una riduzione in peso del 30 % ed ad una riduzione in volume pari al 10%, rispetto al peso ed al volume iniziali, è già un ottimo risultato che permette l'allungamento della vita di una discarica, ma non basta in quelle nazioni, comunque povere di territorio come il Giappone, ma anche l'Europa. Numerosi sono gli studi condotti su un eventuale riutilizzo per evitare il loro smaltimento finale in discarica. Negli Stati Uniti le scorie e le ceneri vengono miscelate assieme e smaltite in discarica controllata, in Canada, Europa e Giappone, le scorie e le ceneri vengono trattate separatamente date le differenti caratteristiche di pericolosità di scorie e ceneri.

I trattamenti ed il loro eventuale riutilizzo dipendono infatti dalle caratteristiche di pericolosità.

Le scorie possono venire utilizzate come materiali inerti per: sottofondi stradali, argini, terrapieni, pavimentazioni in asfalto, in genere, prima di un loro eventuale utilizzo, vengono sottoposte a diversi trattamenti:

- sistemi di lavaggio (con acqua) per migliorare la prestazione ambientale delle scorie, perché si è visto che il lavaggio ha un influenza positiva sul futuro rilascio di sostanze indesiderate. Sono stati studiati lavaggi con acidi (acido acetico ed acido cloridrico) per la rimozione del Pb e delle Zn, il lavaggio con acido acetico ha avuto una prestazione migliore in quanto non ha portato in soluzione sostanze indesiderate come Fe e Mg;
- processi volti alla rimozione dei materiali non desiderabili come: metalli ferrosi e non e prevedere quindi il recupero di questi materiali;
- prove di compattazione.

Gli studi condotti⁶ sono molteplici, sia per migliorare le caratteristiche tecniche che per migliorare le prestazioni ambientali. Uno studio ha messo in evidenza come le scorie che provengono dall'incenerimento del CDR presentino caratteristiche migliori: rispetto a quelle provenienti dall'incenerimento dei RU, le prime infatti possono essere utilizzate tal

⁶ Informazioni desunte da articoli pubblicati su: Waste management, Pergamon, Journal of Hazardous materials, Elsevier; gli autori ed i titoli sono riportati in bibliografia.

quali, senza nessun pre-trattamento, comunque il calcestruzzo, preparato con le scorie, presenta una resistenza alla compressione minore del 23% rispetto al calcestruzzo preparato con gli inerti convenzionali.

Uno studio cinese ha evidenziato come la sinterizzazione con temperature comprese tra 400 e 600°C, dopo aver rimosso le impurità grossolane, porti alla produzione di un materiale inerte che incontra gli standard nazionali cinesi (CNS).

Attualmente si sta studiando un eventuale riutilizzo del vetro recuperabile dalle scorie nell'industria delle ceramica.

Sono stati condotti studi sull'eventuale utilizzo dei residui della combustione nella realizzazione di scogliere artificiali.

Nell'estate del 2002 ad Amsterdam, è stato testato un processo di trattamento ad umido; le scorie sono state trattate seguendo lo schema adottato in un impianto di trattamento di suoli contaminati, le scorie così trattate non presentavano più problemi di cessione di sostanze indesiderate, potevano essere utilizzate come materiale di costruzione di qualità ed i materiali non ferrosi recuperati potevano essere venduti, ripagando così in parte i costi di processo.

In Giappone sono stati realizzati blocchi permeabili e mattoni per la pavimentazione stradale da un processo di fusione e vetrificazione dei residui della combustione, questo processo comporta contemporaneamente una riduzione del volume e degli inquinanti e al riutilizzo delle scorie e ceneri.

In Italia le scorie vengono smaltite in discarica, previa verifica che corrispondano ai criteri di ammissibilità in discarica.

Italiano, è lo studio condotto sulla produzione di materiali ceramici a partire dalle scorie vetrificate a 1400°C. Il "vetro", ottenuto dalle scorie, miscelato con altri materiali di scarto (dall'industria metallurgica e minerale) è stato utilizzato come materia prima proprio per la produzione di materiali ceramici.

Le ceneri, come già detto, prima di essere smaltite in discarica, devono comunque essere sottoposte a trattamenti volti a ridurre la concentrazione degli inquinanti e/o ad inglobarli in una matrice che non ne permette il rilascio. le ceneri in genere vengono sottoposte a trattamenti volti a ridurre e/o a immobilizzare la presenza di inquinanti con trattamenti di solidificazione/stabilizzazione, vetrificazione ed estrazione chimica.

La produzione di rifiuti solidi per tonnellata di rifiuto (*Ton_WTE_residue_per_ton*) è pari alla produzione di scorie a cui va sottratta la percentuale recuperata addizionata alla produzione di ceneri derivanti dal sistema di trattamento dei fumi:

$$Ton_WTE_residue_per_ton = Ton_combustion_residue_per_ton * \\ (1 - recovery_rate_from_ash) + Ton_APCE_residue_per_ton$$

Per ottenere la produzione totale basta moltiplicare la produzione di rifiuti solidi per la quantità totale trattata.

Rifiuti liquidi

Rientrano nella presente analisi anche le acque reflue, di entità ben più modesta rispetto ai residui solidi e gassosi visti. Queste provengono principalmente dal raffreddamento delle ceneri e delle scorie, dal trattamento ad umido dei gas della combustione e dal trattamento delle acque di caldaia; nelle prime si rinvencono solidi inerti sospesi, composti organici incombusti e sali solubili quali cloruri e solfati. A sua volta il passaggio dei gas della combustione attraverso uno scrubber ad umido produce, come detto, un miscuglio acquoso acido, per assorbimento dei gas acidi quali HCl, SO₂, SO₃, CO₂ ed NO_x, che può essere ricircolato previa sedimentazione, limitando il suo contenuto di sali e materiale particolato con periodici espurghi. Nel corso dell'esercizio di una caldaia, infine, possono generarsi acqua reflue a seguito sia del trattamento delle acque di alimentazione della caldaia che degli espurghi (cosiddetti *blow-down*) della sezione di raffreddamento. Le acque di alimentazione, infatti, essendo utilizzate per produrre vapore da inviare in una turbina, devono rispondere ad elevati standard di qualità, per quanto concerne in particolare l'alcalinità, il pH e la durezza (contenuto di solidi totali disciolti), che possono essere soddisfatti con sistemi di correzione quali la precipitazione, le resine scambiatrici di ioni e l'osmosi inversa.

In funzione della tipologia del corpo ricettore, vi è da precisare che le acque reflue di un impianto di incenerimento vanno opportunamente trattate, quanto meno ricorrendo a fasi di neutralizzazione e di sedimentazione.

4.7 Biostabilizzazione aerobica/Compostaggio

Spesso si parla impropriamente di compostaggio e stabilizzazione aerobica. Il processo aerobico di degradazione della sostanza organica associata ai rifiuti ad opera di microrganismi in presenza di O_2 è lo stesso che è alla base dei due processi di biostabilizzazione e di compostaggio, quello che cambia è il materiale in ingresso e di conseguenza il materiale in uscita.

Il **compostaggio** è quel processo in cui il materiale in ingresso è il rifiuto organico selezionato (potature, rifiuti organici umidi, raccolta differenziata in particolari utenze, mense, mercati, etc) ed il materiale in uscita è il **compost**, ovvero un materiale rispondente a determinate caratteristiche imposte dalla normativa, utilizzabile per impieghi agronomici date le sue proprietà come ammendante.

Si parla di **biostabilizzazione** quando il materiale in ingresso è la frazione organica putrescibile (FOP) proveniente da un impianto di selezione del residuo della raccolta differenziata e quello che si ottiene in uscita è la **frazione organica stabilizzata** (FOS) un materiale di qualità inferiore che può essere utilizzato come terreno di copertura in discarica o per ripristini ambientali. Tale processo, inoltre, ha come obiettivo la minimizzazione del rischio di emissioni (percolato e biogas) nel caso di smaltimento in discarica.

Il compostaggio consiste in un processo di decomposizione biologica dei rifiuti organici (scarti di cucina, verde di giardino...), in appositi contenitori o in mucchi. Talvolta viene miscelata anche una percentuale di fanghi di depurazione. In ogni caso è necessario avere a monte del processo una sufficiente selezione.

La decomposizione biologica è un fenomeno che avviene naturalmente nel terreno, ad opera di funghi e batteri prima, e di piccoli invertebrati (lombrichi, millepiedi,...).

Nel compostaggio il processo naturale viene accelerato grazie alle condizioni ottimali in cui viene a trovarsi il materiale organico: i microrganismi batterici si moltiplicano e si nutrono più facilmente, facendo raggiungere temperature anche prossime a $60^\circ C$. Al calare della temperatura poi entrano in azione gli invertebrati che completano il processo di decomposizione.

Il compost si dice "**maturo**" quando ha raggiunto la stabilizzazione.

Per la tutela dell'ambiente, dell'utilizzatore e dei consumatori, la normativa ha introdotto dei limiti di accettabilità del compost nonché dei divieti di utilizzo in alcune situazioni. Ad esempio: non può essere impiegato su terreni di colture frutticole dopo l'inizio della fioritura o comunque nei 3 mesi precedenti il raccolto, nelle colture foraggere naturali e nei boschi, sui terreni con pH minore di 6 può essere impiegato nelle colture orticole, nelle colture erbacee industriali e nelle colture foraggere artificiali entro 2 mesi dalla semina, previa lavorazione del terreno e interrimento può essere impiegato nelle coltivazioni arboree ad uso industriale previa lavorazione del terreno ed interrimento può essere impiegato per parchi, giardini, campi da gioco, solo precedentemente alla preparazione del terreno per la semina.

Caratteristiche agronomiche del compost		
parametri	unità di misura	limiti di accettabilità
materiali inerti	% sostanza secca	3
vetri (vaglio)	mm	3
vetri (quantità)	% sostanza secca	3
materie plastiche	% sostanza secca	1
materiali ferrosi	% sostanza secca	0.5
umidità	% sostanza secca	< 45
sostanza organica	% sostanza secca	> 40
sostanza umificata	% sostanza secca	> 20
rapporto C/N		< 30
N totale	% sostanza secca	> 1
P ₂ O ₅	% sostanza secca	> 0.5
K ₂ O	% sostanza secca	> 0.4
granulometria	mm	0.5 ÷ 25

Tabella 4.3 Caratteristiche agronomiche del compost

Limiti di accettabilità del compost		
Parametri	unità di misura	valori limite
Salmonelle	n°/ 50 g	assenti
Semi infestanti	n° /50 g	assenti
pH	unità pH	6 ÷ 8.5
Arsenico	mg/kg sostanza secca	10
Cadmio	mg/kg sostanza secca	10
Cromo III	mg/kg sostanza secca	500
Cromo VI	mg/kg sostanza secca	10
Mercurio	mg/kg sostanza secca	10
Nichel	mg/kg sostanza secca	200
Piombo	mg/kg sostanza secca	500
Rame	mg/kg sostanza secca	600
Zinco	mg/kg sostanza secca	2500

Tabella 4.4 Limiti di accettabilità del compost

Parametri del processo di compostaggio	
Parametri	Valori limite
Rapporto iniziale carbonio/azoto	25 ÷ 50
Rapporto iniziale carbonio/fosforo	75 ÷ 150
Umidità	tra 45% e 55%
Temperatura	50° (65° per un tempo sufficiente a garantire la sicurezza igienica)
pH	6 ÷ 8
Solidi volatili	la quantità d'aria immessa deve essere commisurata alla quantità di solidi volatili (quelli che non si ritrovano come residuo dopo incenerimento).
Aerazione	L'aerazione può essere naturale (con rivoltamento periodico dei cumuli) o artificiale (con sistemi di aerazione meccanica)
Agitazione	Una continua miscelazione della massa in fermentazione consente di omogeneizzare i parametri e la distribuzione dei nutrienti e delle popolazioni batteriche.

Tabella 4.5 Parametri da tenere sotto controllo

Le soluzioni impiantistiche per i processi aerobici sono diverse.

Impianti statici a fermentazione naturale. E' la soluzione più semplice e antica, adatta per piccoli volumi (<100 t/d). Si sistema il materiale selezionato in cumuli, che verranno periodicamente rivoltati (per un numero di volte variabile a seconda dei vari parametri, in pratica ogni volta che la temperatura all'interno del cumulo inizia ad abbassarsi e fintantoché dopo un rivoltamento non si ha più alcun aumento di temperatura). I cumuli hanno una larghezza alla base di $3 \div 5$ m e un'altezza di circa 2,5 m. Vengono rivoltati tramite normali pale meccaniche oppure con apposite macchine che consentono una distribuzione dei cumuli più ravvicinata.

Impianti statici a fermentazione accelerata in aie con aerazione forzata. In questo caso l'aerazione non è naturale ma viene ottenuta tramite insufflazione (o aspirazione) meccanica attorno ai cumuli. E' così possibile operare anche con umidità più elevate, facendo attenzione però a non raffreddare eccessivamente la massa. Se si effettua l'aerazione per insufflazione è bene stendere sui cumuli uno strato di compost maturo di circa 30 cm; se si utilizza l'aspirazione invece, per controllare le emissioni di polveri e odori, è opportuno fare passare l'aria in uscita attraverso un piccolo cumulo di compost maturo. Per evitare fenomeni di impaccamento nei filtri una buona soluzione consiste nell'operare alternativamente per insufflazione ed aspirazione.

Impianti a pre-fermentazione accelerata con maturazione finale in aia. La pre-fermentazione viene realizzata all'interno di bioreattori, quindi il materiale viene estratto e messo in aie di maturazione per completarne la stabilizzazione. I bioreattori possono essere fissi, con meccanismi di movimentazione all'interno (viti di Archimede o bracci rotanti) oppure mobili (cilindri rotanti leggermente inclinati). Il tempo totale necessario alla maturazione del compost è di $4 \div 5$ settimane.

Si possono individuare, in genere, le seguenti fasi in un processo di stabilizzazione biologica aerobica:

1. sezione di ricezione, alimentazione e selezione di rifiuti grezzi
2. miscelazione ed omogeneizzazione dei flussi dei rifiuti (alimentazione dei reattori o AIE)
3. fase di digestione aerobica (stabilizzazione o compostaggio)
4. raffinazione e mobilitazione del compost/FOS

4.7.1 Analisi dei costi

Costi capitali

I costi annuali dell'impianto (*annual_cost*) sono dati da:

$$annual_cost = CRF * capital_cost + annual_operating_cost$$

CRF: costo capitale ammortizzato, funzione del tasso di interesse e della vita utile dell'impianto.

$$CRF = \frac{1}{(1+i)^n}$$

i: tasso di interesse

n: vita utile dell'impianto

capital_cost= costi capitali. Tale voce comprende i costi di costruzione, di acquisizione del sito, i costi di progettazione ed i costi per l'acquisto dei macchinari necessari.

$$capital_cost = constr_cost + land_cost + engr_cost + equip_cost$$

I costi di costruzione (*constr_cost*) includono i costi relativi agli edifici (*build_cost*), alla preparazione del terreno (*grad_cost*), alla pavimentazione (*pav_cost*), alle strade di accesso (*pav_cost*) ed alla recinzione (*fenc_cost*).

$$constr_cost = grad_cost + pav_cost + fenc_cost + build_cost$$

Dove:

$$grad_cost = grad_unit_cost * (fac_area - buffer_area_model)$$

l'area di rispetto non viene inserita tra i costi di preparazione del terreno in quanto non viene gradata.

$$pav_cost = \left[pav_1 * (compost - pad) + pav_2 * \left(stag_area + road_area_model + cur_pad + rej_area \right) \right]$$

Dove:

stag_area= piazzale [m²]

raod_area= strade di accesso [m²]

cur_pad= area di maturazione [m²]

rej_area= area adibita allo stoccaggio dei rifiuti solidi [m³]

pav_1= costo unitario per pavimentare con asfalto 2" e ghiaia 8"

pav_2= costo unitario per pavimentare con asfalto 4" e ghiaia 8"

$$fenc_cost = fenc_unit_cost * fac_peri_model$$

fenc_unit_cost= costo unitario di recinzione [€/m]

fac_peri_model= perimetro dell'impianto [m]

$$build_cost = off_unit_cost * office_area + build_unit_cost1 * stag_area + build_unit_cost2 * (compost_pad + cur_area)$$

off_unit_cost= costo unitario per la costruzione degli uffici, compresa la pavimentazione

build_unit_cost1= costo unitario per la costruzione degli eventuali capannoni

build_unit_cost2= costo unitario per la costruzione del padiglione adibito al compostaggio

$$land - cost = land_unit_cost * fac_area$$

land_unit-cost= costo del terreno

$$engr_cost = perc_cost * constr_cost$$

perc_cost= percentuale dei costi di costruzione attribuibile ai costi di progettazione, di consulenza tecnica ed amministrativi relativi alla costruzione. In genere 15%.

I costi per l'acquisto e l'installazione dei macchinari necessari sono ottenuti come somma dei singoli costi d'acquisto dei macchinari e dei costi di installazione calcolati come una percentuale sul costo d'acquisto (10%).

$$equip_cost = eqp_cost + eqp_inst_cost$$

$$eqp_cost = turner_cost + hammer_cost + grinder_cost + \\ trommel_cost + FEL_cost + bobcat_cost + odor_cap_cost$$

$$eqp_inst_cost = 10\% * eqp_cost$$

Costi di gestione

I costi di gestione includono i costi del lavoro, del management, le spese generali, le spese di manutenzione dei macchinari e degli edifici, i consumi (elettrici, idrici) e sono trovati con la seguente formula:

$$oper_cost = labor_cost + overhead_cost + mang_cost + \\ + mainten_cost + fuel_cost + util_cost - salv_bnf$$

Dove:

i costi del lavoro (*labor_cost*) sono funzione del numero di addetti che può essere correlato con il numero di tonnellate/giorno trattate.

$$labour_cost = wage_empl * oper_hrs * oper_days * num_empl$$

le spese generali (*overhead_cost*) sono calcolati come una frazione del costo del lavoro, rientrano in tale voce: le spese assicurative, le forniture per gli uffici, gli straordinari ed altri servizi.

$$overhead_cost = 40\% * labor_cost$$

anche i costi del management (*manag_cost*) sono stati calcolati come una percentuale del costo del lavoro

$$manag_cost = 15\% * labor_cost$$

i costi di manutenzione (*mainten_cost*) dipendono dal tipo di macchinario e variano con esso pertanto non è possibile presentare un'equazione generale che li racchiuda tutti.

i costi relativi al consumo di carburante (*fuel-cost*) sono pari:

$$fuel_cost = fuel_cons * oper_hrs * oper_days * diesel_cost$$

fuel_cons = consumi di carburante giornaliero da parte dei motori alimentati a diesel

i costi totali per i consumi (*util-cost*) sono pari a:

$$util_cost = (electr_equip + electr_buld) * electr_unit_cost + gas_build * gas_unit_cost$$

Qualora si tratti di un impianto di compostaggio il quale poi vende il prodotto finale, il compost, ai costi vanno sottratti questi guadagni derivanti dalla vendita (*salv_bnf*)

$$salv_bnf = mass_u * salv_unit_bnf * oper_days$$

mass_u è la massa di compost prodotta

salv_unit_bnf è il prezzo medio per tonnellata di compost

4.7.2 Analisi degli impatti ambientali

In un impianto di stabilizzazione aerobica le emissioni ambientali dirette prodotte sono principalmente dovute:

- alla combustione dei combustibili fossili necessari
- ai prodotti gassosi correlate ai processi di biodegradazione.

La massa totale annuale dei sei inquinanti prodotti dalla combustione del diesel è stata calcolata utilizzando la formula seguente ed i fattori di emissione espressi nella tabella 2.7.2.1:

$$diesel_poll = \left(\begin{matrix} turner_hp * coeff_i_pll + tubgrinder_hp * coeff_poll_i + \\ fel_hp * coeff_poll_i + bobcat_hp * coeff_poll_i \end{matrix} \right) * oper_hrs * oper_days$$

Veicolo	HC	CO	NO _x	PM	SO _x	Aldeidi
FEL/bobcats	0.6	2.4	10	0.66	0.85	0.1
Tub grinder	1.22	5	8	0.825	0.93	0.06
Windrow turner	2.21	6.85	10.5	n/d	n/d	n/d

Tabella 4.1 Fonte USEPA, 1991, Nonroad Engine and Vehicle Emission Study- Appendixes (ANR-443), 21A-2001, Office of air and radiation

Le emissioni associate al processo di compostaggio sono dovute alla biodegradazione del materiale organico e portano alla produzione di CO₂, NH₃ prodotti intermedi gassosi e sottoprodotti liquidi. Si sta studiando la produzione delle emissioni di CO₂, NH₃ e VOC_s come funzione lineare della perdita in peso secco del componente individuale.

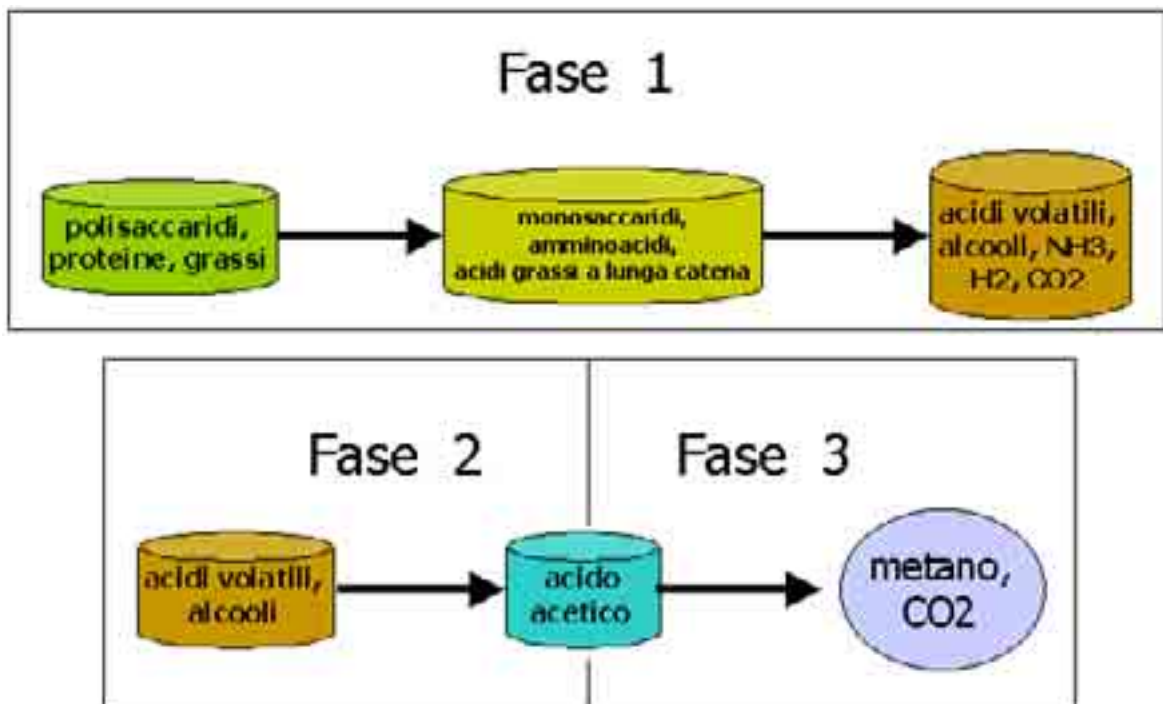
4.8 Digestione anaerobica

Per digestione anaerobica si intende il processo biologico di stabilizzazione di un substrato organico putrescibile condotto in uno o più reattori controllati, in assenza di ossigeno, la presenza di ossigeno e metano potrebbe portare ad esplosioni, attraverso idrolisi, metanogenesi e acidogenesi della frazione biodegradabile del substrato. Lo scopo del processo è quello di ottenere una stabilizzazione del rifiuto e contemporaneamente un recupero energetico.

Nel processo anaerobico la decomposizione avviene in assenza di ossigeno e con formazione di metano. Anche in questo caso la digestione è operata da alcuni microrganismi che convertono sostanze organiche complesse in composti più semplici come CH_4 , CO_2 , NH_3 ed H_2S .

Nel processo si distinguono 3 fasi:

1. fermentativa o di acidificazione
2. acetogenica
3. metanigena



Per la sopravvivenza dei batteri è essenziale tenere controllato il pH

I processi anaerobici possono essere a fasi separate se si utilizza un reattore per la fase 1 e un diverso reattore per le fasi 2 e 3. In questo modo si può ottimizzare la produzione di metano variando l'alimentazione in ingresso al secondo reattore.

I sistemi a fasi riunite sono suddivisi in quelli a umido, a secco e a semisecco. Nei primi la frazione organica è in soluzione acquosa ($5 \div 10\%$ di solidi) e i carichi che si possono trattare in questo modo risultano piuttosto ridotti, con aumento dei costi. Nel sistema a secco in realtà la materia è in fase semisolida ($\text{secco} > 25\%$) e si riescono a realizzare carichi di funzionamento più elevati. Si possono ottenere fino a 90 m^3 di metano per tonnellata di RSU. I reattori semisecco sono reattori convenzionali in cui si opera in condizioni termofile e al limite di concentrazione di solidi permesso dall'impianto.

Il processo ha molti svantaggi, in primo luogo la realizzazione di un digestore anaerobico è molto costosa. D'altra parte, il prodotto solido può essere utilizzato come fertilizzante e il gas metano prodotto può essere usato per la produzione di elettricità o di acqua calda e pompato nel sistema di riscaldamento della comunità. Questo permette di realizzare un sistema di riscaldamento per la comunità locale allo stesso tempo conveniente e rispettoso dell'ambiente.

C'è un grande impegno della ricerca per progettare un digestore anaerobico che soddisfi tutti i requisiti di efficacia ed economicità.

La digestione anaerobica, come detto, è un processo biologico complesso attraverso il quale, in assenza di ossigeno, la sostanza organica viene trasformata in biogas o gas biologico, costituito principalmente da metano e anidride carbonica. La percentuale di metano nel biogas varia a seconda del tipo di sostanza organica alimentata e dalle condizioni di processo, da un minimo del 50% fino all'80% circa. Poiché la digestione anaerobica può essere considerata anche come un processo di trattamento di inquinanti, le condizioni del processo possono essere scelte per realizzare la massima resa di depurazione o la massima resa di prodotti energetici. In genere, le materie prime utilizzabili sono residui zootecnici, dell'industria agro-alimentare, acque e fanghi reflui, ecc..

Si tratta di un processo integrato, che presenta una serie di vantaggi di tipo energetico, ambientale e agricolo così riassumibili:

- produzione di energia da fonte rinnovabile;
- miglioramento dell'economia delle aziende zootecniche e/o agricole;

- minori emissioni di gas-serra; migliore qualità dei fertilizzanti prodotti;
- riciclaggio economico dei rifiuti, con ricaduta positiva sull'impatto ambientale;
- minore inquinamento da odori e ridotta presenza di insetti;
- miglioramento delle condizioni igienico-sanitarie dell'azienda.

In un impianto di digestione anaerobica si possono individuare le seguenti sezioni:

1. Ricezione
2. Pretrattamento
3. Preparazione del substrato
4. Digestione anaerobica in reattori (fasi riunite o fasi separate)
5. Produzione di biogas ed energia
6. Disidratazione del substrato digerito
7. Bio-ossidazione accelerata
8. Post-maturazione
9. Raffinazione
10. Stoccaggio

I possibili impatti ambientali diretti che questo tipo di impianto genera sono:

- produzione di percolato
- emissioni odorigene
- generazione di biogas
- produzione di rifiuti solidi
- viabilità

4.8.1 Analisi dei costi

Costi capitali

I costi annuali dell'impianto (*annual_cost*) sono dati da:

$$annual_cost = CRF * capital_cost + annual_operating_cost$$

CRF: costo capitale ammortizzato, funzione del tasso di interesse e della vita utile dell'impianto.

$$CRF = \frac{1}{(1+i)^n}$$

i: tasso di interesse

n: vita utile dell'impianto

capital_cost= costi capitali. Tale voce comprende i costi di costruzione, di acquisizione del sito, i costi di progettazione ed i costi per l'acquisto dei macchinari necessari.

$$capital_cost = constr_cost + land_cost + engr_cost + equip_cost$$

I costi di costruzione (*constr_cost*) includono i costi relativi agli edifici (*build_cost*), alla preparazione del terreno (*grad_cost*), alla pavimentazione (*pav_cost*), alle strade di accesso (*pav_cost*) ed alla recinzione (*fenc_cost*).

$$constr_cost = grad_cost + pav_cost + fenc_cost + build_cost$$

Dove:

$$grad_cost = grad_unit_cost * (fac_area - buffer_area_model)$$

l'area di rispetto non viene inserita tra i costi di preparazione del terreno in quanto non viene gradata.

$$pav_cost = \left[pav_1 * (compost - pad) + pav_2 * \left(stag_area + road_area_model + cur_pad + rej_area \right) \right]$$

Dove:

stag_area= piazzale [m²]

raod_area= strade di accesso [m²]

cur_pad= area di maturazione [m²]

rej_area= area adibita allo stoccaggio dei rifiuti solidi [m³]

pav_1= costo unitario per pavimentare con asfalto 2" e ghiaia 8"

pav_2 = costo unitario per pavimentare con asfalto 4" e ghiaia 8"

$$fenc_cost = fenc_unit_cost * fac_peri_model$$

$fenc_unit_cost$ = costo unitario di recinzione [€/m]

fac_peri_model = perimetro dell'impianto [m]

$$build_cost = off_unit_cost * office_area + build_unit_cost1 * stag_area + build_unit_cost2 * (compost_pad + cur_area)$$

off_unit_cost = costo unitario per la costruzione degli uffici, compresa la pavimentazione

$build_unit_cost1$ = costo unitario per la costruzione degli eventuali capannoni

$build_unit_cost2$ = costo unitario per la costruzione del digestore (o digestori)

$$land_cost = land_unit_cost * fac_area$$

$land_unit_cost$ = costo del terreno

$$engr_cost = perc_cost * constr_cost$$

$perc_cost$ = percentuale dei costi di costruzione attribuibile ai costi di progettazione, di consulenza tecnica ed amministrativi relativi alla costruzione. In genere 15%.

I costi per l'acquisto e l'installazione dei macchinari necessari sono ottenuti come somma dei singoli costi d'acquisto dei macchinari e dei costi di installazione calcolati come una percentuale sul costo d'acquisto (10%).

$$equip_cost = eqp_cost + eqp_inst_cost$$

$$eqp_cost = turner_cost + hammer_cost + grinder_cost + \\ trommel_cost + FEL_cost + bobcat_cost + odor_cap_cost$$

$$eqp_inst_cost = 10\% * eqp_cost$$

Costi di gestione

I costi di gestione includono i costi del lavoro, del management, le spese generali, le spese di manutenzione dei macchinari e degli edifici, i consumi (elettrici, idrici) e sono trovati con la seguente formula:

$$oper_cost = labor_cost + overhead_cost + mang_cost + \\ + mainten_cost + fuel_cost + util_cost - salv_bnf$$

Dove:

i costi del lavoro (*labor_cost*) sono funzione del numero di addetti che può essere correlato con il numero di tonnellate/giorno trattate.

$$labour_cost = wage_empl * oper_hrs * oper_days * num_empl$$

le spese generali (*overhead_cost*) sono calcolati come una frazione del costo del lavoro, rientrano in tale voce: le spese assicurative, le forniture per gli uffici, gli straordinari ed altri servizi.

$$overhead_cost = 40\% * labor_cost$$

anche i costi del management (*manag_cost*) sono stati calcolati come una percentuale del costo del lavoro

$$manag_cost = 15\% * labor_cost$$

i costi di manutenzione (*mainten_cost*) dipendono dal tipo di macchinario e variano con esso pertanto non è possibile presentare un'equazione generale che li racchiuda tutti.

i costi relativi al consumo di carburante (*fuel-cost*) sono pari:

$$fuel_cost = fuel_cons * oper_hrs * oper_days * diesel_cost$$

fuel_cons=consumi di carburante giornaliero da parte dei motori alimentati a diesel

i costi totali per i consumi (*util-cost*) sono pari a:

$$util_cost = (electr_equip + electr_buid) * electr_unit - cost \\ + gas - build * gas - unit_cost$$

4.8.2 Analisi degli impatti ambientali

In un impianto di stabilizzazione anaerobica le emissioni ambientali dirette prodotte sono principalmente dovute:

- ai prodotti gassosi correlate ai processi di digestione, si verifica infatti la produzione di biogas, il quale peraltro può essere sottoposto a recupero energetico.

4.9 Discarica

La discarica controllata è un impianto semplice ma contemporaneamente estremamente complesso. Semplice dal punto di vista delle modalità costruttive, in quanto riguardano il campo classico delle costruzioni in terra, complesso perché la discarica ha un'evoluzione temporale di circa 30 anni, pertanto se non viene progettata e realizzata in maniera idonea si può verificare una migrazione spaziale/temporale, degli inquinanti ad altri comparti ambientali. Gli impianti a tecnologia complessa sembrerebbero dare maggiori garanzie per quanto riguarda il confinamento degli inquinanti.

Costruttivamente, la discarica controllata è un invaso, impermeabilizzato al fine di evitare che il percolato possa migrare negli strati sottostanti, dotato di copertura superficiale al fine di evitare fenomeni di ruscellamento. La discarica non è un sistema isolato, ma è percorsa da una serie di reti per la captazione del percolato e del biogas derivanti dalla degradazione della sostanza organica.

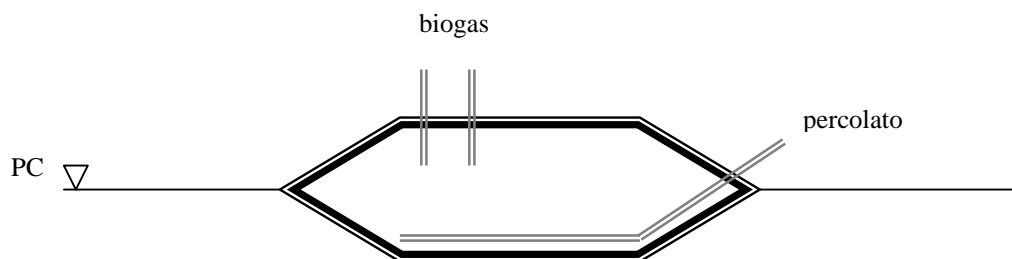


Figura 4.6 Schematizzazione di una discarica

I problemi che il progettista⁷ deve affrontare sono:

1. Realizzare un sistema di impermeabilizzazione del fondo, degli argini e superficiale
2. Regolare le acque per evitare l'aumento di produzione del percolato
3. Realizzare un sistema di captazione del Biogas
4. Controllare i cedimenti
5. Prevedere il ripristino ambientale dell'area

La recente normativa prevede il superamento delle discariche come metodo di smaltimento degli RSU. Recita infatti il decreto Ronchi: *Dal 1° gennaio 2000 è consentito smaltire in discarica solo i rifiuti inerti, i rifiuti individuati da specifiche norme tecniche*

⁷ Comitato Tecnico Discariche (CTD) Linee Guida per le discariche controllate di rifiuti solidi urbani.

ed i rifiuti che residuano dalle operazioni di riciclaggio, di recupero e di smaltimento di cui ai punti D2, D8, D9, D10 e D11 di cui all'allegato B. Per casi di comprovata necessità e per periodi di tempo determinati il Presidente della regione, d'intesa con il Ministro dell'ambiente, può autorizzare lo smaltimento in discarica nel rispetto di apposite prescrizioni tecniche e delle norme vigenti in materia.

Le problematiche connesse alla realizzazione di una discarica sono legate a:

- impatto ambientale
- impermeabilizzazione
- controllo e raccolta delle emissioni (gas e percolato)
- chiusura e recupero della discarica

Impatto ambientale. Le discariche sono tra le infrastrutture sottoposte a V.I.A. (Valutazione di Impatto Ambientale). In particolare: se hanno una capacità superiore a 100.000 metri cubi se ricadono anche solo parzialmente in aree protette, qualunque sia la loro capacità.

Impermeabilizzazione. E' certamente l'aspetto più importante nella realizzazione della discarica. La discarica deve risultare un sistema isolato rispetto al terreno su cui è posta, affinché il percolato non possa penetrare all'interno delle falde acquifere o in corsi d'acqua superficiali. Si deve procedere quindi ad impermeabilizzazione del fondo e delle pareti.

Impermeabilizzazione del fondo. E' sempre consigliabile posizionare la discarica in terreni impermeabili (strati argillosi-limosi della potenza di qualche metro). Quando ciò non è possibile o la potenza dello strato non è sufficiente si fa ricorso a materiali artificiali (geomembrane), che possono essere di PEAD, PVC o PP, inattaccabili dalla maggior parte degli agenti chimici presenti nei liquami. Vengono forniti in rotoli che poi sono assemblati per saldatura sul campo. Sopra il primo telo viene posto uno strato drenante di sabbia, nel quale sono posate tubazioni di raccolta di eventuale percolato che dovesse superare il secondo telo più superficiale (servono quindi a segnalarne la rottura). Sopra la sabbia è posto appunto il secondo altro telo impermeabile. Al di sopra di quest'ultimo c'è un nuovo strato drenante contenente la rete di raccolta del percolato.

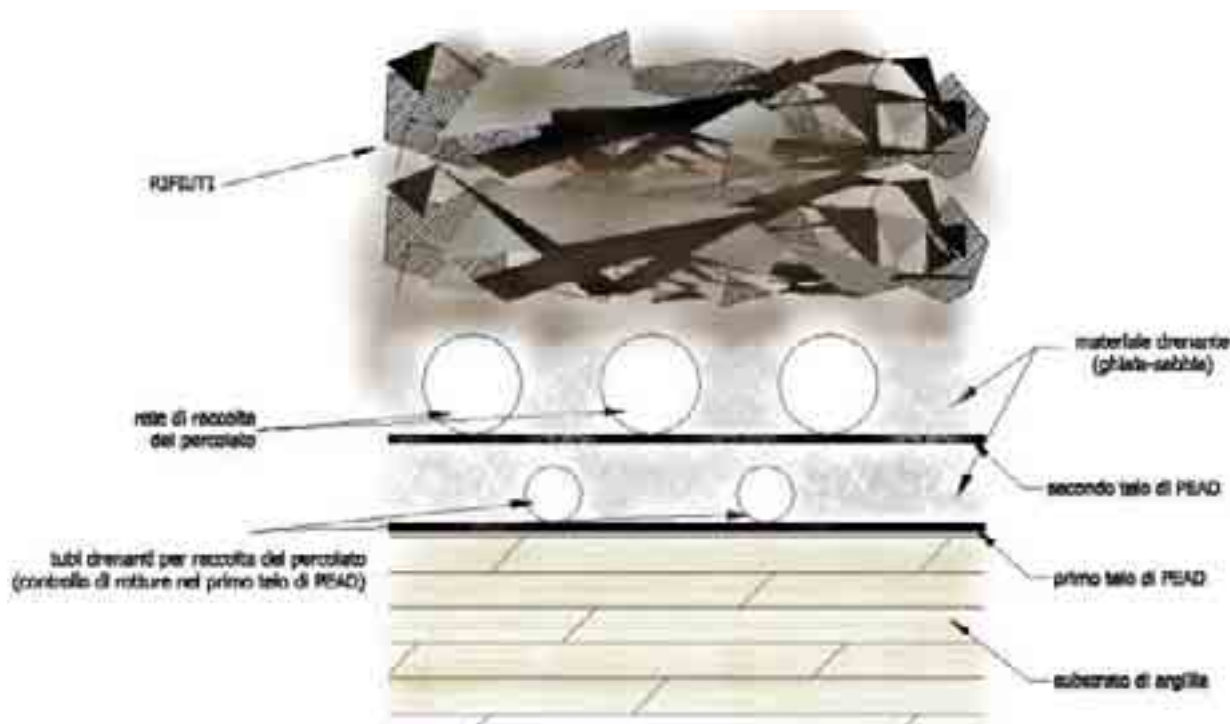


Figura 4.7 Schema dell' impermeabilizzazione del fondo della discarica

Impermeabilizzazione delle pareti Analogamente al fondo, anche le pareti della discarica vanno impermeabilizzate, sfruttando le caratteristiche dei geotessili, che ben si adattano anche a pendenze elevate.

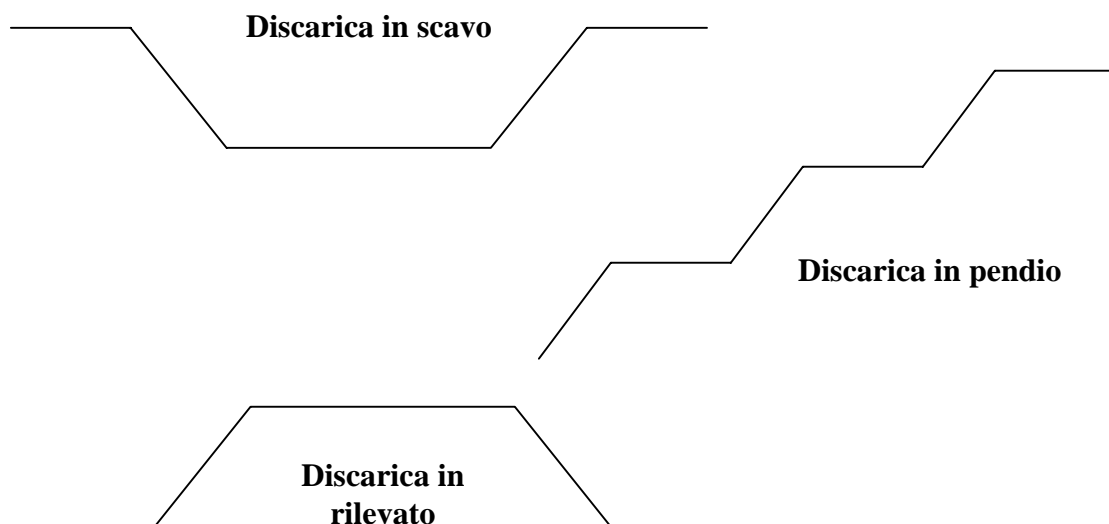
Controllo e raccolta delle emissioni percolato Nella rete di raccolta del percolato le tubazioni drenanti sono disposte secondo linee di compluvio, hanno andamento rettilineo, pendenza 1% circa e confluiscono all'esterno dell'area della discarica in una tubazione ispezionabile, posta generalmente in un cunicolo in cemento armato. Il percolato raccolto viene raccolto in serbatoi per essere poi inviato ad idonei impianti di trattamento. A fine vita la superficie della discarica verrà coperta ed impermeabilizzata, in modo da impedire o comunque ridurre drasticamente l'apporto di acque meteoriche e quindi ridurre la produzione del percolato. Sotto il la prima rete di raccolta è situata, come visibile in figura, la rete di controllo, costruita analogamente alla prima. Essa serve sia per il controllo di eventuali perdite nel telo superiore, e per la raccolta delle stesse.

Biogas. I processi di decomposizione della materia organica contenuta nei rifiuti producono il biogas, composto principalmente da metano e da CO₂. I rischi legati alla presenza di biogas sono dovuti sia alla sua dispersione in aria o nel terreno, sia al suo accumulo in sacche, potenzialmente esplosive. E' necessario perciò disporre una rete di captazione del biogas su tutto il corpo della discarica attraverso appositi pozzi di

aspirazione (tubi verticali in polietilene connessi a turbine e torce di combustione ad alta temperatura)

Chiusura e recupero della discarica. Una volta esaurita la capacità della discarica è opportuno prevedere un recupero del sito per adibirlo ad esempio ad usi ricreativi. In genere vengono realizzati dei parchi, in quanto le scarse caratteristiche geotecniche del terreno (costituito dall'accumulo di rifiuti) non consentono la costruzione di edifici. E' necessario provvedere innanzitutto all'impermeabilizzazione superficiale, ma anche le reti di raccolta del percolato e del biogas vanno mantenute efficienti negli anni. Sarà poi realizzato un manto vegetale erboso o boschivo per completare la rinaturalizzazione dell'area.

Si presentano tre tipologie di discariche:



Dove si può si preferisce realizzare le discariche in pendio o in scavo, ovviamente esistono anche delle discariche con caratteristiche intermedie.

La normativa (D.Lgs 13/01/2003 e il D.M. del 13/03/2003) prevede tre tipologie di discarica, in base alle caratteristiche del rifiuto in ingresso:

- Discariche per inerti
- Discariche per rifiuti non pericolosi
- Discariche per rifiuti pericolosi

4.9.1 Analisi dei costi

I costi relativi ad una discarica sono stati divisi in tre componenti: costi capitale, costi di gestione e manutenzione, ricavi ottenuti dal recupero di energia dal biogas.

Costi capitale

I costi capitale includono i costi di progettazione, realizzazione dell'invaso, impermeabilizzazione (posa in opera del terreno a bassissima permeabilità, posa in opera del manto in HDPE, posa in opera del geotessile), realizzazione delle reti di captazione del biogas e del percolato, acquisizione dei macchinari necessari all'esercizio della discarica

Costi di gestione e manutenzione

I costi di gestione e manutenzione comprendono i costi relativi al lavoro, la copertura giornaliera dell'abbanco di rifiuti, spese generali, tasse, amministrazione, assicurazioni, costi indiretti, costi relativi al combustibile ausiliario, costi di manutenzione e i costi relativi al ripristino ambientale.

Tali costi non tengono in considerazione del guadagno derivante dal recupero energetico.

Ricavo dal recupero energetico del biogas

I ricavi relativi al recupero energetico possono essere visti in termini di risparmio qualora si utilizzi il biogas come combustibile alternativo per la produzione di energia elettrica necessaria alla gestione della discarica o come ricavo ottenuto utilizzando il biogas per alimentare gli automezzi adibiti alla raccolta, ad esempio.

4.9.2 Analisi degli impatti ambientali

Energia

I consumi energetici sono quelli relativi agli uffici ed ai sistemi di pompaggio del percolato del biogas e del condensato da biogas, mentre i consumi di carburante sono imputabili agli automezzi necessari alla movimentazione dei rifiuti.

Emissioni in atmosfera

La degradazione della sostanza organica porta alla formazione di biogas, un gas formato principalmente da metano ed anidride carbonica, con presenza di anidride solforosa, questo gas dopo essere stato depurato da sostanze indesiderate può essere

Biogas purificato

Gas proveniente dalla decomposizione di massa biologica (p.e. compostaggio, rifiuti organici) e in seguito trattato per eliminare componenti indesiderate (altri gas). Il processo di purificazione rende la qualità di questo gas simile al metano (gas naturale).

Inquinanti idrici

Le principali fonti di inquinamento idrico sono legate alla produzione di percolato e di condensato del biogas,

Capitolo 5

SWFO-LCA: software LCA applicato alla gestione integrata dei rifiuti

Il modello SWFO-LCA, sia in fase progettuale che decisionale, è sviluppato allo scopo di fornire uno strumento valido di supporto al processo decisionale nell'ambito di un approccio integrato della gestione dei rifiuti urbani.

Il problema dello smaltimento dei rifiuti solidi prodotti in ambito urbano appare, difatti, assai complesso e la corretta soluzione deve essere adottata tramite analisi e scelte comuni per l'intero territorio oggetto di gestione e studio.

Il modello presuppone lo studio di possibili scenari che vanno determinati in fase di pianificazione e che tengono conto dello stato di fatto del sistema, delle condizioni naturali, sociali, economiche e tecnologiche del territorio interessato e del suo potenziale e necessario sviluppo.

SWFO-LCA rappresenta uno strumento di analisi metodologica strutturato a scala di bacino, esportabile a qualsiasi realtà territoriale, sia in fase di pianificazione che di gestione, ed è finalizzato sia all'ottimizzazione della ripartizione dei flussi all'interno di un sistema integrato di gestione dei RU, mediante la minimizzazione di una funzione obiettivo che contiene i costi complessivi ed i ricavi derivanti dalle scelte gestionali e progettuali sia alla valutazione degli impatti associati al trattamento di tali flussi.

Tramite l'ambiente di sviluppo Visual Basic e semplici procedure atte ad estendere l'utilizzo del programma anche ad utenti meno esperti, il software SWFO-LCA assurge a strumento di facile utilizzo, senza tuttavia perdere in completezza e complessità in merito alle problematiche che si prefigge di analizzare. L'enorme potenzialità dell'ambiente Visual Basic, unita all'automazione delle procedure, consente la creazione di pressoché qualunque scenario a scala territoriale, provinciale e regionale, fornendo inoltre una buona flessibilità nell'inserimento delle caratteristiche in input al sistema oggetto di studio.

Il modello permette, in particolare, in una prima fase la determinazione della soluzione che, come più sopra detto, minimizza i costi relativi allo smaltimento dei rifiuti, e fornisce una ripartizione ottimale dei flussi di rifiuto stessi secondo la ben nota

tecnica di programmazione lineare che va sotto il nome di algoritmo del Simplexso (sviluppato da G.B.Danzig).

Da tale condizione scaturisce un ben definito scenario di produzione, smaltimento e recupero di rifiuti nell'intero territorio, scenario che viene successivamente valutato dal punto di vista ambientale secondo la metodologia LCA. Il software SWFO-LCA, infatti, evidenzia in appositi elaborati, sia in forma numerica che grafica, i principali risultati tecnico-economici della gestione e i principali impatti potenziali, analizzati secondo indici di impatto tipici della metodologia EDIP, derivanti dallo scenario di gestione integrata dei RU in esame, fornendo così un quadro quanto mai completo della problematica esaminata.

La versione attuale (SWFO-LCA) del modello, seppur ancora abbastanza complessa per quanto riguarda l'ingente mole di dati e dei risultati rappresentati, appare già configurata per l'utilizzo in Amministrazioni, Enti, Gruppi di Lavoro, etc. che vogliano testare, valutare e simulare processi di gestione integrata dei RU a scala provinciale-regionale.

Il software SWFO-LCA può essere rappresentato schematicamente (fig. 5.1) secondo tre step:

1. **Inserimento dati:** tale fase è costituita dall'inserimento dei dati necessari per creare e configurare lo scenario di gestione integrata dei RU per il territorio in esame, si effettua esclusivamente, mediante l'ausilio anche di procedure automatizzate, come specificato più nel dettaglio nel manuale d'uso, attraverso la compilazione – da eseguire rigorosamente nell'ordine indicato – dei moduli “Dati Generali”, “Dati Impiantistici”, “Dati LCA”;
2. **Lancio del programma:** sfruttando ben nota tecnica di programmazione lineare del Simplexso, consente l'ottimizzazione dei flussi e dei costi di gestione;
3. **Lettura dei risultati:** l'utente può effettuare un'analisi dello scenario di gestione da molteplici punti di vista ed in particolare secondo gli aspetti tecnico-economici valutandoli nel foglio “Risultati” e nei fogli di lavoro di ogni località e riassuntivo per il territorio, e secondo l'aspetto ambientale mediante la metodologia LCA i cui risultati sono definiti nei fogli “LCI”, “Compostaggio”, “Discarica”, “Incenerimento”, “Impatti INC”, “Trasporti”, ed “LCIA”.

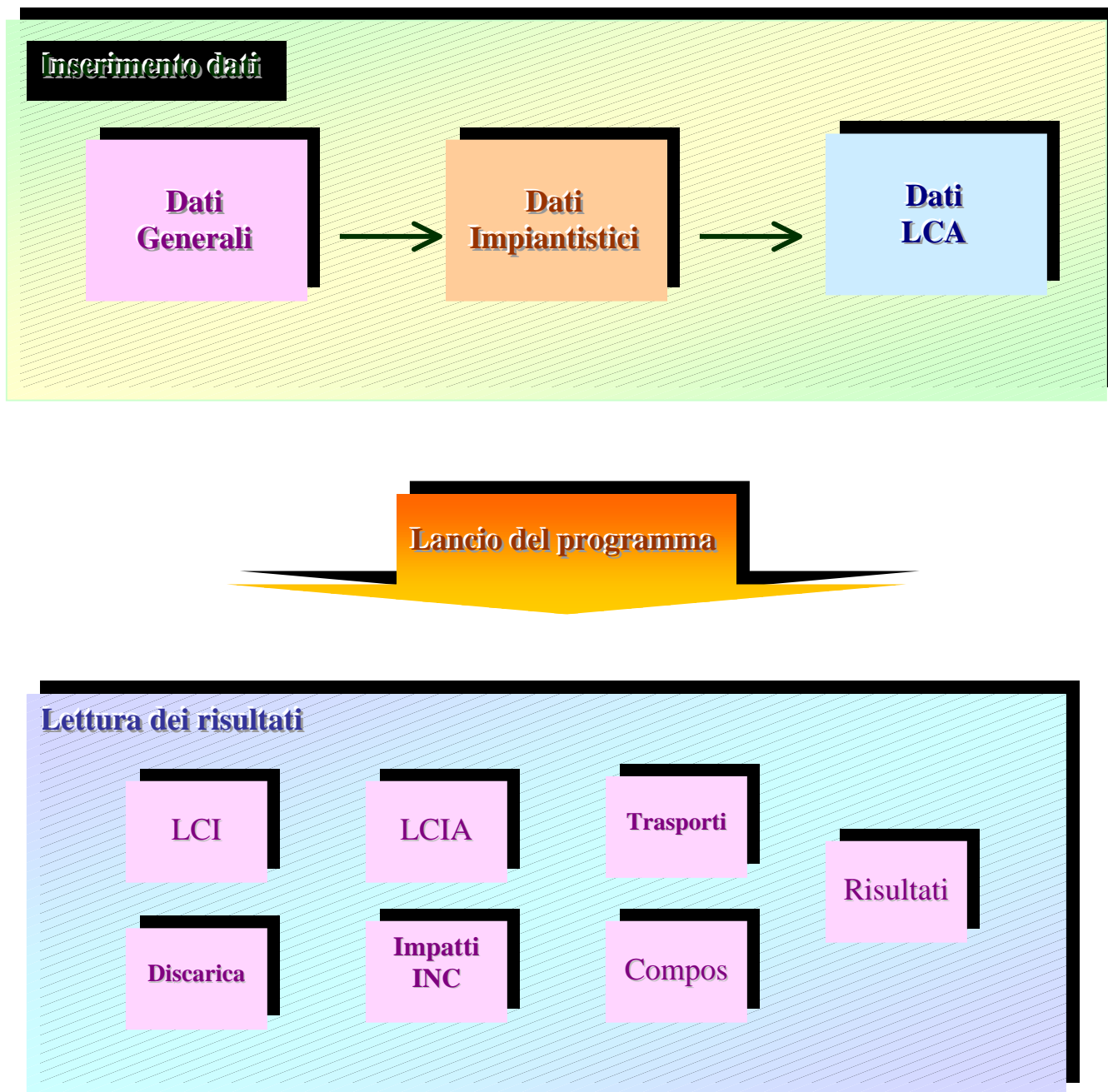


Figura 5.1 Schema operativo del software SWFO-LCA

Nelle figure seguenti sono mostrati i fogli di inserimento dei dati (Foglio Dati Generali, Foglio Dati Impiantistici, Foglio Dati LCA) ed i fogli relativi alla lettura dei risultati.

1. COMPOSIZIONE MEDIA DEL RIFIUTO LOCALE (%)

Indicare la tipologia e la percentuale del rifiuto in esame nel territorio di studio

Rifiuto	Tipologia	Tipologia 1	Tipologia 2
Carta	Carta	22.00	
Vetro	Vetro	13.00	
Plastica	Plastica	11.00	
Metalli	Metalli	3.00	
Legno/Tessile	Legno/Tessile	7.00	
Altri	Altri	31.00	
Altri	Altri	3.00	
TOTALE		100.00	

2. DATI DI RACCOLTA DIFFERENZIATA (%) SUI RIFIUTI TOTALI

Indicare la tipologia e la percentuale del rifiuto in esame nel territorio di studio

Rifiuto	Tipologia	Tipologia 1	Tipologia 2	Tipologia 3
Carta	Carta	0.00	1.00	1.00
Vetro	Vetro	0.00	2.00	2.00
Plastica	Plastica	1.00	0.00	0.00
Metalli	Metalli	0.00	1.00	0.00
Legno/Tessile	Legno/Tessile	1.00	0.00	0.00
Altri	Altri	5.00	10.00	10.00
Altri	Altri	0.00	1.00	1.00
TOTALE		17.00	14.00	13.00

3. COMUNI PRESENTI NEL TERRITORIO DI ESAME

Indicare i comuni presenti nel territorio di studio

Comune	Tipologia	Tipologia 1	Tipologia 2
Carta	Carta	1.00	0.00
Vetro	Vetro	0.00	0.00
Plastica	Plastica	0.00	0.00
Metalli	Metalli	0.00	0.00
Legno/Tessile	Legno/Tessile	0.00	0.00
Altri	Altri	0.00	0.00
TOTALE		1.00	0.00

4. Componenti (Kg)

Carta	9000
Vetro	2000
Plastica	34977
Metalli	19671
Legno/Tessile	8899
Altri	8747
Altri	8823
Altri	19671
Altri	8823

5. Costi trattamento (€/Kg)

Trattamento	30000
Trattamento	4000

6. Costi occupazionali (€/Kg/anno)

Trattamento	4130.1
Trattamento	5000
Trattamento	30000
Trattamento	15124
Trattamento	1747
Trattamento	57
Trattamento	720
Trattamento	1204

7. Componenti (%)

Trattamento	23
Trattamento	33
Trattamento	18
Trattamento	22
Trattamento	0
Trattamento	20
Trattamento	0

8. Componenti (%)

Trattamento	23
Trattamento	33
Trattamento	18
Trattamento	22
Trattamento	0
Trattamento	20
Trattamento	0

Fig 5.2 Foglio Dati Generali

Il foglio Dati Generali prevede l'inserimento dei seguenti dati:

- composizione media del rifiuto prodotto in ogni località, è possibile inserire un qualsivoglia numero di tipologie di composizione del RU;
- dati relativi alla raccolta differenziata ovvero la tipologia di raccolta differenziata applicata: monomateriale, multimateriale;
- comuni presenti, il programma calcola direttamente il numero di comune presenti nella provincia in esame, l'utente deve solo inserire nelle ultime due colonne della "Tabella inserimento dati comunali" i dati relativi alla composizione merceologica del rifiuto in esame e la tipologia di raccolta differenziata adottata;
- costi unitari di raccolta, di trattamento del rifiuto, di investimento degli impianti ed i costi occupazionali.

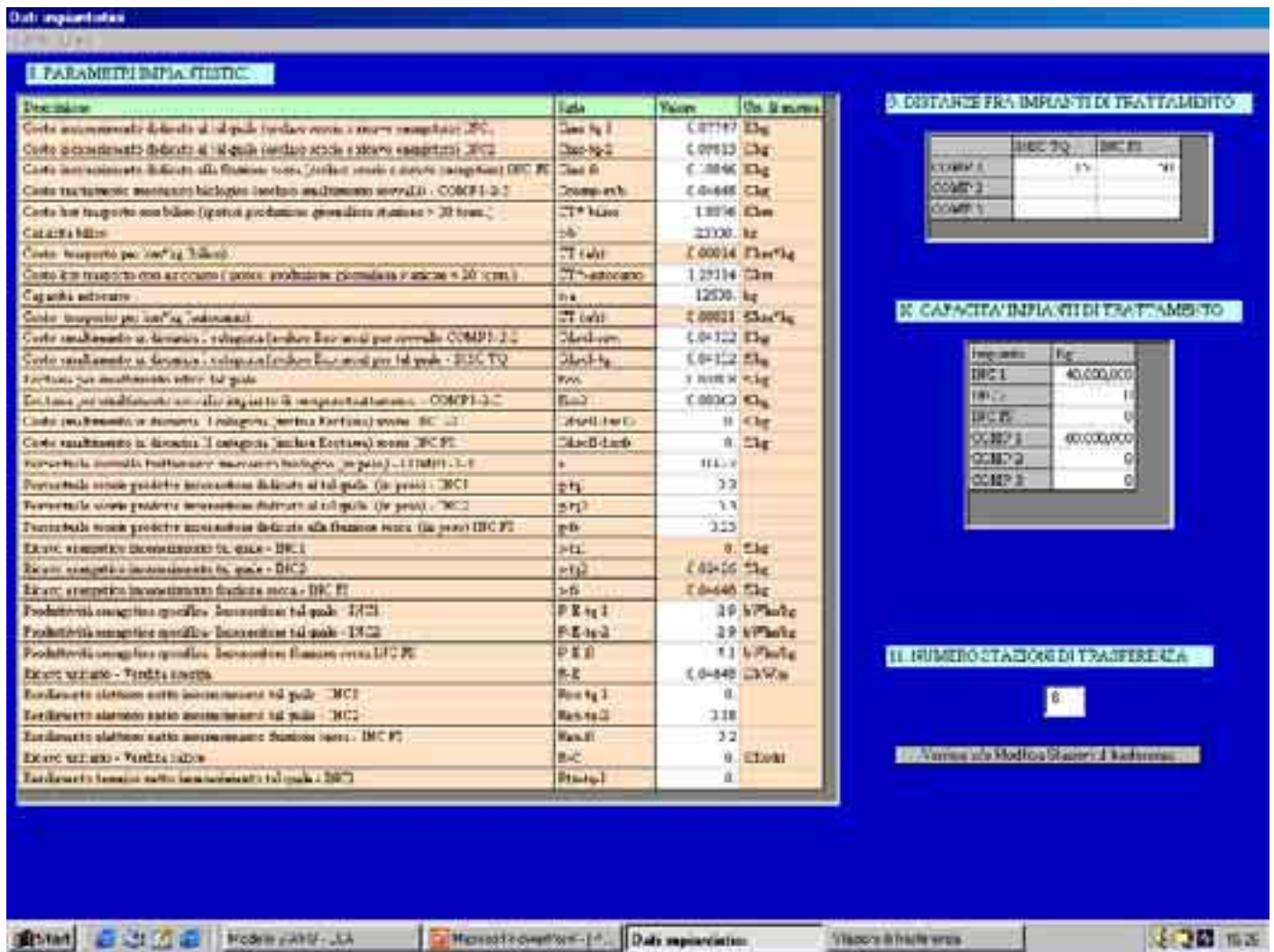


Fig 5.3 foglio dati impiantistici

Nel modulo Dati Impiantistici sono richiesti i dati relativi alle caratteristiche (costi, capacità, rendimenti, distanze, etc) degli impianti di trattamento (impianti di compostaggio e termovalorizzazione) e delle stazioni di trasferimento presenti sul territorio.

In questa versione è possibile prevedere al massimo uno scenario che comprenda tre impianti di compostaggio e tre impianti di termovalorizzazione (di cui uno adibito alla frazione secca), mentre non ci sono vincoli per quanto riguarda le stazioni di trasferimento.

Dopo aver compilato i moduli precedenti si può procedere al lancio del programma cliccando il pulsante “Calcola”. A questo punto, effettuata l’ottimizzazione dei dati inseriti nei moduli precedenti, sarà possibile visualizzare il modulo relativo ai dati del LCA.



“Risultati”;

“LCI”;

“Compostaggio”;

“Discarica”;

“Incenerimento” ed “ImpattiINC”;

“Trasporti”;

“LCIA”.

149

caratteristici del processo in esame. Compostaggio, discarica ed incenerimento sono i fenomeni sviluppati in maniera più approfondita: fin nel dettaglio della chimica di processo, mentre per quanto riguarda l'analisi delle emissioni correlate al modulo dei trasporti è stata prevista una stima di massima.

I risultati di ogni processo (compostaggio, incenerimento, discarica) sono evidenziati in termini di flussi di rifiuto, consumi energetici, emissioni in aria, acqua, suolo ed effetti sull'ambiente e sull'uomo secondo impatti diretti, indiretti ed evitati (Tab .5.1)

Impatti	Definizione	Incenerimento	Compostaggio	Discarica
Diretti	Impatti derivanti dal processo	Impatti associati al processo di incenerimento	Impatti associati al processo di compostaggio	Impatti legati alle emissioni atmosferiche (biogas) ed idriche (percolato)
Indiretti	Impatti associati al consumo di energia, combustibile, e produzione di sostanze chimiche utilizzate nel processo	Impatti dovuti al consumo di energia, combustibile ausiliario e sost. chimiche utilizzate per l'abbattimento degli inquinanti	Impatti dovuti al consumo di energia.	Impatti dovuti al consumo di energia.
Evitati	Impatti positivi	Impatti evitati associati alla produzione di energia elettrica e termica	Impatti evitati associati alla produzione del compost	Impatti dovuti alla mancata produzione di energia, utilizzando quella fornita dal biogas.
Totali	Somma di tutti gli impatti. Gli impatti evitati vengono presi con il segno meno.	Somma di tutti gli impatti.	Somma di tutti gli impatti.	Somma di tutti gli impatti.

Tabella 5.1 Definizione dei vari tipi di impatti

Gli impatti sono stimati in accordo con il metodo EDIP⁸, per cui le emissioni di ogni processo sono moltiplicate per degli opportuni fattori di caratterizzazione di ogni categoria d'impatto ed i risultati sono rapportati alla massa di una sostanza caratteristica propria dell'impatto considerato. I sette indici di impatto considerati sono: effetto serra, assottigliamento dello strato di ozono, acidificazione dell'aria, smog fotochimico, tossicità e consumo di risorse non rinnovabili.

I risultati sono evidenziati sia in maniera numerica con tabelle, sia con metodo grafico raffigurando mediante istogrammi gli impatti diretti, indiretti, evitati e totali e rappresentando per ogni categoria le sostanze maggiormente dannose

⁸ Vedi Capitolo 3

In Fig. 5.6 viene mostrato come il programma visualizza graficamente, tramite un diagramma di flusso, la distribuzione dei quantitativi di RU prodotti nel bacino provinciale in esame.

La prima suddivisione del flusso avviene tra raccolta differenziata e non, quindi tra i vari trattamenti applicati ed infine il flusso arriva alla discarica.

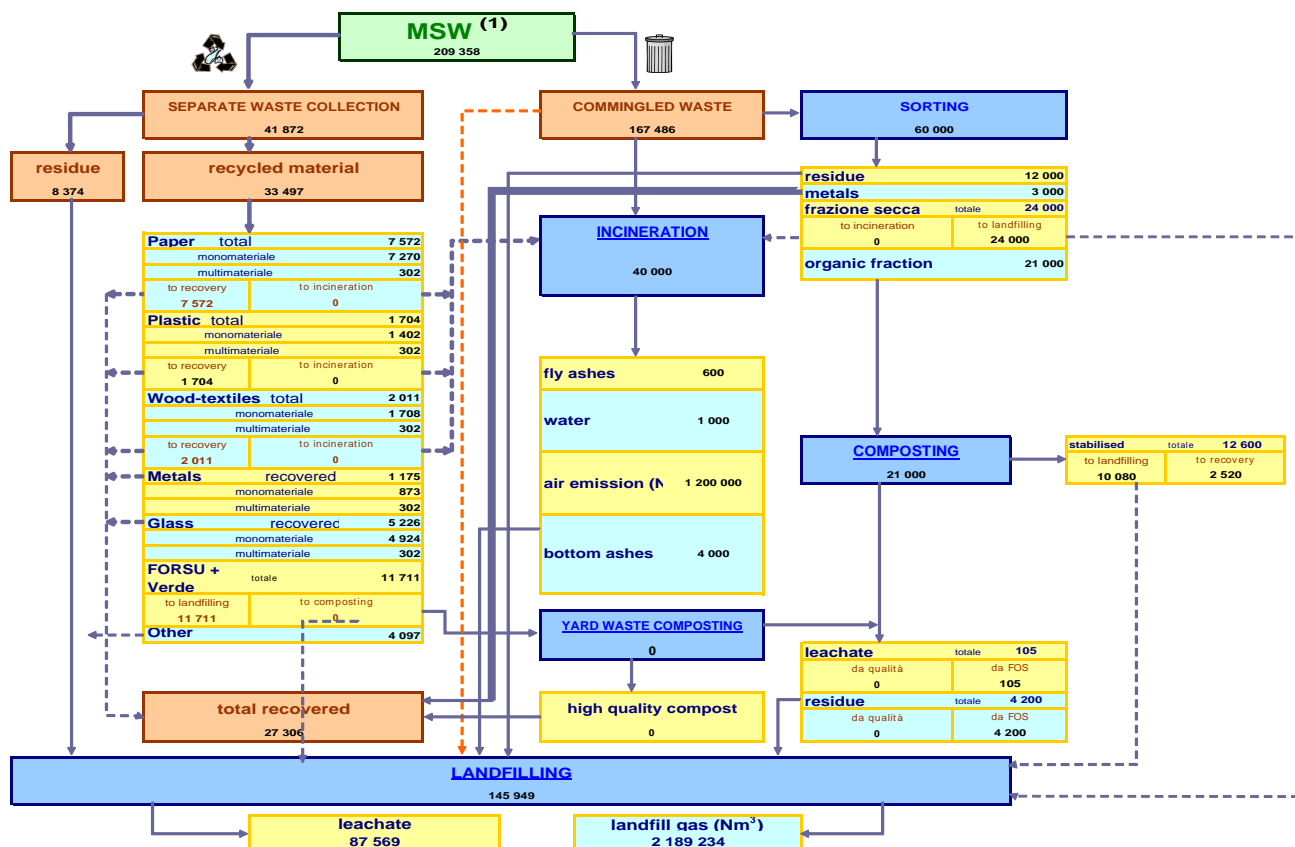


Fig 5.5 Inventario (LCI) del il ciclo di gestione integrato dei rifiuti

Capitolo 6

Caso studio applicato alla provincia di Frosinone

La simulazione, effettuata per testare il programma, è stata realizzata facendo riferimento a dati relativi ai rifiuti urbani raccolti dai comuni della provincia di Frosinone nel 2003 (complessivamente pari a 193.823 tonnellate).

In input al modello tecnico-economico sono state ipotizzate un'unica tipologia di composizione merceologica del rifiuto urbano indifferenziato e un'unica strategia di raccolta differenziata su tutto il territorio.

Nelle tabelle seguenti sono riportati i dati generali relativi alla provincia di Frosinone, i valori relativi alla produzione, alla composizione merceologica e alla strategia di raccolta differenziata adottata.

Provincia di Frosinone (2003)	
Abitanti	485.041 ab
Superficie	323.927 ha
RU prodotti	193.823 t/anno
RU pro capite	400 kg/ab*anno
RD totale	6.677,58 t/anno

Tabella 6.1 Dati generali relativi alla provincia di Frosinone. Fonte: Rapporto Rifiuti 2004 APAT, ONR.

Frazioni merceologiche	Composizione % del RU indifferenziato
Carta	19
Vetro	11
Plastica	3
Metalli	9
Legno/tessile	6
Organico/FORSU/verde	46
Altro	6
Totale	100

Tabella 6.2 Composizione merceologica del RU indifferenziato

RD delle diverse	Quantità (t)	% RD sul totale RU prodotto
-------------------------	---------------------	------------------------------------

frazioni merceologiche		
Organico	0,00	0
Sfalci e potature	0,00	0
Vetro	2107,67	1
Plastica	510,12	0
Legno	21,86	0
Carta	2350,72	1,2
Metalli	244,05	0
Alluminio	0,00	0
Tessili	26,50	0
RAEE	0,00	0
Ingombranti a recupero	379,47	0
Raccolta selettiva	34,13	0
Altro	3,07	0
Totale	6677,58	3,4

Tabella 6.3 Raccolta differenziata delle diverse frazioni merceologiche e % di RD rispetto al totale dei RU (Rapporto Rifiuti 2004 APAT, ONR)

L'attuale offerta impiantistica di cui dispone il bacino della Provincia di Frosinone è la seguente:

- un **impianto di selezione/compostaggio** con capacità pari a 80.000 t/anno sito in località Col Felice;
- un **impianto di termovalorizzazione** con capacità pari a 100.000 t/anno sito in località San Vittore del Lazio; tale impianto non incenerisce il rifiuto tal quale, ma CDR e frazione secca.
- una **discarica** sita l località Roccasecca;
- un **impianto di raffinazione della frazione secca** per la produzione di CDR sito n località Castellaccio (Paliano).

Tutti i rifiuti prodotti nel bacino di Frosinone sono avviati all'impianto di Col Felice dove subiscono una prima selezione volta a separare la frazione umida putrescibile, stabilizzata nello stesso impianto, dalla frazione secca la quale è avviata all'impianto di raffinazione per la produzione di CDR di San Vittore.

Le stazioni di trasferimento presenti sul territorio sono le seguenti:

- Stazione di trasferimento di Atina;
- Stazione di trasferimento di Col Felice;

- Stazione di trasferimento di Frosinone;
- Stazione di trasferimento di Piglio.

Tutti comuni che si trovano nel raggio di 30 km dall'impianto di Col Felice e vi confluiscono direttamente; le stazioni di trasferimento di Atina, Frosinone e Piglio sono state localizzate in punti strategici al fine di ottimizzare il costo e la rapidità del trasporto dei RU.

Nelle tabelle seguenti sono riportati flussi dei rifiuti nei diversi impianti della provincia.

Impianto di selezione e compostaggio Colfelice	%	t/giorno
Compost	10,00	650
Perdita di peso	3,00	65
Recupero ferrosi	2,00	19,5
Inviati in discarica	46,15	13
Inviati a Paliano per raffinazione CDR	31,15	300
Inviati direttamente ad incenerimento San Vittore	7,70	202,5
Totale	100,00	650

Tabella 6.4 Flussi in uscita dell'impianto di Colfelice

Impianto di raffinazione del CDR Paliano	%	t/giorno
Scarti da inviare in discarica	30,00	60
CDR inviato San Vittore	70,00	140
Totale	100,00	200

Tabella 6.5 Flussi in uscita dall'impianto di Paliano

Discarica Roccasecca	%	t/giorno
Scarti da selezione (Colfelice)	16,67	60
Scarti da raffinazione CDR (Paliano)	83,33	300
Totale	100,00	360

Tabella 6.6 Flussi in entrata alla discarica di Roccasecca

Impianto di Incenerimento San Vittore	%	t/giorno
--	----------	-----------------

Frazione secca da selezione (Colfelice)	73,68	140
Frazione secca da raffinazione CDR (Paliano)	26,32	50
Totale	100,00	190

Tabella 6.7 Flussi in ingresso all'impianto di San Vittore

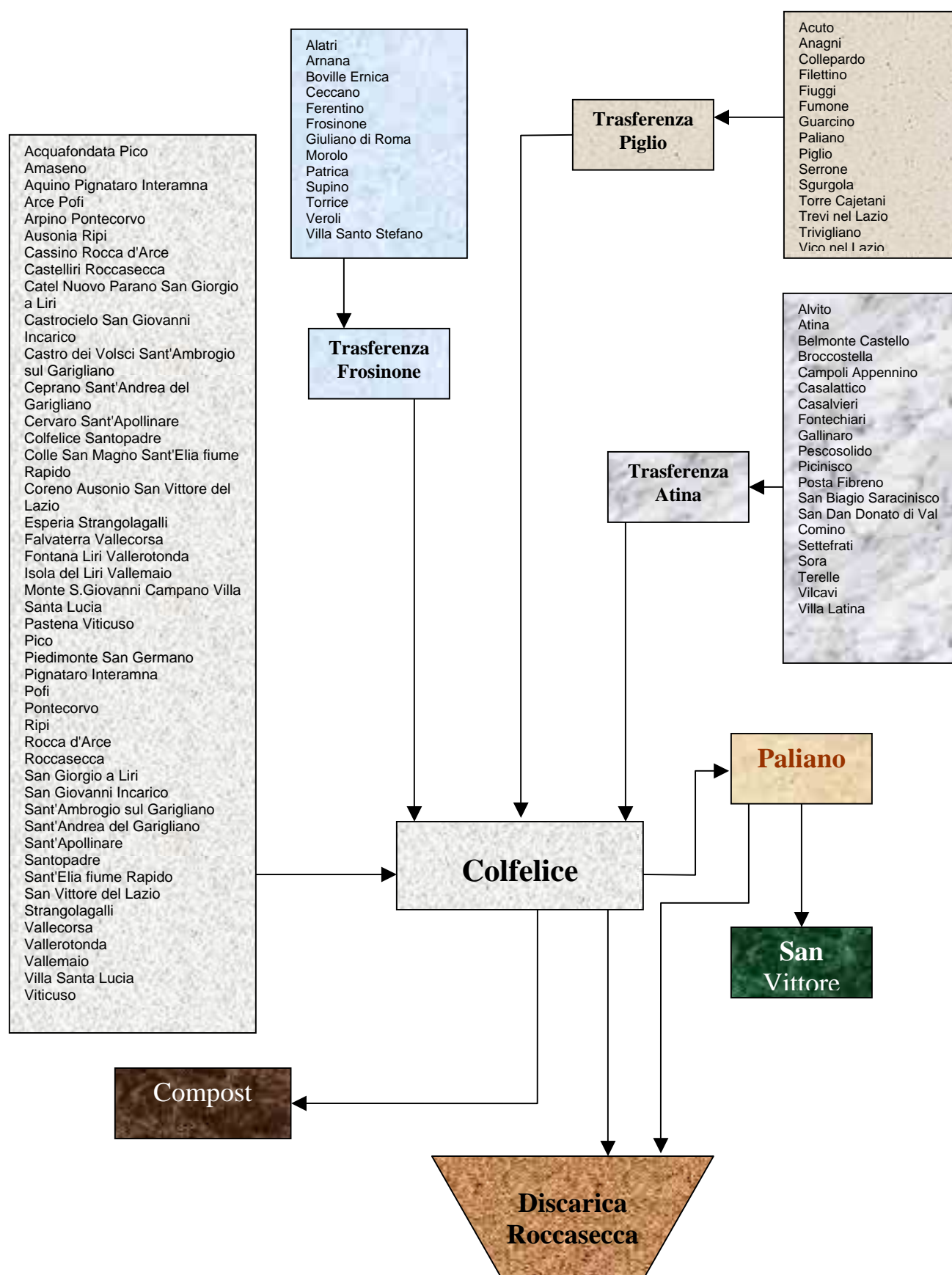
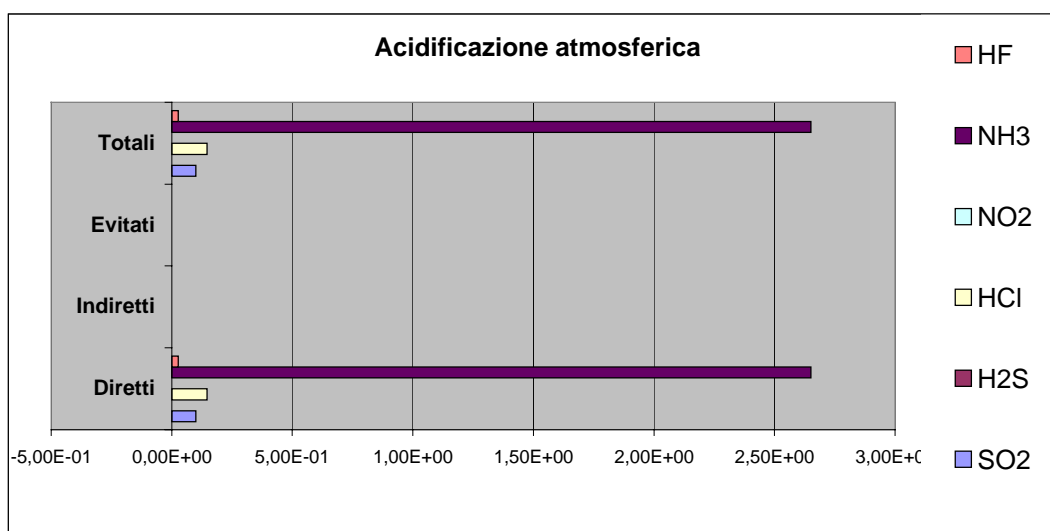
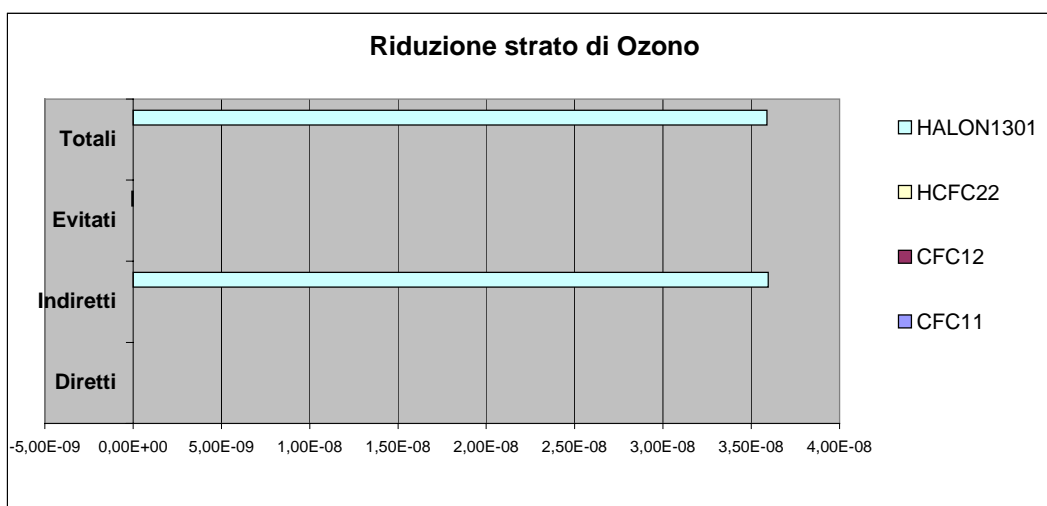
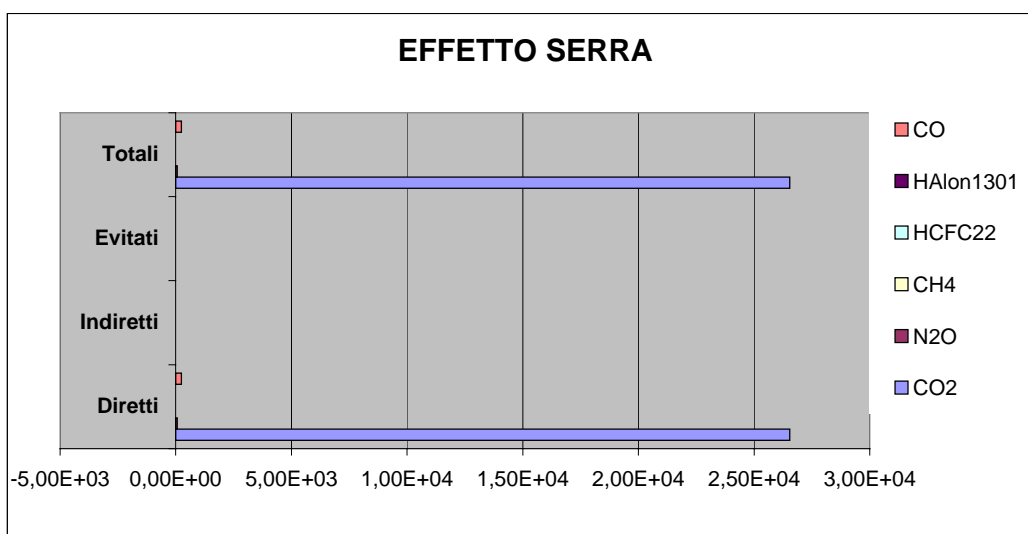
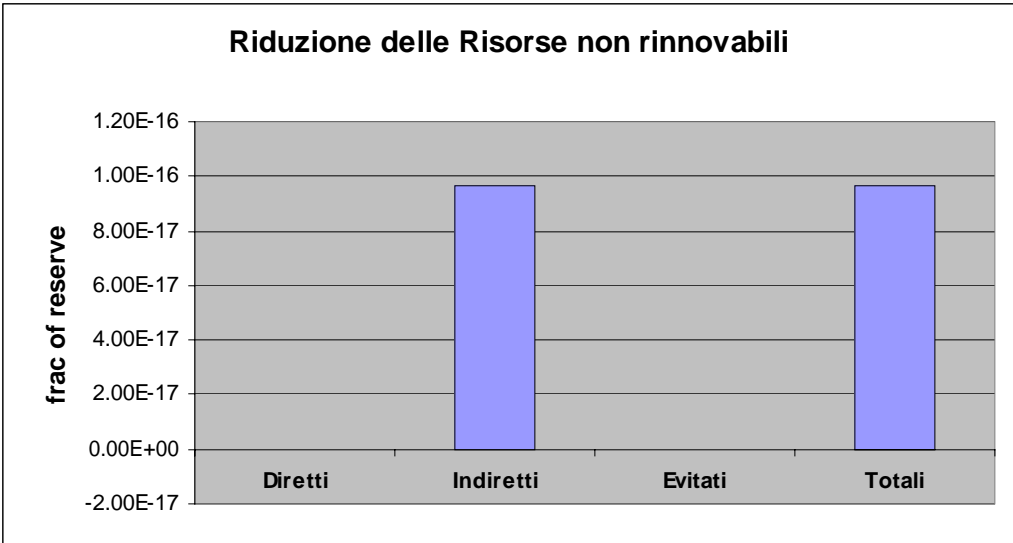
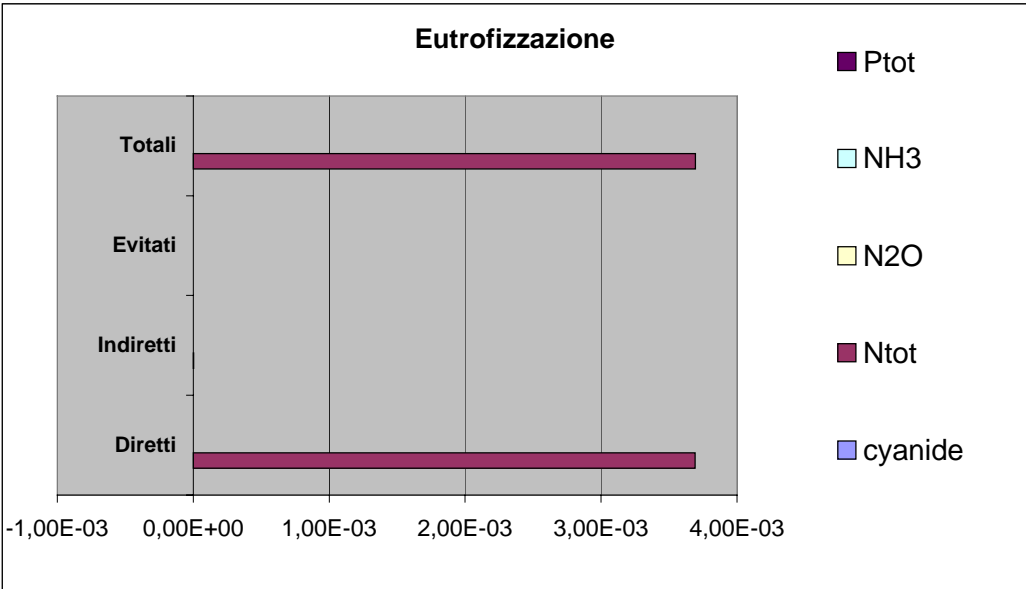
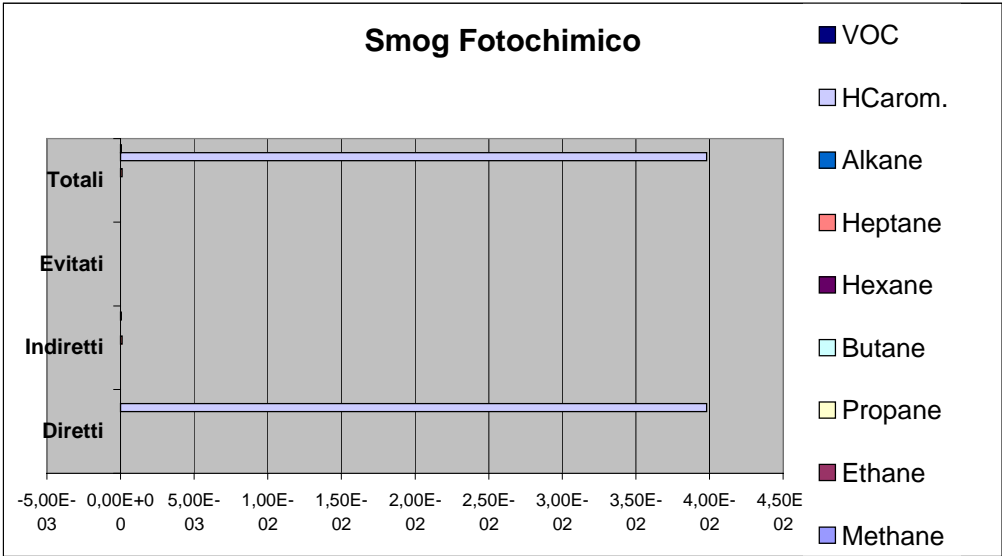


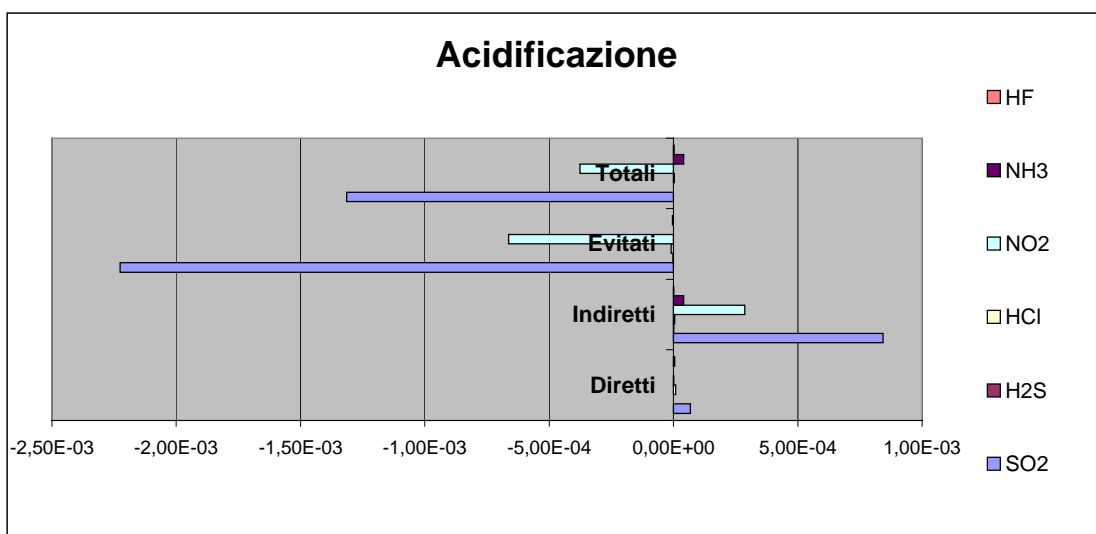
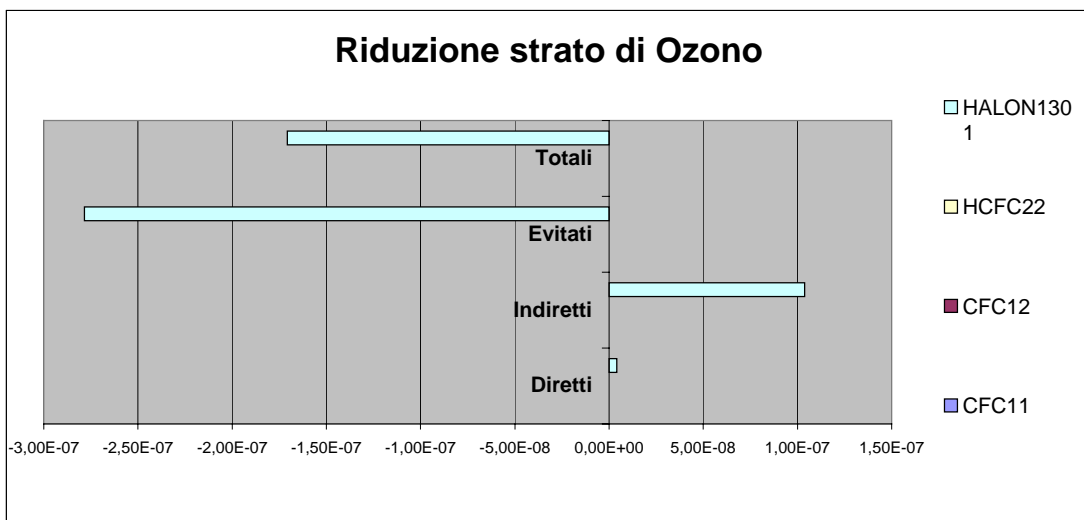
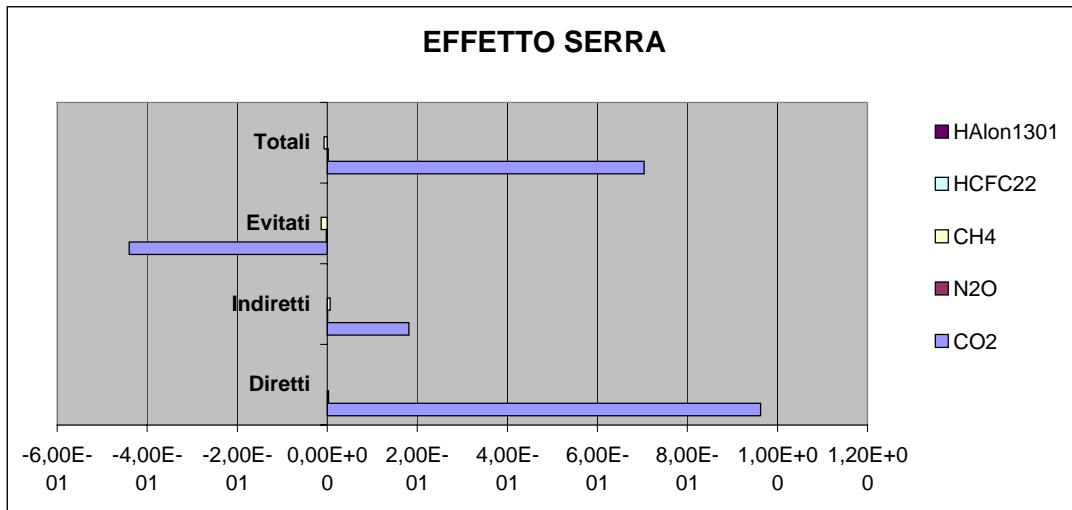
Figura 6.1 Analisi dei flussi dei rifiuti nella provincia di Frosinone.

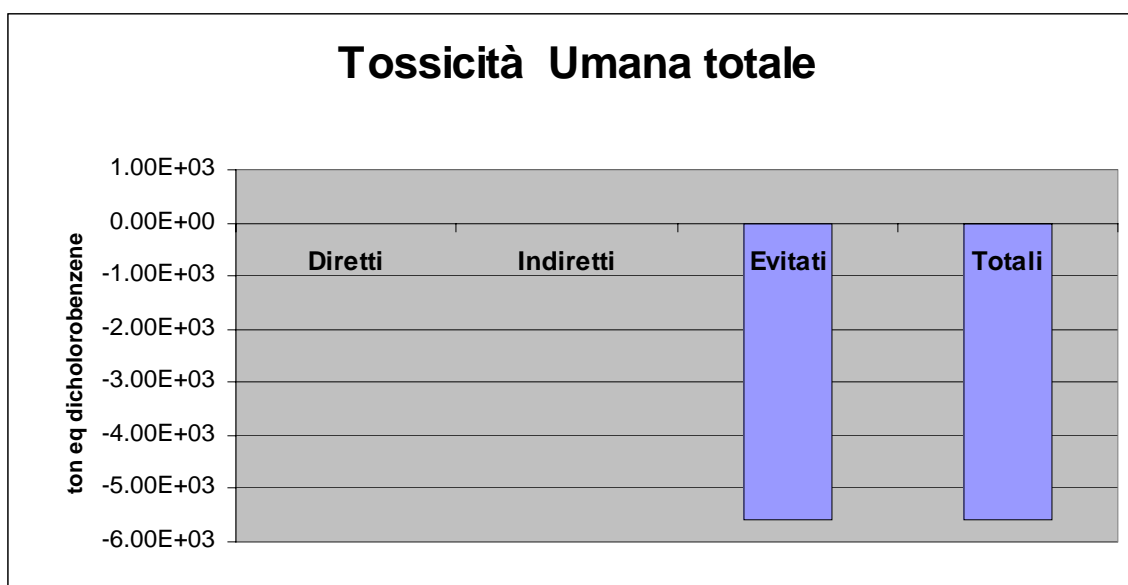
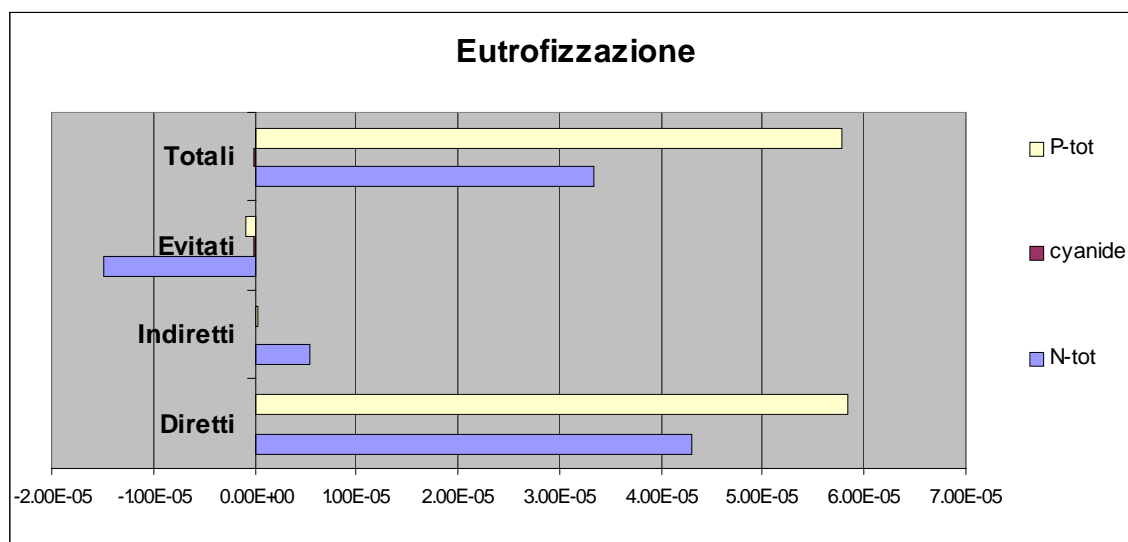
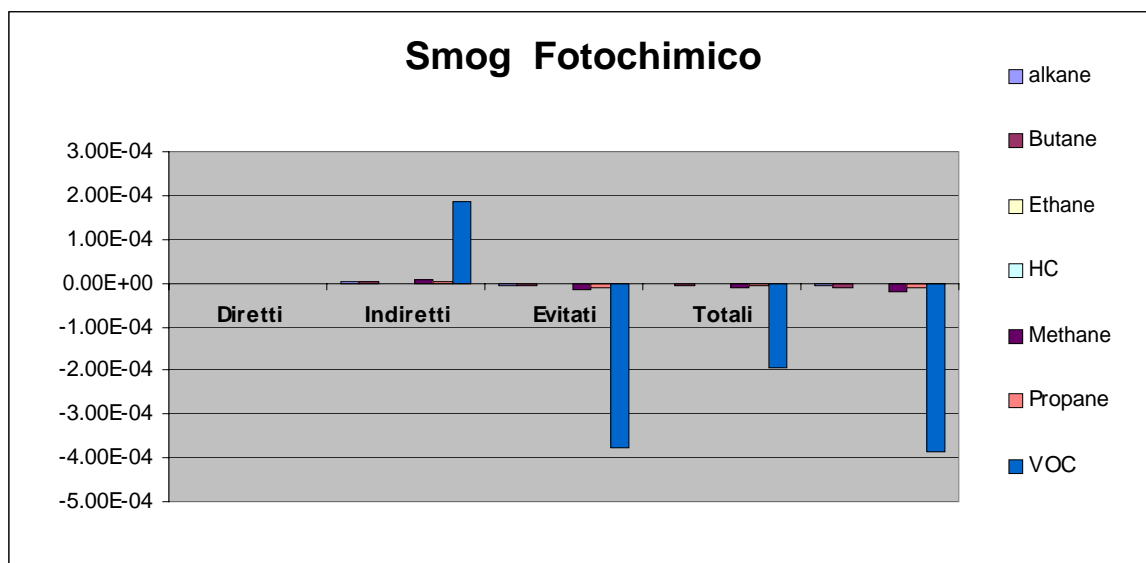
Impatti associati al compostaggio

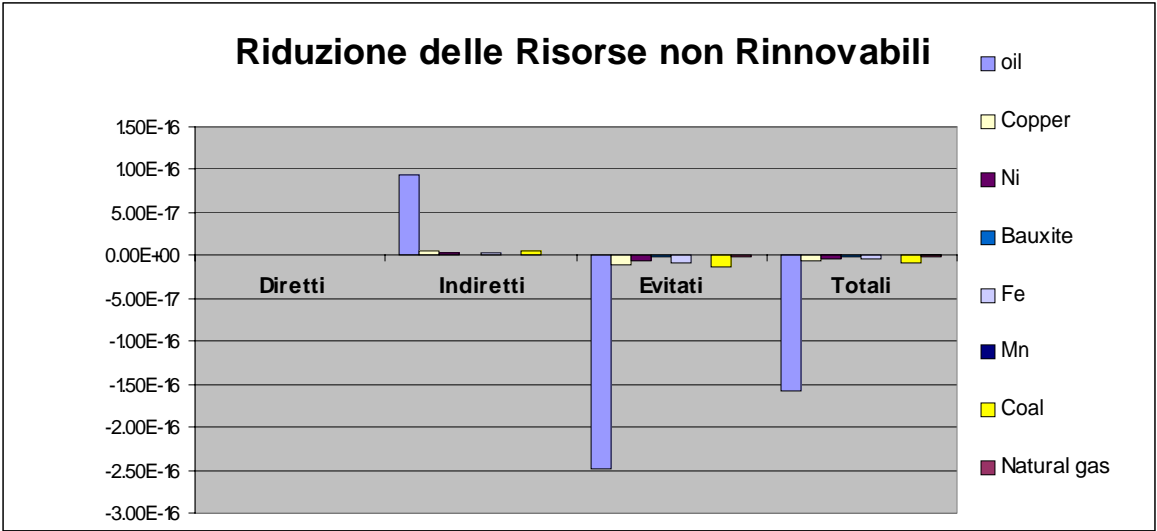




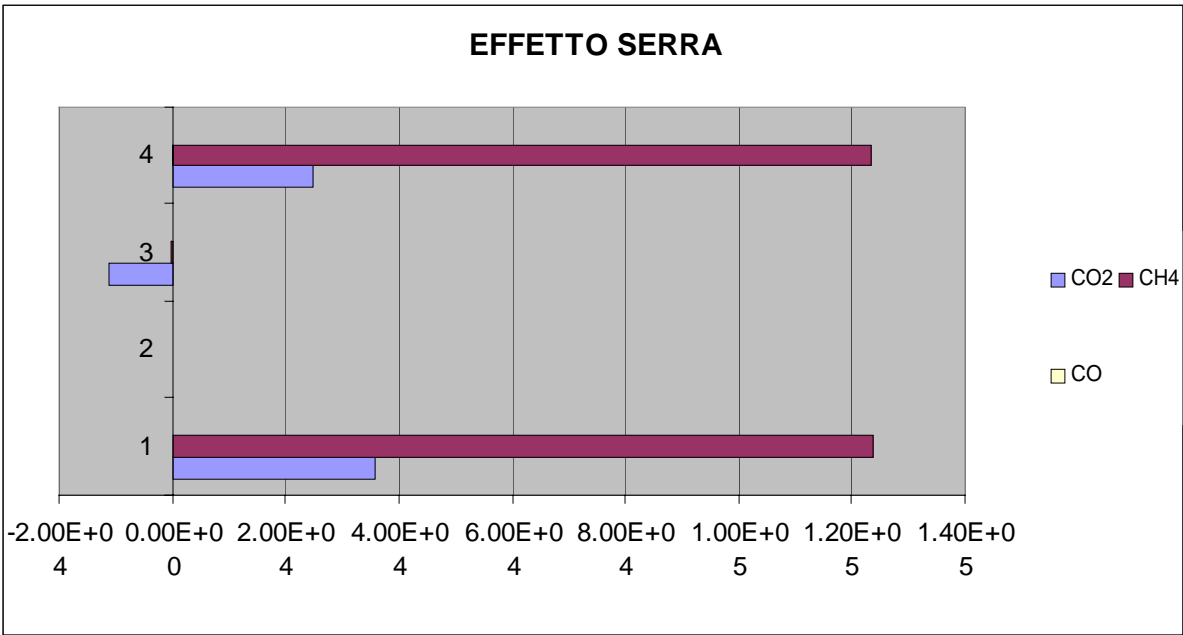
Impatti associati all'incenerimento

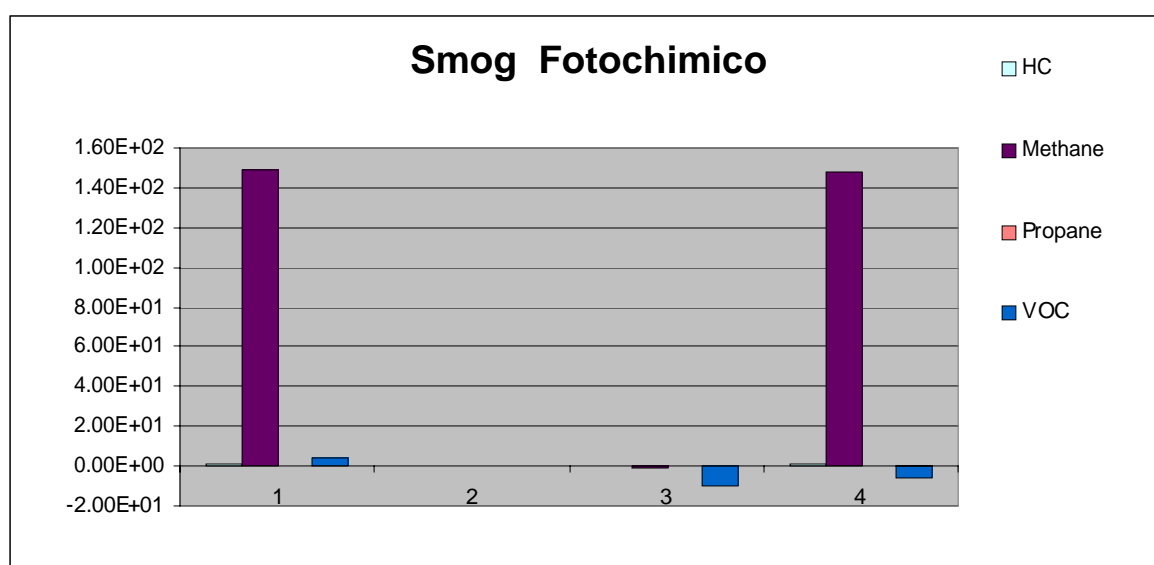
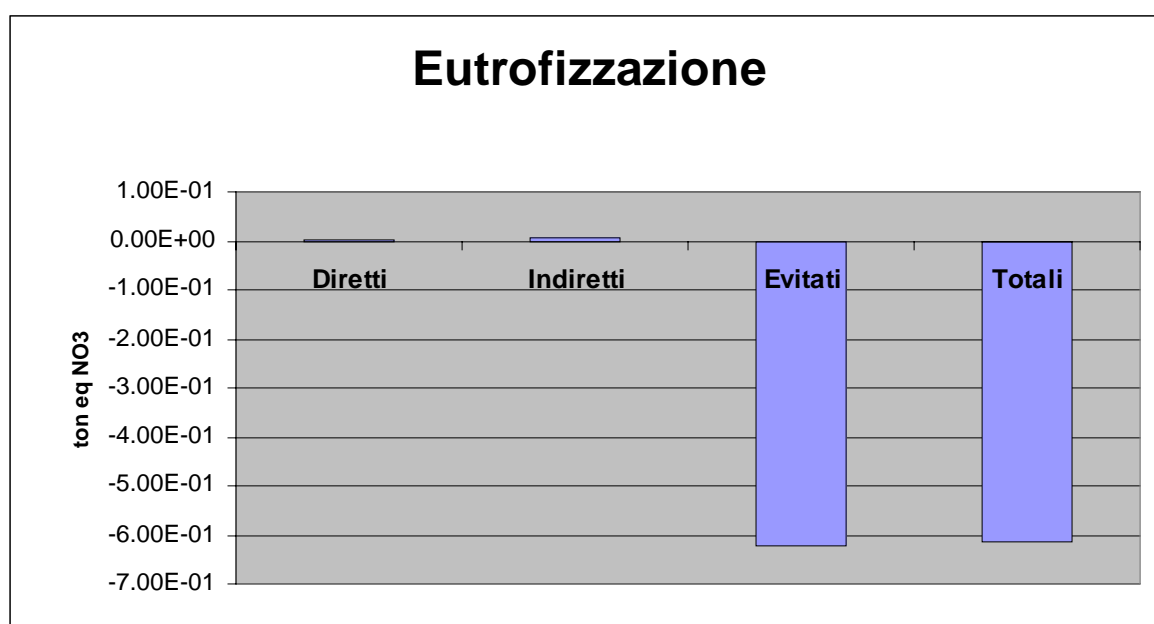
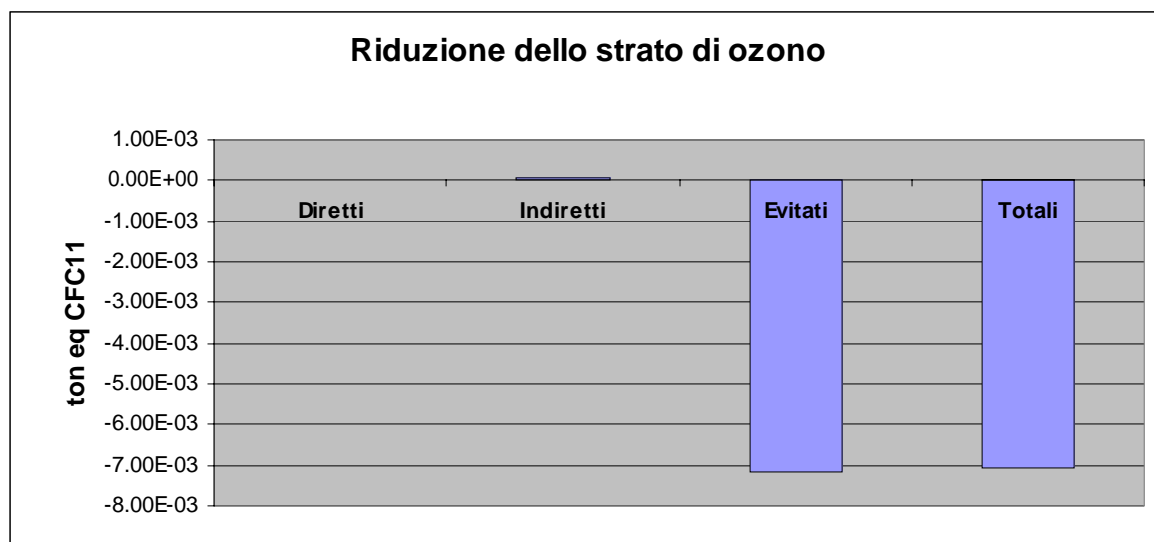


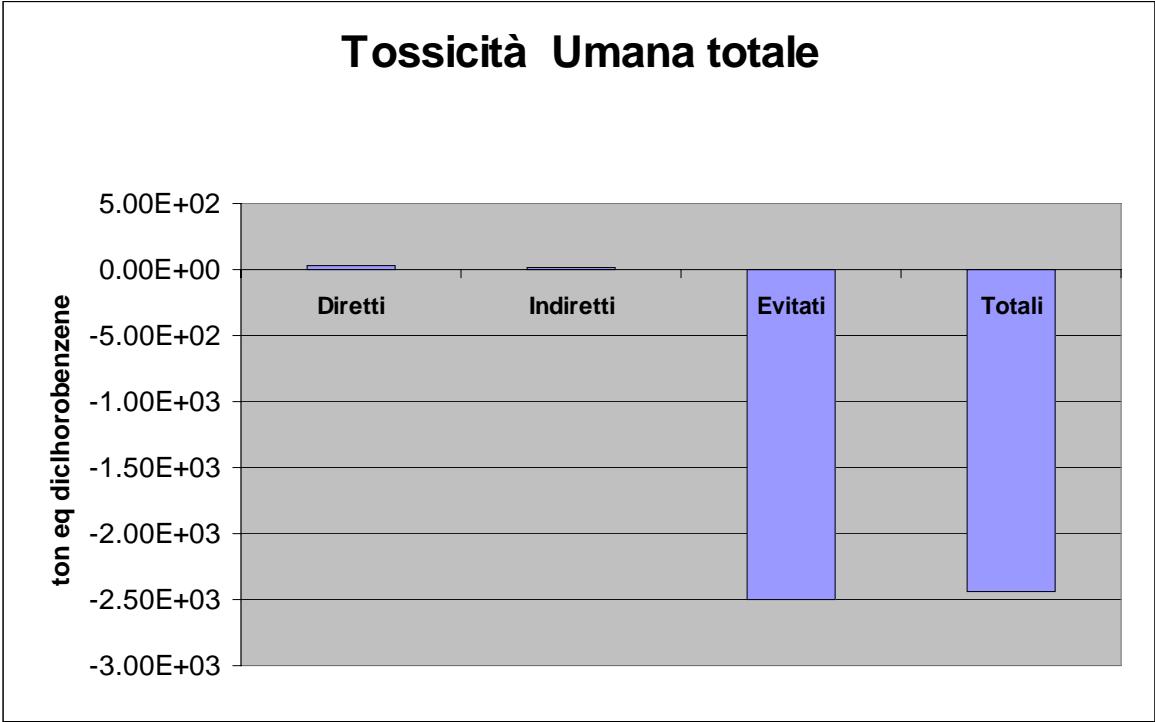
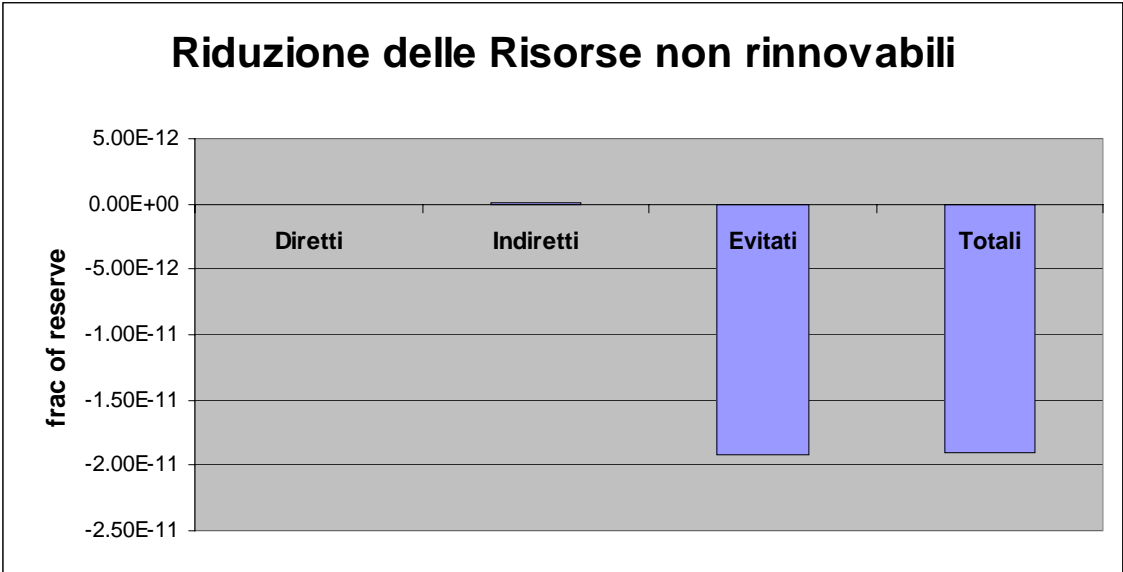




Impatti associati alla discarica

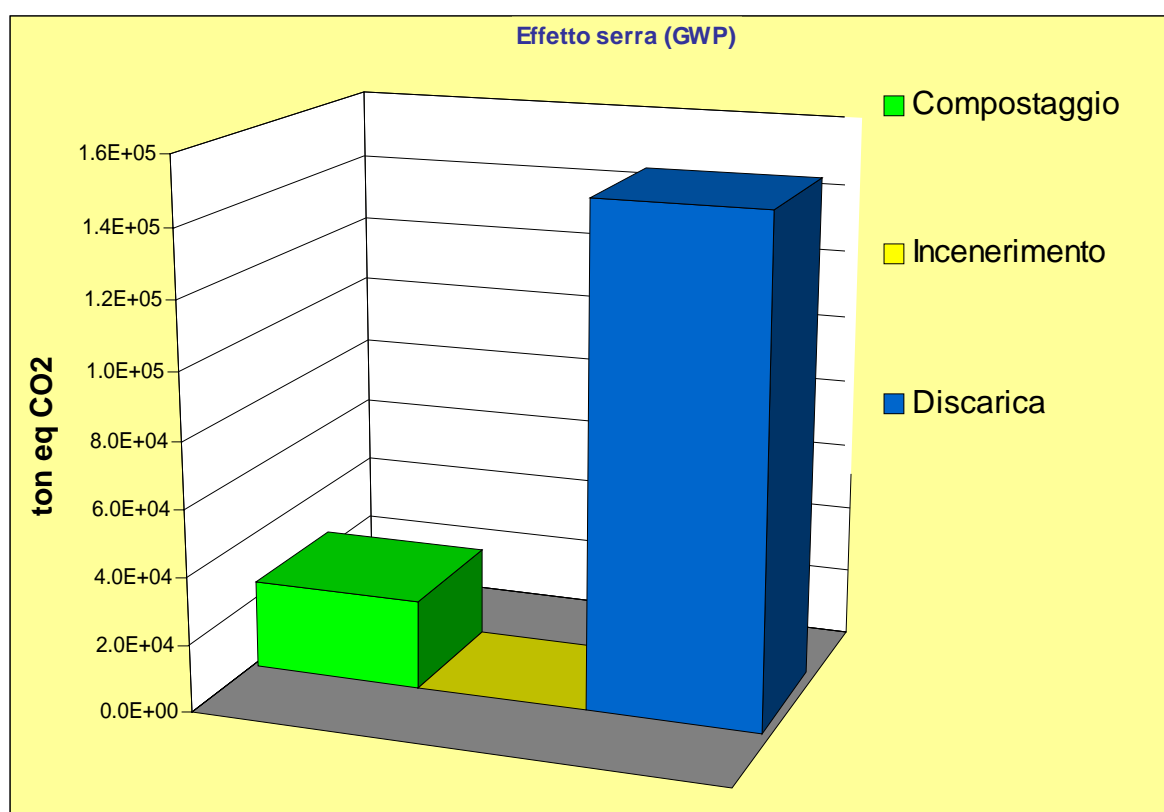




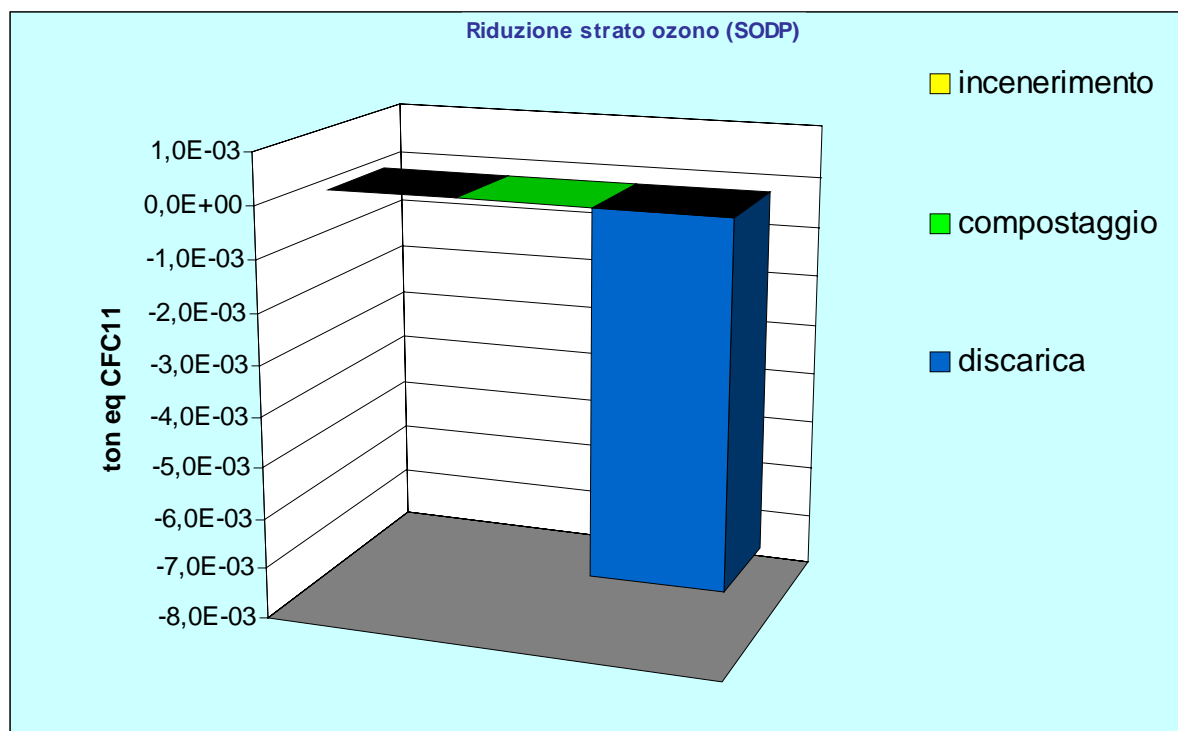


Conclusioni

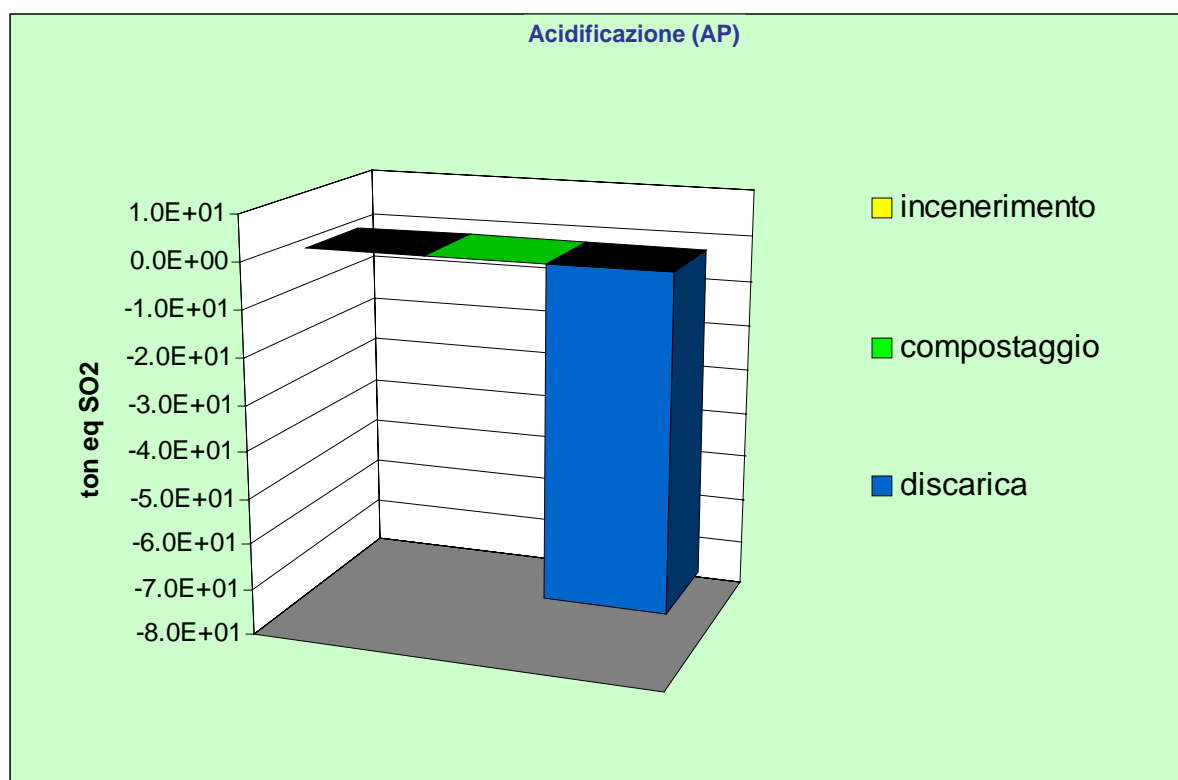
In conclusione risulta senz'altro significativo confrontare gli impatti complessivi associati ai diversi metodi di trattamento, relativi alla soluzione di minimo costo definita dal software a partire dalla situazione impiantistica attuale della provincia di Frosinone.

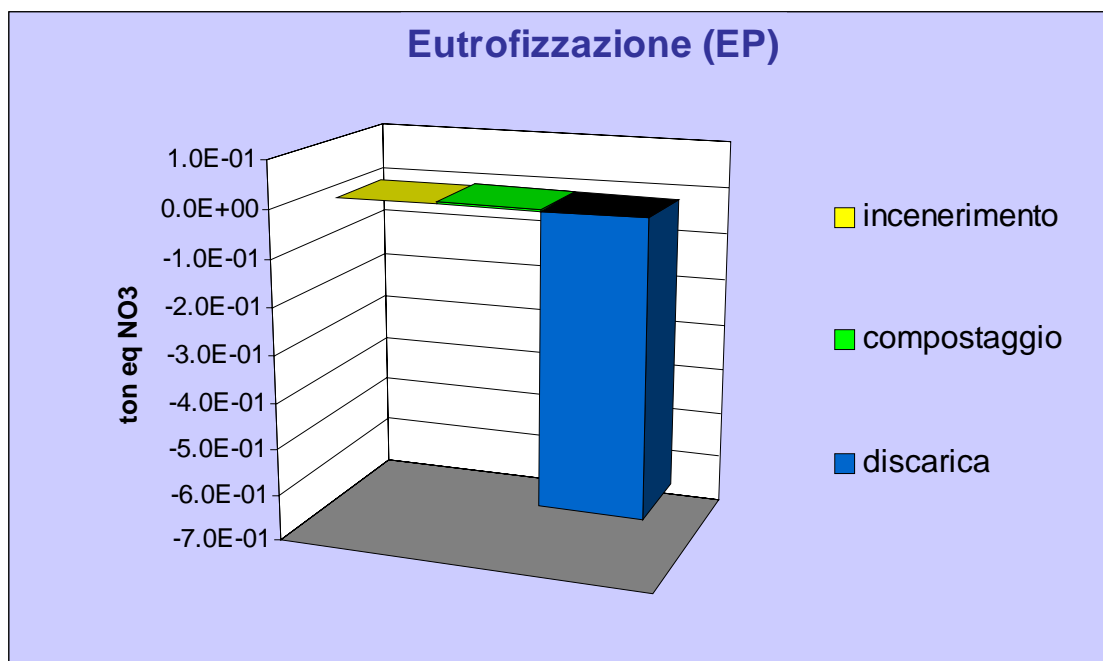


In merito alla produzione di gas serra, la discarica presenta l'impatto maggiore; ciò è dovuto in massima parte alla produzione di biogas associato alla degradazione della sostanza organica, in particolare l'impatto maggiore è dovuto al metano, come mostra il grafico di pag. 158.

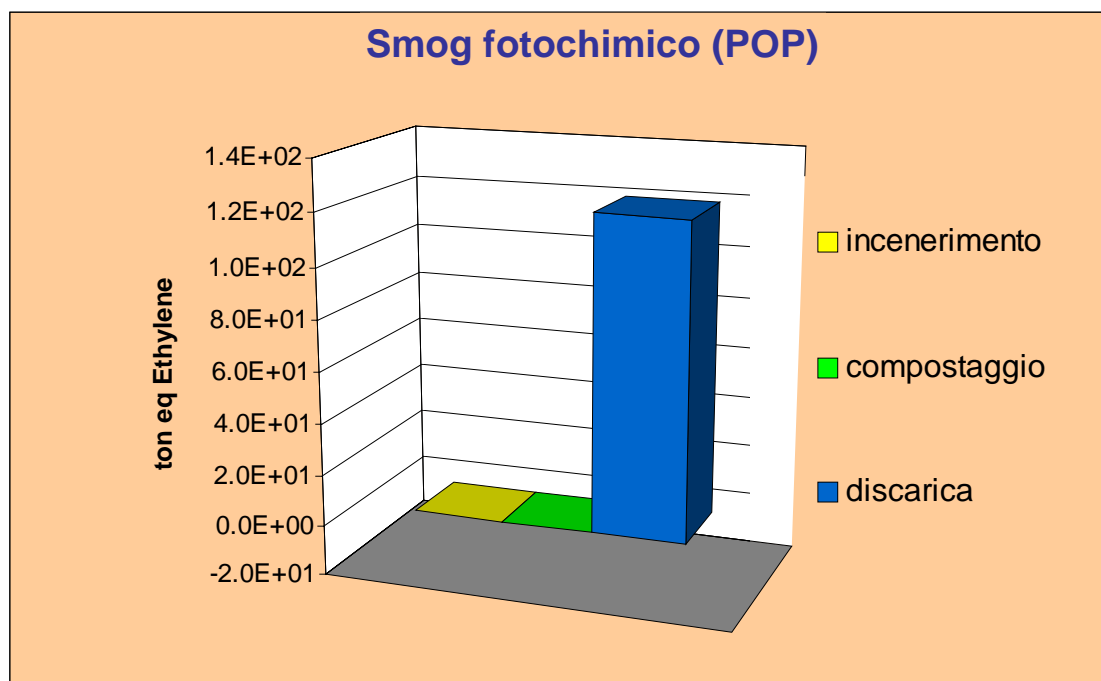


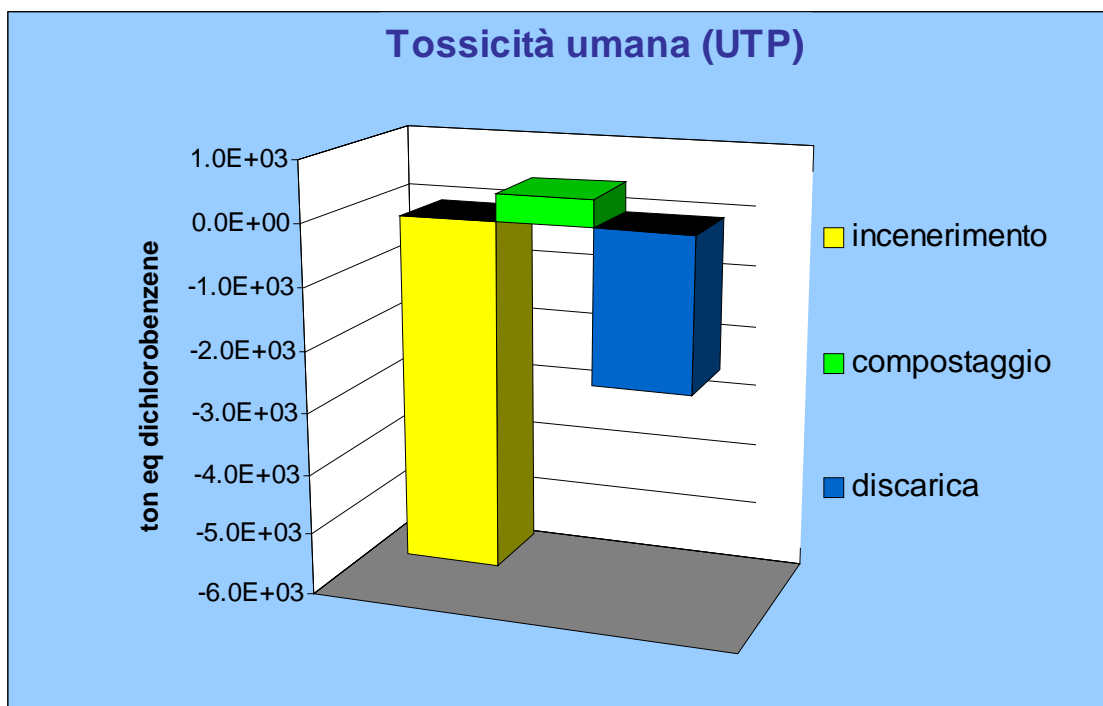
Per quanto concerne la riduzione dello strato di ozono è importante osservare che il sistema di gestione integrata dei RSU in esame non determina impatti significativi; in particolare la discarica presenta l'impatto minore.



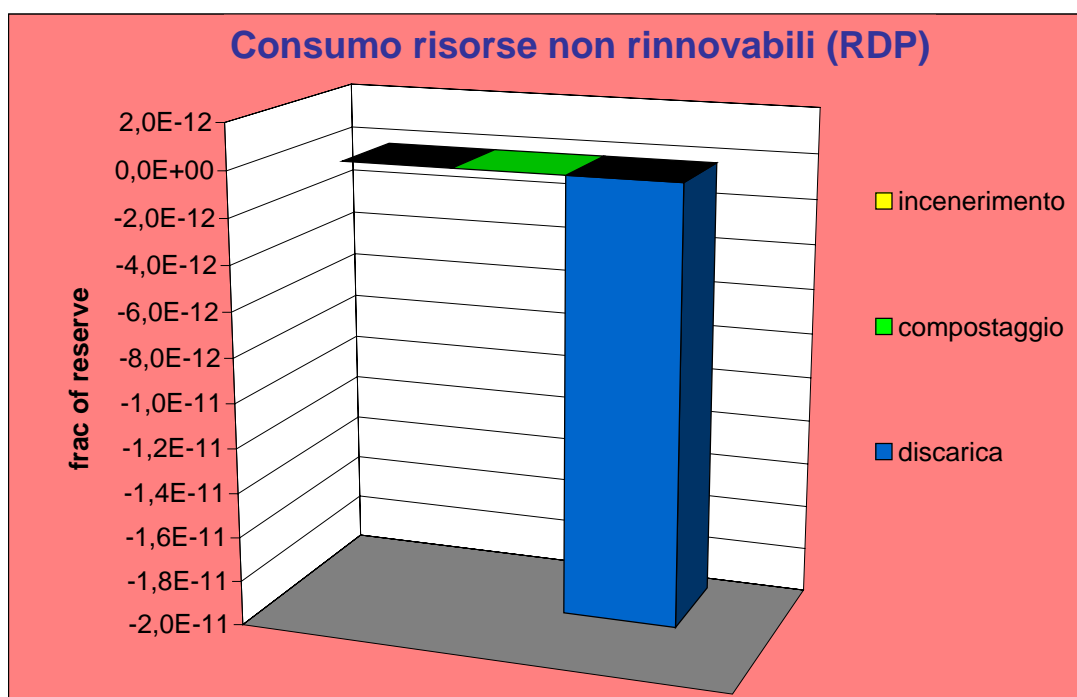


In relazione all'acidificazione ed all'eutrofizzazione la discarica è il trattamento che porta alla minore produzione di sostanze responsabili di tali fenomeni, il compostaggio invece è il trattamento che presenta il maggiore impatto nella produzione di sostanze eutrofizzanti.

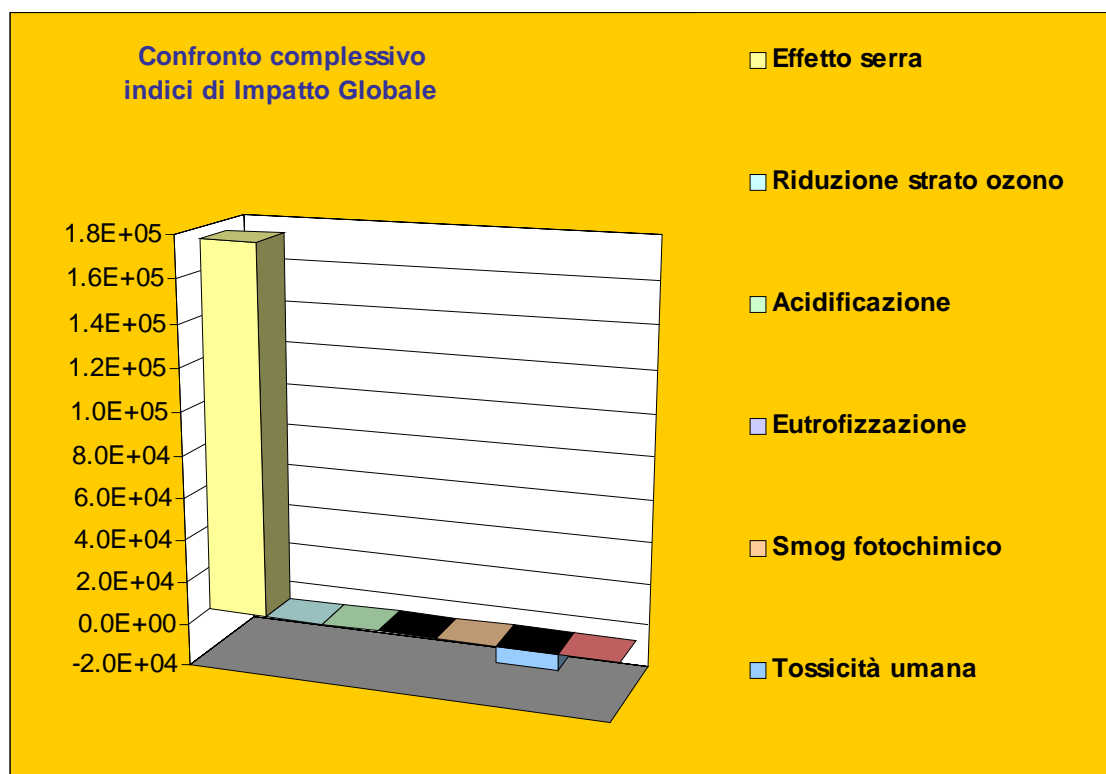




Il metano presente nel biogas prodotto in discarica è il principale responsabile della produzione di smog fotochimica; mentre per quanto riguarda la tossicità umana il trattamento che presenta un impatto maggiore risulta il compostaggio, ciò a causa delle sostanze prodotte a seguito della degradazione della sostanza organica che presentano un elevato fattore di equivalenza elevato.



La discarica presenta un impatto sulle risorse rinnovabili inferiore all'incenerimento ed al compostaggio, essa infatti non prevede l'impiego di combustibili fossili né di agenti chimici necessari invece per gli altri trattamenti.



Complessivamente quindi l'impatto maggiore provocato da questo sistema di gestione integrata dei rifiuti è dato dall'aumento di gas serra, imputabile come abbiamo già osservato essenzialmente al biogas prodotto in discarica.

A partire dall'attuale situazione impiantistica della provincia di Frosinone, si possono ipotizzare diversi scenari al fine di trovare quello economicamente ed ambientalmente più efficace.

L'analisi metodologica LCA non risolve quindi i problemi ambientali, ma è uno strumento quantitativo per supportare le decisioni, identificando quelle aree che hanno un potenziale di miglioramento più elevato; consente di individuare uno scenario ottimale; consente di analizzare il problema dello smaltimento dei RSU associandone le caratteristiche alle tecnologie impiantistiche presenti nel sistema di gestione da valutare. Il presente studio ha permesso di realizzare uno strumento di analisi in grado di fornire un sistema di gestione integrata dei Rifiuti Solidi Urbani che soddisfa tanto i requisiti di sostenibilità economica

(Modello Tecnico_Economico), quanto quelli di sostenibilità ambientale (Metodologia LCA).

Bibliografia

- ❑ Research Triangle Institute for EPA *Application of Life Cycle Management to evaluate Integrated Municipal Solid Waste Management Strategies* - July 1997
- ❑ CITEC *Linee Guida per la progettazione, realizzazione e gestione degli impianti a tecnologia complessa per lo smaltimento dei rifiuti urbani* – Marzo 2002
- ❑ MCC Studi di settore *Light my fire: Il mercato dei rifiuti in Italia.* – Settembre 2004
- ❑ Paola Ficco *La gestione dei rifiuti: tra Dlgs 22/1997 e leggi complementari* – Settembre 2004 edizioni Ambiente
- ❑ Gia Luca Baldo *LCA Life Cycle Assessment Uno strumento di analisi energetica ed ambientale* – Dicembre 2000 Ipaservizi Editore
- ❑ White, Peter, Franke and Hindle: *Integrated solid waste management: A Life Cycle Inventory* – 1995 Glasgow, UK: Blackie Academic & Professional.
- ❑ The international ash working group (IAWG) - July 1995. *An international perspective on characterisation and management of residues from municipal solid waste incineration*
- ❑ Carlton C. Wiles. November 1994. *Municipal solid waste combustion ash: State of the knowledge.* Journal of Hazardous materials, Elsevier
- ❑ Giuseppe d'Antonio. 1997. *Trattamento dei rifiuti solidi urbani.*
- ❑ Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil A.. *Integrated waste management* – 1993 McGraw-Hill, New York
- ❑ W.R. Niessen. *Combustion and incineration processes.*

- ❑ H.A. van der Slott, D.S. Kosson, O. Hjelm. January 2001. *Characteristics, treatment and utilization of residues from municipal waste incineration*. Waste management, Pergamon
- ❑ Ole Hjelm. July 1995. *Disposal strategies for municipal solid waste incineration residues*. Journal of Hazardous materials, Elsevier
- ❑ Ole Hjeelmar. September 1992. *Municipal solid waste incinerator flue gas cleaning in Denmark residues properties and residue management options*. Vandkalitetsinstituttet
- ❑ Wang K.-S, Tsai C.-C., Lin K.-L., Chiang K.-Y.. 2003. *The recycling of MSW incinerator bottom ash by sintering*. Journal of Hazardous materials, Elsevier
- ❑ P. Appendino, M. Ferraris, I. Matekovits, M. Salvo. Marzo 2003 *Production of glass-ceramics bodies from the bottom ashes of municipal solid waste incinerators*. Journal of Hazardous materials, Elsevier
- ❑ Fisang L. 1995 *An optimisation of fly ash quantity in cement blending*. Journal of Hazardous materials, Elsevier
- ❑ Shieh C., Duedall I.. 1995 *Possible use of ash residues for the construction of artificial reefs at sea*. Journal of Hazardous materials, Elsevier
- ❑ Ni-Bin chang, H.P. Wang, W.L.Huang, K.S. Lin. September 1998. *The assessment of reuse potential for municipal solid waste and refuse derived fuel incineration ashes*. Journal of Hazardous materials, Elsevier
- ❑ P.C. rem, C. De Vries, L.A. van Kooy, P. Bevilacqua, M.A. Reuter. August 2003. *The Amsterdam pilot on bottom ash*. Journal of Hazardous materials, Elsevier
- ❑ Masahide Nishigaki. October 1999. *Producing permeable blocks and pavement bricks from molten slag*. Journal of Hazardous materials, Elsevier

- ❑ S. Wenish, P. Rousseaux, H. Mètivier-Pignon. October 2003. *Analysis of technical and environmental parameters for waste to energy and recycling: hasehold waste case study*. Journal of Hazardous materials, Elsevier
- ❑ Herbert I. Hollander, Arthur L. Plumley, Roger S. DeCesare. July 1995. *ASME/US Bureau of Mines investigative program on vitrification of combustion ash residues: findings and conclusions*. Journal of Hazardous materials, Elsevier
- ❑ Clive Brereton. 1996. *Municipal solid waste incineration, air pollution control and ash management*. Journal of Hazardous materials, Elsevier
- ❑ Geoffrey Hamer. 2003. *Solid waste treatment and disposal effects on public health and environmental safety*. Journal of Hazardous materials, Elsevier
- ❑ Ohlsson O. 1996. *Development and evaluation of lime enhanced refuse derived fuel (RDF) pellets*. Journal of Hazardous materials, Elsevier
- ❑ Barbieri L.. 2002. *Use of municipal incineration bottom ash as sintering promoter in industrial ceramics* Journal of Hazardous materials, Elsevier.
- ❑ Thomas Malkow. June 2003. *Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal*.

Siti consultati

www.ecoserver.it

www.sciencedirect.it

www.elsevier.com

www.rifiutilab.it

www.reteambiente.it

www.comune.jesi.an.it

www.minambiente.it

www.cameradeputati.it

www.tuttoambiente.it

www.sinanet.apat.it