

**SCUOLA DI SCIENZE**

**Dipartimento di Chimica Industriale "Toso Montanari"**

Corso di Laurea Magistrale in

**Chimica Industriale**

Classe LM-71 - Scienze e Tecnologie della Chimica Industriale

**Studio sull'evoluzione temporale degli impatti di un  
impianto di trattamento di rifiuti organici mediante  
metodologia LCA**

Tesi di laurea sperimentale

**CANDIDATO**

Federica Zoffoli

**RELATORE**

**Prof.** Fabrizio Passarini

**CORRELATORI**

Daniele Cespi

Esmeralda Neri

**Sessione III**

---

**Anno Accademico 2013-2014**

---

## **ABSTRACT**

Lo scopo di questo studio è quello di valutare come sono variati gli impatti dell'impianto di compostaggio Romagna Compost a seguito dell'intervento di ampliamento e adeguamento, che ha portato ad un'evoluzione impiantistica notevole: dal processo di compostaggio tradizionale ad un sistema integrato anaerobico-aerobico. Per fare ciò si è scelto di utilizzare la metodologia di valutazione del ciclo di vita *Life Cycle Assessment* (LCA). Il vantaggio di questa analisi, è quello di riuscire a considerare tutti gli aspetti del ciclo di vita dei diversi sotto-processi considerati, dal compostaggio vero e proprio, all'utilizzo di reagenti, combustibili e materiali ausiliari, dal trasporto e smaltimento dei flussi di rifiuti finali al recupero energetico. A tal proposito si è rivelata utile una ricerca bibliografica per individuare studi LCA applicati al campo d'interesse e quindi ad impianti di compostaggio e fermentazione anaerobica. Inoltre, è stato effettuato un riesame delle tecnologie utilizzate negli impianti di recupero dei rifiuti organici e del concetto di *Best Available Techniques* (BAT). Mediante l'analisi di inventario, è stato studiato in maniera approfondita l'impianto e le attività svolte al suo interno e, vista la notevole quantità di dati primari disponibili derivanti dai registri di conduzione e dalle comunicazioni con gli Enti (Arpa, Provincia, etc), è stato possibile suddividerli per ciascun anno di funzionamento e raggrupparli in base alla fase del processo di appartenenza (stoccaggio e pretrattamento del rifiuto organico, fermentazione anaerobica, compostaggio, ecc.). Per quanto riguarda la valutazione degli impatti, eseguita con il metodo Recipe 2014, è stato preso in esame il periodo temporale dal 2007 al 2013, esaminando tutti gli anni di funzionamento. Nello specifico, ci si è posti l'obiettivo di valutare se e quanto l'introduzione del sistema di recupero energetico (elettrico e termico) nel 2010 (ampliamento dell'impianto con introduzione di undici fermentatori anaerobici) abbia portato ad un reale miglioramento del processo con una diminuzione complessiva degli impatti. Dopo aver analizzato in dettaglio il processo, nella seconda fase dello studio, sono stati estesi i confini del sistema per valutare gli impatti associati al trasporto del rifiuto dal luogo di raccolta all'impianto Romagna Compost e gli impatti associati alla diversa gestione dei rifiuti nell'ambito nazionale. La modellazione è stata effettuata con il programma di calcolo SimaPro, uno dei più diffusi software per analisi LCA, utilizzato in industrie, istituti di ricerca ed università. Infine, si è voluto individuare quali fossero i sotto-processi che maggiormente influiscono sull'impatto complessivo, tramite un'analisi di contributo, e quanto la qualità dei dati e le approssimazioni fatte influiscano sui risultati ottenuti, effettuando un'analisi di incertezza tramite il metodo Monte Carlo.

## ABSTRACT

The aim of this work is to evaluate how the environmental impacts of the composting plant Romagna Compost are varied as a consequence of the intervention of expansion and adaptation, which has led to a considerable evolution of the plant: from a traditional composting process to an integrated anaerobic-aerobic system. To do that has been chosen the methodology of *Life Cycle Assessment* (LCA). The advantage of this analysis, is that it is able to consider all aspects of the life cycle of the various sub-processes considered: composting process, use of reagents, fuels and auxiliary materials, transport, final waste disposal and energy recovery. In this regard has been helpful a bibliographical research to identify studies LCA applied to the field of interest and then to composting and anaerobic fermentation plants. Furthermore, it was made a review of the technologies used in systems of recovery of organic waste and the concept of *Best Available Techniques* (BAT). Through the inventory analysis, has been studied the plant and the activities within it and, due to the large amount of primary data available, derived from registers and from communications to the authorities (ARPA, Province, etc. ), it was possible to divide them for each year of operation and group them according to the stage of the process in question (storage and pre-treatment of the organic waste, anaerobic fermentation, composting, etc.). As regards the impacts assessment, performed using the Recipe 2014 method, was considered the period of time from 2007 to 2013, examining all the years of functioning. In particular, the aim was to assess whether and how the introduction of the energy recovery system (electrical and thermal) in 2010 (year of the extension of the plant with introduction of eleven anaerobic fermenters) has led to a real improvement of the process with an overall decrease of the environmental impacts. After having analyzed in detail the process, in the second phase of the study, the boundaries system were extended to assess the impacts associated with the transport of the waste from the collection site to the Romagna Compost plant and the impacts associated with the different waste management in Italy. The modeling was performed using the calculation program SimaPro, one of the most popular software for LCA, used in industries, research institutes and universities. Finally, have been identified which are the sub-processes of greatest influence on the overall impact, through a contribution analysis, and how the quality of data and approximations made affect the results obtained, through an analysis of uncertainty using the Monte Carlo method.

## SOMMARIO

PARTE GENERALE.....	5
1 SCOPO DELLO STUDIO.....	6
2 SOSTENIBILITA' AMBIENTALE E GESTIONE DEI RIFIUTI: approfondimento sullo scenario di gestione anaerobica e sulla normativa ambientale in materia.....	7
2.1 Gestione dei rifiuti organici.....	9
2.1.1 Gestione dei rifiuti organici in Emilia Romagna.....	11
2.2 Normativa di riferimento.....	12
3 TRATTAMENTO BIOLOGICO DEI RIFIUTI ORGANICI: tecnologie e BAT disponibili.....	15
3.1 Digestione anaerobica.....	15
3.1.1 Idrolisi e acidificazione.....	17
3.1.2 Acetogenesi.....	17
3.1.3 Metanogenesi.....	18
3.1.4 Parametri di processo.....	18
3.2 Compostaggio.....	18
3.2.1 Bioossidazione intensiva.....	19
3.2.2 Maturazione.....	19
3.2.3 Parametri di processo.....	19
4 L'IMPIANTO ROMAGNA COMPOST.....	20
4.1 Storia.....	20
4.2 Struttura.....	21
4.2.1 Attività svolte.....	21
4.2.2 Ricezione e stoccaggio rifiuti organici e lignocellulosici.....	22
4.2.3 Pretrattamento del rifiuto organico umido.....	24
4.2.4 Digestione anaerobica.....	25
4.2.4.1 Recupero del calore da cogenerazione.....	27
4.2.5 Miscelazione.....	29
4.2.6 Fase aerobica.....	29
4.2.7 Vagliatura.....	30
4.2.8 Trattamento arie esauste.....	30
4.2.9 Tipologia di emissioni.....	31
4.2.10 Gestione e trattamento dei reflui prodotti.....	31
4.3 Adesione alle BAT.....	33
4.3.1 Conferimento e stoccaggio dei rifiuti all'impianto.....	33
4.3.2 Pretrattamento del rifiuto organico.....	35
4.3.3 Digestione anaerobica.....	35
4.3.4 Trattamento aerobico.....	36
4.3.5 Post trattamento.....	37
4.3.6 Stoccaggio prodotto finito.....	38
4.3.7 Trattamento delle emissioni gassose.....	38
4.3.8 Trattamento dei reflui prodotti nell'impianto.....	38
4.3.9 Rumore.....	39
4.3.10 Sistemi di gestione ambientale.....	39
5 LA METODOLOGIA LCA.....	40
5.1 Introduzione alla metodologia LCA.....	40
5.1.1 Storia LCA.....	41
5.1.1.1 Studi di LCA applicata al processo di digestione anaerobica e compostaggio.....	42

5.2	Norme di riferimento per uno studio di LCA .....	47
5.3	Struttura concettuale di una LCA.....	47
5.3.1	Definizione dell'obiettivo e dello scopo .....	48
5.3.2	Analisi d'inventario.....	51
5.3.3	Valutazione degli impatti .....	52
5.3.3.1	Il metodo Recipe 2014 .....	53
5.3.4	Il concetto di Cultural Theory .....	61
6	SOFTWARE E DATABASE .....	64
6.1	Software SimaPro .....	64
6.2	Database Ecoinvent.....	65
	PARTE SPERIMENTALE .....	66
7	ANALISI DEL CICLO DI VITA .....	67
7.1	Definizione dell'obiettivo e dello scopo .....	67
7.2	Definizione del campo di applicazione.....	67
8	ANALISI DI INVENTARIO .....	68
8.1	Flussi di massa ed energia.....	70
9	CREAZIONE DEL MODELLO PER ANALISI .....	75
9.1	Prima fase LCA: confini del sistema dall'ingresso dei rifiuti organici all'impianto fino allo smaltimento dei flussi di rifiuto finali.....	75
9.1.1	Stoccaggio e pretrattamento del rifiuto.....	75
9.1.2	Fermentazione anaerobica.....	77
9.1.3	Compostaggio e Vagliatura.....	78
9.1.4	Trattamento arie di processo .....	81
9.1.5	Trattamento percolati e acque reflue di processo.....	82
9.1.6	Utilities.....	83
9.1.7	Emissioni diffuse.....	83
9.2	Seconda fase LCA: Estensione dei confini del sistema al trasporto dei rifiuti organici.....	84
9.3	Terza Fase LCA: Estensione dei confini del sistema alla gestione dei rifiuti organici in Italia. ....	86
10.	QUALITA' DEI DATI .....	87
11.	VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI.....	88
11.1	Categorie e metodo di valutazione degli impatti .....	88
11.2	Valutazione del danno.....	91
12.	INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI.....	105
12.1	Valutazione del danno.....	105
12.2	Analisi di incertezza.....	109
13.	CONCLUSIONI.....	117
	BIBLIOGRAFIA .....	120

## **PARTE GENERALE**

## **1 SCOPO DELLO STUDIO**

Lo scopo di questo studio è quello di analizzare come sono variati gli impatti ambientali dell'impianto di compostaggio Romagna Compost (FC) a seguito dell'intervento di ampliamento e adeguamento, che ha portato ad un'evoluzione impiantistica notevole: dal processo di compostaggio tradizionale ad un sistema integrato anaerobico-aerobico, nel periodo temporale 2007-2013.

Inoltre, ci si è posti l'obiettivo di valutare se, e quanto, l'introduzione del sistema di recupero energetico (elettrico e termico) nel 2009 (ampliamento dell'impianto con introduzione di 11 fermentatori anaerobici) abbia portato ad un reale miglioramento del processo con una diminuzione complessiva degli impatti.

A tal fine è stata impiegata la metodologia LCA (*Life Cycle Assessment*) come approccio scientifico in grado di confrontare i processi oggetto d'indagine, valutando l'impatto che ognuno di essi presenta in categorie di danno scelte. Lo strumento utilizzato per la fase di modellazione di ogni singolo scenario e per la quantificazione dei relativi impatti ambientali è stato il software SimaPro 8.0.4, versione PhD, e la banca dati Ecoinvent 3.1.

## 2 SOSTENIBILITA' AMBIENTALE E GESTIONE DEI RIFIUTI: approfondimento sullo scenario di digestione anaerobica e sulla normativa ambientale in materia

Il concetto sempre più affermato di sviluppo sostenibile, prevede un approccio multidisciplinare comprendente:

- *sostenibilità economica*, intesa come possibilità di garantire il sostentamento a tutti gli abitanti della terra;
- *sostenibilità sociale*, cioè assicurare sicurezza, salute ed istruzione ad ogni essere umano;
- *sostenibilità ambientale*, ovvero mantenimento della qualità delle risorse naturali e dell'ambiente.

Questi tre concetti sono indissociabili l'uno dall'altro e solitamente rappresentati dallo schema in figura 1.

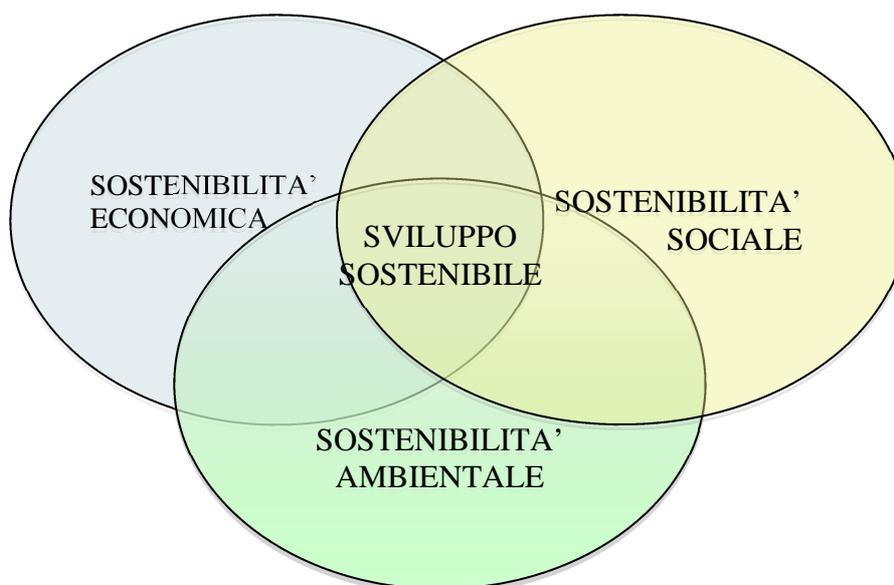


Figura 1 – rappresentazione del concetto di sviluppo sostenibile

La definizione più ampiamente condivisa di *sviluppo sostenibile* è quella contenuta nel rapporto Brundtland, elaborato nel 1987 dalla Commissione mondiale sull'ambiente e sullo sviluppo, dove viene inteso come un processo di cambiamento che mira a soddisfare i bisogni fondamentali di tutti gli individui presenti, senza compromettere le capacità delle generazioni future di soddisfare i propri. Il 28 Dicembre 2013 è stata pubblicata la decisione 1386/2013/UE contenente il programma generale di azione dell'Unione Europea in materia di ambiente fino al 2020 "*Vivere bene entro i limiti del nostro pianeta*" che si propone i seguenti obiettivi prioritari:

- proteggere, conservare e migliorare il capitale naturale dell'Unione;

- trasformare l'Unione in un'economia a basse emissioni di carbonio, efficiente nell'impiego di risorse, verde e competitiva;
- proteggere i cittadini dell'Unione da pressione e rischi d'ordine ambientale per la salute e il benessere;
- sfruttare al massimo i vantaggi della legislazione dell'Unione in materia di ambiente migliorandone l'applicazione;
- migliorare le basi cognitive e scientifiche della politica ambientale dell'Unione;
- garantire investimenti a sostegno delle politiche in materia di ambiente e clima e tener conto delle esternalità ambientali;
- migliorare l'integrazione ambientale e la coerenza delle politiche;
- migliorare la sostenibilità delle città dell'Unione;
- aumentare l'efficacia dell'azione dell'UE nell'affrontare le sfide ambientali e climatiche a livello internazionale.

La politica ambientale dell'Unione mira, quindi, ad un elevato livello di tutela, tenendo conto della diversità delle situazioni nelle varie regioni e si fonda sui principi di precauzione e di azione preventiva, di correzione dei danni causati all'ambiente, in via prioritaria alla fonte, nonché sul principio di "chi inquina paga".

Nel dettaglio, il Settimo programma di Azione europea individua specifiche azioni per dare piena attuazione alla legislazione dell'Unione in materia di rifiuti che in primis richiederà l'applicazione della gerarchia dei rifiuti e un uso efficace degli strumenti e di altre misure di mercato per garantire che:

1. le discariche siano limitate ai rifiuti residui (vale a dire non recuperabili e non riciclabili);
2. il recupero energetico sia limitato ai materiali non riciclabili;
3. i rifiuti riciclati siano usati come fonte principale e affidabile di materie prime per l'Unione, attraverso lo sviluppo di cicli di materiali non tossici;
4. i rifiuti pericolosi siano gestiti responsabilmente e che ne sia limitata la produzione;
5. i trasporti di rifiuti illegali siano sradicati, con il supporto di monitoraggio rigoso;
6. i rifiuti alimentari siano ridotti.

A tal fine a livello europeo si sta procedendo a un riesame della legislazione in vigore sui prodotti e i rifiuti, compreso un riesame degli obiettivi delle principali direttive sui rifiuti, basandosi sulla tabella di marcia verso un'Europa efficiente nell'impiego delle risorse.

Le politiche di gestione dei rifiuti dovranno necessariamente tener conto delle priorità individuate a livello europeo, prima tra tutte l'abbandono dell'utilizzo della discarica, l'attivazione di azioni utili a realizzare il disaccoppiamento fra gli indicatori economici e la produzione dei rifiuti.

## **2.1 Gestione dei rifiuti organici**

L'umanità dipende fortemente dall'impoverimento delle risorse fossili. È chiaro che esse continueranno ad avere un ruolo fondamentale nel nostro approvvigionamento di risorse per i prossimi decenni, ma è altrettanto chiaro che risulta necessaria una transizione verso fonti più sostenibili di materia ed energia. La biomassa proveniente da scarti alimentari o agricoli è una fonte di energia rinnovabile che può essere valorizzata tramite il processo di fermentazione anaerobica.

Ogni anno, 1.3 miliardi di tonnellate di materiale commestibile viene sprecato (Gustavsson et. al., 2011), quantità che rappresenta quasi un terzo della produzione alimentare mondiale. Il termine "spreco alimentare" definisce un prodotto destinato al consumo umano che è stato scartato, perso, scaduto, degradato o danneggiato da parassiti e insetti. La produzione di rifiuto alimentare può avere effetti su tutti e tre i pilastri dello sviluppo sostenibile:

- le perdite di prodotto durante il raccolto e lo stoccaggio interessano la sfera economica;
- la mancanza di cibo nei paesi sottosviluppati è un aspetto del tutto sociale;
- la privazione di risorse naturali senza essere utilizzate in campo alimentare riguarda la sfera ambientale.

La gestione degli scarti organici deve seguire determinate politiche basate sul concetto "3R", ovvero riduzione, riuso e riciclo. Per quanto riguarda il contesto europeo, la Direttiva quadro sui rifiuti 2008/98/CE, propone la cosiddetta gerarchia dei rifiuti:

- 1) prevenzione;
- 2) preparazione per il riutilizzo;
- 3) riciclaggio;
- 4) recupero (incluso il recupero di energia);
- 5) smaltimento.

Basandosi su questo concetto, la compagnia pubblica belga per la gestione dei rifiuti propone una gerarchia dettagliata e specifica per i rifiuti organici (Roels and Van Gijsegem, 2011):

- 1) prevenzione;
- 2) utilizzo per alimentazione umana;
- 3) conversione per alimentazione umana;
- 4) utilizzo per alimentazione animale;
- 5) utilizzo delle materie prime in industria, che si fonda sulla bioeconomia;
- 6) recupero degli scarti per produrre energia rinnovabile e fertilizzante, da digestione anaerobica e compostaggio;
- 7) incenerimento;
- 8) discarica.

La prevenzione/riduzione nella produzione di rifiuti alimentari è l'aspetto prioritario, ma spesso non è economicamente o tecnologicamente possibile. Per questo motivo, gli scarti alimentari, devono essere valorizzati il più possibile come risorsa per molti altri processi, ad esempio mangimi o produzione di energia.

La gestione dei rifiuti solidi urbani, in Europa, ha subito importanti cambiamenti negli ultimi vent'anni. Nonostante l'aumento della produzione di rifiuti in UE, la quantità di rifiuti urbani smaltiti in discarica si è ridotta notevolmente grazie anche alla realizzazione di diverse legislazioni europee, in particolare la Direttiva Rifiuti (2008/98/CE) e la Direttiva Discariche. Quest'ultima, infatti, impone agli Stati Membri di ridurre la quantità di rifiuti biodegradabili destinati alle discariche.

Nell'Unione Europea, la quantità di rifiuto organico prodotto ogni anno è compresa tra 118-138 milioni di tonnellate, di cui il 70% deriva dai rifiuti solidi urbani. Attualmente il 40% del rifiuto organico è inviato in discarica (Evangelisti et.al, 2013).

Infine, considerando gli obiettivi europei che tendono a ridurre l'uso di combustibile fossile e le emissioni di GHG, la produzione di energia da risorse rinnovabili è fondamentale e l'interesse verso processi agroenergetici è in continua crescita (inclusa la produzione di biogas).

I dati estrapolati dal portale dell'EurObserv'ER suddividono l'energia rinnovabile prodotta in Europa nel 2011 come segue:

- 46% idroelettrica;

- 26.5% eolica;
- 20% biomasse;
- 7% solare;
- 0.5% geotermica e maree.

### 2.1.1 Gestione dei rifiuti organici in Emilia Romagna

In Emilia Romagna, dai dati del report annuale ARPA (*La gestione dei rifiuti in Emilia-Romagna, report annuale 2013*), emerge che la produzione di rifiuti pro-capite è di 647 kg/ab (3% in meno rispetto al 2011 e 2012), suddiviso come indicato nel grafico 1.

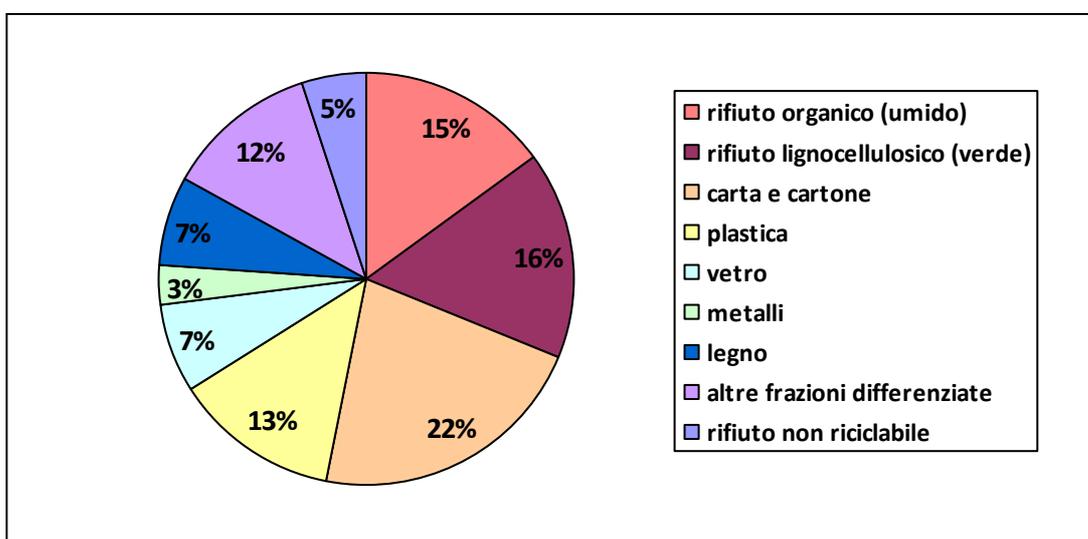


Grafico 1 - Composizione rifiuto Emilia- Romagna (Arpa Emilia Romagna, 2013)

Nell'ultimo decennio (2001-2012) la raccolta differenziata è passata dal 25% al 53.9% nel 2012. Per quanto riguarda la destinazione finale dei rifiuti, si riportano le % sul totale prodotto per le varie destinazioni:

- 0.3% frazioni selezionate ed avviate al recupero di materia;
- 24.1% incenerimento o combustibile da rifiuti (CDR);
- 4.3% biostabilizzazione;
- 17.4% discarica.

Nello specifico la produzione di rifiuto urbano nella provincia di Forlì-Cesena è 742 t/ab (superiore alla media regionale) con un 50% di raccolta differenziata, mentre la quota rimanente è stata inviata per il 77% ad incenerimento e per il 23% in discarica (ARPA, Emilia-Romagna, 2013).

## 2.2 Normativa di riferimento

La normativa riserva ampio spazio alle problematiche connesse ad una gestione corretta dei rifiuti biodegradabili, ponendo l'obiettivo di ridurre drasticamente il loro smaltimento in discarica per limitare gli impatti negativi sull'ambiente tra i quali le emissioni di metano. Il D.lgs 36/2003 e s.m.i., recepisce la Direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche e stabilisce per questo obiettivi di riduzione.

Le ultime modifiche ed integrazioni apportate al D.lgs. 152/2006 con il D.lgs. 205/2010 (in particolare all'art 182-ter) introducono, oltre all'obbligatorietà di utilizzare specifici contenitori per la raccolta del rifiuto organico, anche l'indicazione che gli enti locali devono adottare misure volte a incoraggiare "la raccolta separata e il trattamento dei rifiuti organici in modo da realizzare un elevato livello di protezione ambientale, l'utilizzo di materiali sicuri per l'ambiente ottenuti dai rifiuti organici, ciò al fine di proteggere la salute umana e l'ambiente".

Il rifiuto organico è composto sinteticamente da due frazioni:

- una parte denominata "umido" che comprende gli scarti da cucina (frutta, verdura, fondi di caffè, pesce, pane, uova, etc) e alcuni scarti del giardino (erba, foglie, piccoli rametti, cenere). Questa frazione viene identificata con il codice CER 20 01 08.

- una parte denominata "verde" che comprende le grosse potature, gli sfalci, gli scarti da giardino. Tale frazione è identificata con il codice CER 20 02 01.

Per raggiungere gli obiettivi di raccolta differenziata previsti dall'art. 205 del D.lgs. 152/2006, risulta particolarmente significativa e necessaria l'implementazione e l'organizzazione di circuiti di raccolta differenziata del rifiuto organico.

La frazione organica raccolta in modo differenziato è avviata agli impianti di compostaggio (o di digestione anaerobica e post-compostaggio) per la produzione di energia elettrica rinnovabile e fertilizzante, l'ammendante compostato misto (definito dall'art.2 del D.lgs. 75/2010). La produzione e l'utilizzo di compost fornisce quindi una soluzione univoca a due ordini di problemi: privilegiare quelle forme di gestione degli scarti che contemplano il recupero di materia e consentono di limitare l'impatto ambientale dei rifiuti e incentivare l'utilizzo di ammendanti organici al terreno per sopperire alla crescente carenza di sostanza organica.

Attualmente, le normative riguardanti gli impianti di digestione anaerobica e compostaggio sono le seguenti:

1) **D.lgs 152/2006**, noto anche come *Testo Unico Ambientale* e successive modifiche ed integrazioni con il D.lgs 128/2010 e D.lgs 205/2010. È il testo unico di riferimento in materia di valutazione di impatto ambientale, in quanto contiene al suo interno la normativa italiana relativa alla difesa del suolo, alla tutela delle acque, alla riduzione dell'inquinamento, al risarcimento dei danni ambientali e alla gestione rifiuti.

La parte IV, per la gestione dei rifiuti e per le emissioni di impianto di cogenerazione, sono quelle che interessano maggiormente gli impianti di fermentazione anaerobica e compostaggio.

Il decreto è stato modificato ed integrato con il D.lgs 128/2010, il quale recepisce e regola la strategia IPPC (*Integrated Pollution Prevention and Control*) in Italia. Quest'ultima ha come obiettivo la riduzione integrata dell'inquinamento di alcuni settori produttivi, per la messa in funzione dei quali è richiesta un'autorizzazione denominata "Autorizzazione integrata ambientale" (AIA), che si basa su tre punti fondamentali:

- L'approccio integrato, implica che le autorizzazioni devono prendere in considerazione l'impatto ambientale da un punto di vista globale, comprendendo emissioni in aria, acqua e suolo, produzione di rifiuti, utilizzo di risorse, efficienza energetica, rumore, radiazioni, vibrazioni, prevenzione degli incidenti e ripristino del sito dopo la chiusura, con lo scopo di conseguire un'elevata protezione dell'ambiente nel suo complesso;
- Le BAT (*Best Available Techniques*), ovvero le condizioni delle autorizzazioni devono essere basate sulle migliori tecniche disponibili (MTD);
- Le condizioni locali: le autorità competenti, per il rilascio delle autorizzazioni, tengono conto delle caratteristiche tecniche dell'impianto, della localizzazione geografica e delle condizioni ambientali locali.

La normativa IPPC prevede inoltre un'ampia partecipazione del pubblico poiché la popolazione ha diritto di partecipare al processo decisionale ed essere informata delle conseguenze.

2) **D.lgs 46/2014** – "*Attuazione della direttiva 2010/75/UE relativa alle emissioni industriali prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento*", relativa alle attività industriali ad elevato potenziale inquinante, come le attività energetiche, l'industria chimica e la gestione dei rifiuti. Tale direttiva prevede un approccio alle problematiche ambientali delle attività coinvolte ancora più integrato rispetto a quanto previsto dalla direttiva IPPC (2008/01/CE).

Le novità apportate dal D.lgs 46/2014 riguardano in sintesi:

- la modifica del significato di "installazione" e, di conseguenza, una diversa modalità di applicazione dell'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA) sulle installazioni stesse;
- l'introduzione dell'obbligo di definire le condizioni dell'AIA, sulla base delle conclusioni sulle BAT o, in difetto di queste, sulle migliori tecniche disponibili tratte dai documenti pubblicati dalla Commissione Europea (BREF, *Business Resource Efficiency*);
- in caso di impianto non precedentemente assoggettato alla disciplina AIA, dovrà adeguarsi entro il 2015 a tale autorizzazione, presentando istanza entro il 7 settembre 2014. La nuova AIA dovrà richiamare le prescrizioni già contenute nelle autorizzazioni sostituite e prevedere, già in fase di

rilascio, le modalità di ripristino delle matrici ambientali del sito che saranno oggetto d'indagine alla cessazione dell'attività industriale;

- l'introduzione di presentare, in sede di domanda di AIA, una relazione di riferimento recante le informazioni sullo stato della qualità del suolo e delle acque sotterranee;
- l'introduzione dell'obbligo di prevedere in AIA un controllo delle acque sotterranee e del suolo;
- la modifica dei tempi di efficacia e validità dell'AIA e delle modalità di riesame della stessa: 10 anni in assenza di certificazioni ambientali, 12 anni per i gestori dotati di certificazione ISO 14001 e 16 anni per i gestori con certificazione EMAS.

3) **D.lgs 75/2010**, *“Riordino e revisione della disciplina in materia di fertilizzanti”*, nel quale sono descritte le tipologie di fertilizzanti e concimi. L'allegato II di questo decreto classifica gli ammendanti, definendo il modo di preparazione, le componenti essenziali, il titolo minimo in elementi nutritivi e sostanze utili. Nello specifico, l'ammendante compostato misto è un “prodotto ottenuto attraverso un processo controllato di trasformazione e stabilizzazione di rifiuti organici che possono essere costituiti dalla frazione organica dei rifiuti solidi urbani provenienti dalla raccolta differenziata, da rifiuti di origine animale compresi liquami zootecnici, da rifiuti di attività agroindustriale, dalla lavorazione del legno, da reflui e fanghi, nonché dalle matrici previste per l'ammendante compostato verde”. Inoltre, il decreto stabilisce i criteri per l'etichettatura dei prodotti da commercializzare.

4) **Delibera di Giunta Regionale n° 2006/1996** – *“Regolamentazione dell'utilizzo del biostabilizzato ottenuto dalla stabilizzazione aerobica delle matrici organiche dei rifiuti”*. La normativa regionale definisce le condizioni per l'utilizzazione, come materiale d'ingegneria, del biostabilizzato, rifiuto speciale non pericoloso (CER 19 05 03), ottenuto mediante biostabilizzazione aerobica della FORSU (Frazione Organica dei Rifiuti Solidi Urbani). Definisce, inoltre, la modalità di campionamento per la determinazione e la verifica dei requisiti minimi e limiti di legge.

Per quanto riguarda la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili è stato introdotto l'obbligo a carico dei produttori ed importatori di energia elettrica prodotta da fonti non rinnovabili di immettere nel sistema elettrico nazionale, a decorrere dal 2002, una quota minima di elettricità prodotta da impianti alimentati a fonti rinnovabili entrati in esercizio dopo il 1 Aprile 1999. Produttori ed importatori soggetti all'obbligo possono adempiervi immettendo in rete elettricità prodotta da fonti rinnovabili oppure acquistando da altri produttori titoli, chiamati Certificati Verdi

(CV), comprovanti la produzione dell'equivalente quota. Il decreto legislativo n. 387/03, con il quale è stata recepita la direttiva europea 2001/77/CE, propone la promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno italiano e recepisce la definizione di fonte rinnovabile. Nel corso degli anni sono state aggiornate le direttive per l'incentivazione dell'energia da fonti rinnovabili (D.lgs n.387/2003) e messe a punto le procedure per la qualificazione IAFR degli impianti (IAFR, Impianti Alimentati da Fonti Rinnovabili) e per l'emissione dei Certificati Verdi. In alternativa ai Certificati verdi, nel caso di impianto con potenza nominale media annua non superiori ad 1MW, l'incentivazione può essere riconosciuta dall'Autorità competente (GSE S.p.a, Gestore dei Servizi Energetici), mediante il compenso di una tariffa onnicomprensiva e ha durata di 15 anni. Il calcolo della tariffa per i nuovi impianti varia ogni tre anni con decreto del Ministero dello Sviluppo Economico con entità diversa a seconda della fonte rinnovabile utilizzata. La tariffa comprende sia il valore dell'incentivo che il ricavo per la vendita dell'energia elettrica prodotta. La tabella 3 della legge finanziaria 2008, successivamente aggiornata con D.lgs 99/2009 per gli impianti entrati in esercizio dopo il 31/12/2007, prevedeva una tariffa onnicomprensiva per il biogas e per le biomasse (ad esclusione dei biocombustibili liquidi) di 0,28€/kWh. Infine, il D.lgs n° 28/2011 ha ridefinito le tariffe d'incentivazione per gli impianti entrati in esercizio dopo il 31 Dicembre 2012.

### **3 TRATTAMENTO BIOLOGICO DEI RIFIUTI ORGANICI: tecnologie e BAT disponibili**

Il trattamento biologico consiste in una serie di processi e reazioni chimiche che portano alla mineralizzazione delle componenti organiche maggiormente degradabili (stabilizzazione) e all'igienizzazione per ottenere un prodotto stabile e inerte.

I fattori fisico-chimici che condizionano l'andamento delle reazioni biologiche e pertanto caratterizzano il processo di biotrasformazione sono i seguenti:

- concentrazione di ossigeno ed areazione;
- condizioni termometriche ottimali nelle diverse fasi del processo;
- umidità della miscela;
- gestione, controllo ed abbattimento dei potenziali agenti odorigeni nelle fasi critiche del processo.

Esistono diverse configurazioni impiantistiche di trattamento biologico; di seguito descriviamo il processo digestione anaerobica e compostaggio, fasi fondamentali del processo oggetto di studio.

#### **3.1 Digestione anaerobica**

Il trattamento anaerobico consiste nella degradazione biologica della frazione organica del rifiuto da parte di microrganismi che si sviluppano e vivono in un ambiente in cui è assente l'ossigeno. Lo

scopo del processo è la riduzione di massa, la mineralizzazione delle componenti organiche maggiormente degradabili e l'igienizzazione con produzione di metano ed anidride carbonica.

Essa coinvolge diversi gruppi microbici interagenti fra loro: i batteri idrolitici, i batteri acidificanti (acetogeni ed omoacetogeni) ed infine i batteri metanigeni, quelli cioè che producono metano e anidride carbonica con prevalenza del gas di interesse energetico che rappresenta circa i 2/3 del biogas prodotto. I batteri metanigeni occupano quindi solo la posizione finale della catena trofica anaerobica. Il metano, poco solubile in acqua, passa praticamente nella fase gassosa, mentre la CO<sub>2</sub> si ripartisce in fase gassosa e in quella liquida (APAT, 2005).

La conversione di substrati organici complessi in metano avviene, come accennato, attraverso una catena trofica anaerobica e il processo biodegradativo si compone delle seguenti fasi (fig.2):

1. Idrolisi dei substrati complessi accompagnata da acidificazione con formazione di acidi grassi volatili, chetoni ed alcoli;
2. Fase acetogenica, in cui, a partire dagli acidi grassi, si ha la formazione di acido acetico, acido formico, biossido di carbonio e di idrogeno molecolare;
3. Metanizzazione, nella quale si ha la formazione di metano a partire dall'acido acetico o attraverso la riduzione del biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>) utilizzando l'idrogeno come co-substrato. In minor misura si ha la formazione di metano a partire dall'acido formico.

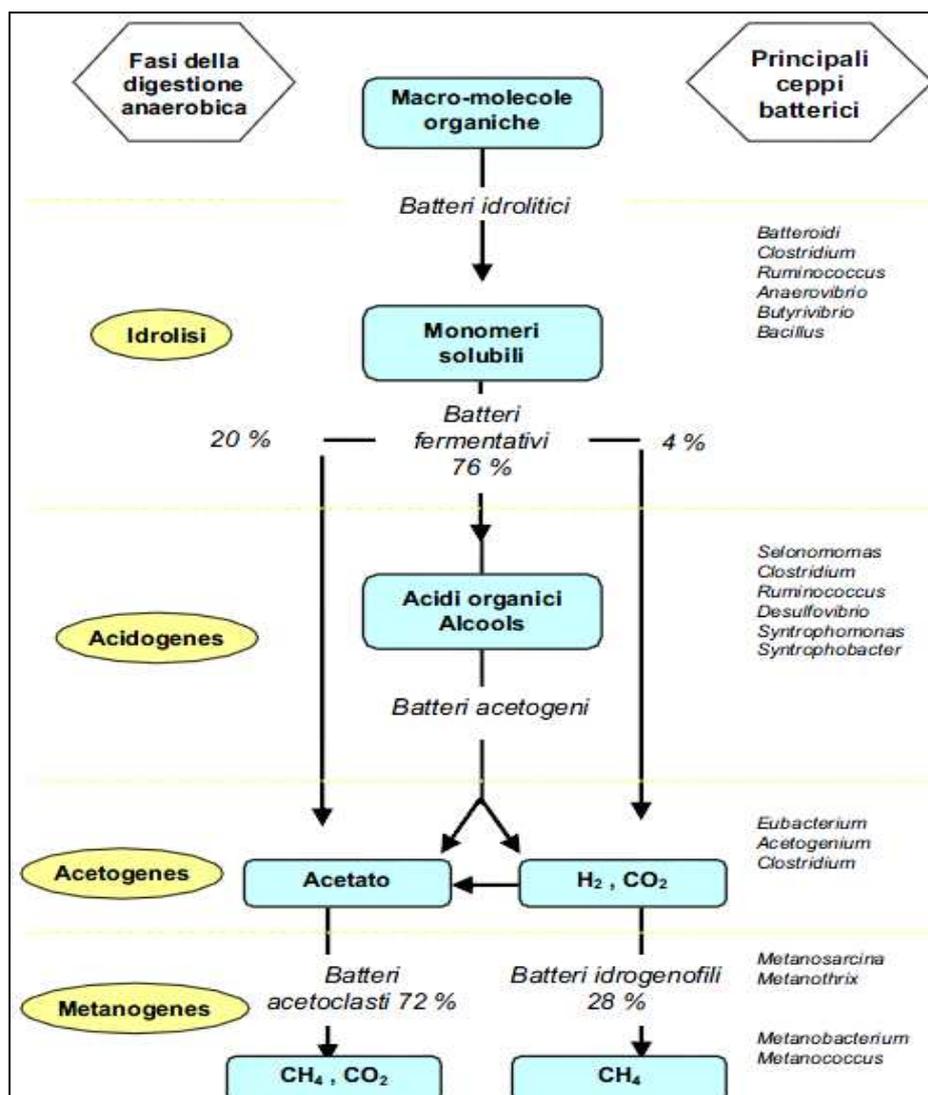


Figura 2 - Fasi processo di fermentazione anaerobica (digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti solidi urbani - APAT, 2005)

### 3.1.1 Idrolisi e acidificazione

In questa prima fase, per intervento di diversi gruppi batterici, si ha la degradazione di substrati organici complessi particolati o solubili, quali proteine, grassi e carboidrati, con formazione di composti semplici, aminoacidi, acidi grassi e monosaccaridi in forma solubile. Contestualmente all'idrolisi del materiale organico complesso, particolato o solubile, avviene il processo fermentativo acidogenico in cui i batteri fermentativi degradano i monomeri ed oligomeri organici, zuccheri, acidi grassi e aminoacidi, producendo acidi grassi volatili, per lo più a catena corta quali il propionato ed il butirato.

### 3.1.2 Acetogenesi

A partire dai substrati formati nel corso della fase di idrolisi ed acidificazione, i batteri acetogeni producono acido acetico (CH<sub>3</sub>COOH), acido formico (HCOOH), CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>.

### 3.1.3 Metanogenesi

La produzione di  $\text{CH}_4$  rappresenta la conclusione della catena trofica anaerobica. Il metano infatti è l'unico composto non reattivo nell'intero processo di digestione anaerobica e può, pertanto, essere considerato il prodotto finale. La produzione del metano può avvenire essenzialmente attraverso due differenti vie di reazione: una via prevede la metanogenesi ad opera dei batteri idrogenotrofi, che operano l'ossidazione anaerobica dell'idrogeno, mentre la seconda via, la cosiddetta via acetoclastica, prevede la dismutazione anaerobica dell'acido acetico con formazione di metano e biossido di carbonio. La maggior parte della produzione di metano avviene attraverso questo secondo meccanismo (fig.3).

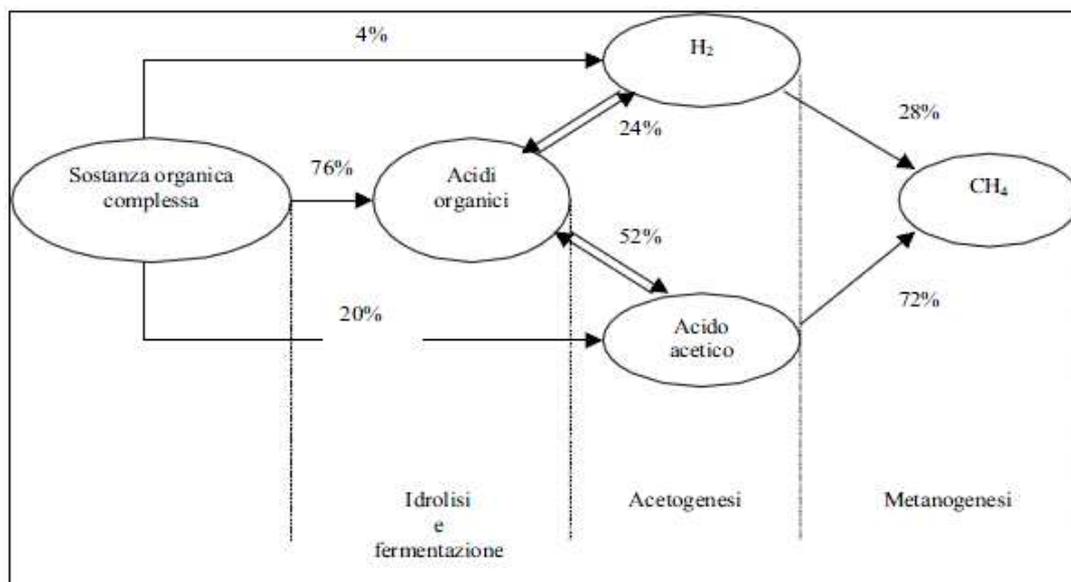


Figura 3 – Schema di flusso quantitativo dei diversi cammini metabolici del processo di fermentazione anaerobica (digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti solidi urbani - APAT , 2005)

### 3.1.4 Parametri di processo

L'attività biologica anaerobica è stata evidenziata in un ampio intervallo di temperatura tra  $-5^{\circ}\text{C}$  e  $+70^{\circ}\text{C}$ . Esistono tuttavia differenti specie di microrganismi classificabili in base all'intervallo termico ottimale di crescita:

- psicrofili, temperature inferiori ai  $20^{\circ}\text{C}$ ;
- mesofili, temperatura comprese tra i  $20^{\circ}\text{C}$  e i  $40^{\circ}\text{C}$ ;
- termofili, temperatura superiori ai  $45^{\circ}\text{C}$ .

La digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti solidi urbani è ritenuta una tecnologia ormai divenuta in ambito europeo nota ed affidabile.

### 3.2 Compostaggio

È un processo di maturazione biologica controllata, in ambiente aerobico, della sostanza organica attraverso il quale si ha la produzione di materiali a catena molecolare più semplice, più stabili, igienizzati, ricchi di composti umici. Il processo avviene ad opera dell'interazione sinergica di

diversi ceppi di microrganismi operanti in ambiente aerobico: batteri, funghi, attinomiceti, alghe, protozoi.

### ***3.2.1 Bioossidazione intensiva***

In questa fase sono presenti intensi processi di degradazione delle componenti organiche più facilmente degradabili (zuccheri e amminoacidi) e la temperatura può arrivare a 65-70°C, con consumo di ossigeno e produzione di anidride carbonica, grazie all'energia liberata dalla rottura dei legami chimici di diversi composti organici. La temperatura superiore ai 55°C per almeno tre giorni permette l'igienizzazione della massa e la morte dei semi delle piante infestanti. La biomassa deve essere rivoltata più volte, per favorire l'omogeneizzazione ed evitare la formazione di zone anossiche, che potrebbero compromettere il buon funzionamento del processo.

### ***3.2.2 Maturazione***

I processi di decomposizione interessano le molecole organiche più complesse (amido, lignina e cellulosa). La fase è mesofila con temperature tra i 40-45 °C e il materiale si arricchisce di sostanze umiche.

### ***3.2.3 Parametri di processo***

I fattori fisico-chimici più importanti nella produzione del compost sono: la porosità, l'umidità, l'ossigeno, la quantità di elementi nutrienti, il pH e il rapporto carbonio-azoto (C/N). Nell'impianto oggetto di studio, la fase di bioossidazione è sostituita dal processo di fermentazione anaerobica. La successiva fase di compostaggio ha la funzione di stabilizzare la biomassa e degradare le sostanze che non sono state decomposte nella fermentazione.

## 4 L'IMPIANTO ROMAGNA COMPOST

### 4.1 Storia

L'impianto "Romagna Compost" è situato in Via Rio della Busca (fig. 4), all'interno dell'area della discarica comunale e dista in linea d'aria circa 3 km dalla frazione di San Carlo e 10 km dal centro di Cesena (FC).



Figura 4 – Collocazione dell'impianto "Romagna Compost" (Google maps, 2014)

L'impianto, attivo dal 2001, è gestito da Romagna Compost srl, una società costituita da Herambiente e da altre società operanti nel settore agricolo e agroalimentare del territorio cesenate (Orogel, Amadori, Consorzio Agrario di Forlì-Cesena, Sfir, etc.). La produzione di energia rinnovabile ha avuto inizio però solo nel Dicembre del 2009, in seguito ad un processo di ampliamento che ha trasformato il semplice processo aerobico di compostaggio in un trattamento integrato anaerobico-aerobico con annesso impianto di cogenerazione per la produzione di energia elettrica e calore. Il progetto di ampliamento deriva dalla necessità di trovare collocazione in ambito provinciale ad una sempre più crescente quantità di rifiuti organici provenienti dai circuiti di raccolta e ha permesso di trattare 45000 tonnellate/anno di frazione umida e 15000 t/a di frazione lignocellulosica, entrambe provenienti da raccolta differenziata.

I principali obiettivi dell'intervento sono i seguenti:

1. ridurre le emissioni odorigene provenienti dal processo di compostaggio;
2. adeguare la potenzialità dell'impianto alle previsioni del Piano Provinciale Rifiuti considerando gli obiettivi stabiliti dal D.Lgs 152 del 2006;

3. produrre energia elettrica da fonti rinnovabili, per il raggiungimento degli obiettivi del pacchetto clima-energia.

Il bacino territoriale di riferimento dell'impianto è quello della provincia di Forlì-Cesena, nel quale la presenza di un forte settore agricolo e di un elevato numero di insediamenti agroindustriali fanno di questo territorio un ambito potenzialmente ricco di matrici organiche che necessitano di essere smaltite.

## 4.2 Struttura

Sono di seguito descritte le varie fasi di attività relative al funzionamento dell'impianto.

### 4.2.1. Attività svolte

L'impianto è autorizzato con DGP (Delibera di Giunta Provinciale) 101564/2007 al trattamento dei rifiuti organici con le seguenti operazioni di recupero:

- **R13**: messa in riserva di rifiuti per sottoporli ad una delle operazioni indicate;
- **R3**: riciclaggio/recupero delle sostanze organiche non utilizzate come solventi.

Per la linea di recupero biogas:

- **R1**: utilizzazione come combustibile o come altro mezzo per produrre energia.

Il 7 settembre 2014 è stato avviato il procedimento per l'ottenimento dell'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA), come previsto dal D.lgs 46/2014.

Il recupero dei rifiuti organici, come precedentemente detto, è basato su un sistema integrato aerobico-anaerobico:

1. *digestione anaerobica* dei rifiuti organici con produzione di biogas ad elevato contenuto di metano (circa il 60%);
2. *affinamento aerobico* del prodotto della digestione anaerobica (digestato) mediante una prima fase di ossidazione intensiva in corsia areata e da una seconda fase di stabilizzazione in platea areata.

Il processo, è suddiviso nelle seguenti fasi:

1. ricezione e stoccaggio rifiuti organici e lignocellulosici;
2. pretrattamento del rifiuto organico umido;
3. digestione anaerobica con recupero di energia elettrica e calore;
4. miscelazione;

5. fase aerobica;
6. vagliatura;
7. produzione di Ammendante compostato misto (compost).

Inoltre, è prevista una linea per il trattamento dei reflui e una per le arie esauste.

#### **4.2.2 Ricezione e stoccaggio rifiuti organici e lignocellulosici**

Il rifiuto organico umido da trattare proviene in parte dalla raccolta differenziata del territorio provinciale di Forlì-Cesena, il quale però non è sufficiente per soddisfare il carico medio giornaliero necessario pari a 130 t/d, per cui occorre accettare rifiuti provenienti anche da zone extra-provinciali o extra-regionali.

L'impianto di compostaggio ROMAGNA COMPOST s.r.l. tratta esclusivamente matrici organiche selezionate tra le quali:

- *frazione organica dei rifiuti urbani proveniente da raccolta differenziata*, come scarti di cucina raccolti presso i privati cittadini o attività commerciali (mense, ristoranti, ortofrutta, etc);
- *scarti vegetali provenienti da attività agro-industriali*, come scarti vegetali provenienti da aziende che preparano prodotti freschi o conservati (scarti della produzione o eccedenze);
- *materiale lignocellulosico proveniente da attività di manutenzione del verde pubblico e privato*, come potature, legname, sfalci d'erba e foglie derivanti dall'attività di manutenzione delle aree verdi pubbliche e private del comune di Cesena.

Le tipologie di rifiuto autorizzate al trattamento sono in indicate in tabella 1; attualmente l'impianto tratta prevalentemente 20 01 08 e 20 02 01.

<b>CER</b>	<b>Descrizione</b>
02 01 02	Scarti di tessuti animali
02 01 03	Scarti vegetali
02 01 06	Feci animali, urine e letame (lettiere), effluenti
02 01 07	Rifiuti della selvicoltura
02 02 01	Fanghi di operazioni di lavaggio e pulizia
02 02 02	Scarti di tessuti animali
02 02 03	Scarti inutilizzabili per il consumo e la trasformazione
02 02 04	Fanghi prodotti dal trattamento in loco degli effluenti

02 03 01	Fanghi derivati da operazioni di lavaggio, pulizia e sbucciatura
02 03 04	Scarti inutilizzabili per la trasformazione ed il consumo
02 03 05	Fanghi dal trattamento sul posto di effluenti
02 04 01	Rifiuto residuo dalle operazioni di pulizia e lavaggio delle barbabietole
02 04 03	Fanghi da trattamento sul posto di effluenti
02 05 01	Scarti inutilizzabili per la trasformazione ed il consumo
02 06 03	Fanghi da trattamento di effluenti sul posto
02 07 01	Rifiuti da operazioni di lavaggio pulizia e macinazione materia prima
02 07 02	Rifiuti della distillazione di bevande alcoliche
02 07 04	Scarti inutilizzabili per la trasformazione ed il consumo
02 07 05	Fanghi dal trattamento di effluenti sul posto
03 01 01	Scarti di corteccia e sughero
03 01 05	Segatura e trucioli
03 03 01	Scarti di corteccia e legno
03 03 02	Fanghi di recupero dei bagni di macerazione
03 03 07	Scarti della separazione meccanica nella produzione di polpa da rifiuti di carta cartone
03 03 08	Scarti della selezione di carta e cartone destinati ad essere riciclati
03 03 11	Fanghi dal trattamento di effluenti sul posto
04 01 07	Fanghi non contenenti cromo
04 01 09	Rifiuti delle operazioni di confezionamento e finitura
04 02 10	Materiale organico proveniente da prodotti naturali
04 02 20	Fanghi da trattamento di effluenti sul posto
04 02 21	Fibre tessili grezze
04 02 22	Rifiuti da fibre tessili lavorate
10 01 01	Ceneri pesanti, scorie e polveri di caldaia
10 01 03	Ceneri leggere di torbe e legno non trattate
15 01 01	Carta e cartone
15 01 03	Imballaggi di legno
19 05 01	Parte di rifiuti urbani e simili non compostata
19 05 02	Parte di rifiuti animali e vegetali non compostata
19 05 03	Compost fuori specifica

19 06 04	Digestato da trattamento anaerobico di rifiuti urbani
19 06 06	Digestato da trattamento anaerobico di animali e vegetali
19 07 03	Percolato di discarica diverso dal 19 07 02
19 08 01	Vaglio
19 08 05	Fanghi di trattamento delle acque reflue urbane
19 12 01	Carta e cartone
19 12 07	Legno diverso dal 19 12 06
19 12 12	Altri rifiuti prodotti dal trattamento meccanico dei rifiuti
20 01 01	Carta e cartone
20 01 08	Rifiuti biodegradabili di cucine e mense
20 01 38	Legno diverso da 20 01 37
20 02 01	Rifiuti biodegradabili
20 03 02	Rifiuti di mercati
20 03 03	Rifiuti della pulizia stradale

Tabella 1 – Tipologie di rifiuti autorizzati al trattamento

Il rifiuto è stoccato temporaneamente all'interno di un edificio chiuso di circa 800m<sup>3</sup>, mantenuto in depressione mediante due aspiratori che captano le arie esauste. Gli automezzi che trasportano il rifiuto organico accedono all'area attraverso portoni automatici i quali rimangono aperti solo per il tempo strettamente necessario a consentire le operazioni di scarico a terra (fig. 5). Il materiale è



Figura 5- Fase conferimento rifiuto organico umido

poi sistemato mediante pala gommata nei box di stoccaggio in attesa di essere inviato ai trattamenti successivi. La pavimentazione dell'area è dotata di canalizzazioni e pozzetti per la raccolta del percolato prodotto dal rifiuto stoccato.

Il rifiuto lignocellulosico (ramaglie, potature, etc) è depositato direttamente nel piazzale esterno, in attesa di essere utilizzato come strutturante nel fase di compostaggio.

#### **4.2.3 Pretrattamento del rifiuto organico umido**

I rifiuti organici sono poi triturati e omogeneizzati mediante pala gommata. Il prodotto così ottenuto viene miscelato con una pari quantità di materiale digestato in uscita dai fermentatori, che costituisce l'inoculo. La miscela in ingresso al fermentatore è costituita quindi da:

- 50% di rifiuto organico fresco;
- 50% di inoculo (digestato).

#### 4.2.4 Digestione anaerobica

L'impianto di digestione anaerobica a secco, progettato da Bekon Energy Technologies GmbH & Co. KG, permette di trattare materiali con alto contenuto di sostanza secca (fino al 50%) senza la necessità di doverli convertire in substrato liquido, come avviene per la digestione a umido. Il processo Bekon, dal nome della ditta che lo ha brevettato, è una fermentazione batch monofase, in quanto le diverse reazioni della biodegradazione anaerobica (idrolisi, acidogenesi e metanogenesi) avvengono all'interno di



Figura 6 – Fermentatore aperto con griglia di tenuta

unico fermentatore, senza aggiunta o prelievo di materiale lungo tutto il periodo di fermentazione. L'impianto è costituito da 11 fermentatori a forma di garage in cemento armato a tenuta di gas e resistenti agli acidi. Tali fermentatori sono svuotati e riempiti ogni 25-30 giorni, in modo differito per garantire una produzione di biogas costante. Sul lato anteriore del fermentatore, appena prima della chiusura, è applicata una griglia di tenuta che consente di riempire la biocella direttamente fino alla porta ed evitare che il materiale faccia pressione sul portone. I fermentatori lavorano in leggera sovrappressione fino ad un massimo di 25mbar per evitare, in qualsiasi momento, la formazione di una miscela esplosiva di gas e aria al



Figura 7 - Materiale digestato all'apertura del fermentatore

suo interno. Tale pressione è garantita da un sistema di sicurezza a “guardia idraulica”.

I portoni si aprono e si chiudono con un sistema idraulico e le pareti del fermentatore sono isolate tramite coibentazione. La pavimentazione del fermentatore presenta una pendenza dell'1% in direzione della porta, per facilitare la raccolta del percolato che si forma durante il processo, mediante un canale di raccolta con annessa pompa ad immersione per il drenaggio.

Quest'ultimo viene raccolto temporaneamente in un serbatoio chiuso, isolato e riscaldato per poi essere ricircolato e distribuito in continuo sulla biomassa, in modo tale da mantenere valori di umidità costante (fig.8).

Il rifiuto organico è unito ad una quota di materiale digestato (che costituisce l'inoculo) e caricato con pala meccanica all'interno del fermentatore dove staziona staticamente per circa 25-28 giorni, con un range di temperatura costante favorevole allo sviluppo di batteri mesofili (37-39°C), grazie ad un sistema di riscaldamento a parete e a pavimento con serpentine alimentate da acqua calda, grazie al calore sfruttato dalla cogenerazione.

Il ricircolo del percolato permette la veicolazione delle sostanze nutritive utili ai microrganismi che producono biogas.

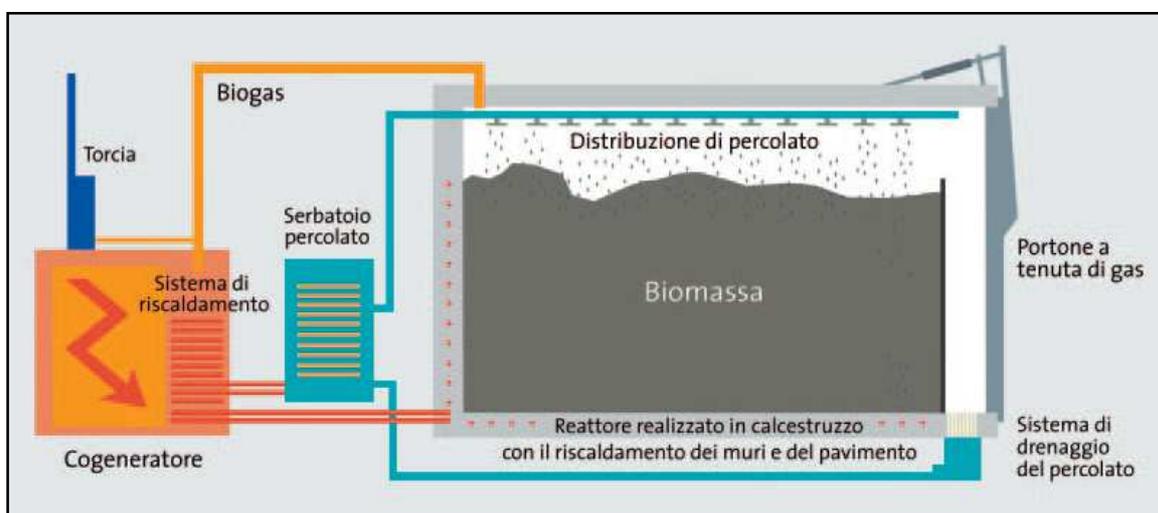


Figura 8 - Schema di funzionamento fermentatori anaerobici (BEKON Energy Technologies GmbH & Co)

Il gas prodotto all'interno dell'impianto di digestione anaerobica prima di essere inviato all'unità di cogenerazione viene deumidificato, compresso (da 14mbar a 104mbar circa) e depurato mediante un filtro a carboni attivi. Il biogas, così trattato, viene convogliato direttamente ai cogeneratori, i quali modulano la loro potenza, per mantenere la pressione del sistema tra i 3mbar e i 25mbar. All'interno del serbatoio del percolato può prodursi biogas, anch'esso convogliato all'impianto di trattamento gas. La qualità del biogas prodotto è monitorata in continuo tramite un analizzatore di gas che determina la concentrazione di metano, azoto, anidride carbonica e acido solfidrico. In caso di guasti al sistema o black-out l'impianto si pone automaticamente in una condizione di sicurezza e il gas prodotto viene bruciato in torcia.

Temperatura	37 °C
pH	6.5-7.5
Pressione	25 mbar
Durata	circa 25 giorni
Composizione biogas <sup>1</sup>	circa 60% di CH <sub>4</sub> circa 40 % di CO <sub>2</sub> 100 ppm di NH <sub>3</sub> 50 ppm di H <sub>2</sub> S
Fattore di produzione	circa 80 m <sup>3</sup> di biogas/t

Tabella 2 - Parametri di controllo del processo

Nel giorno previsto per lo svuotamento/riempimento, i fermentatori interessati, prima di essere aperti, vengono bonificati con i gas di scarico dei cogeneratori e la miscela di aria esausta che ne deriva viene bruciata prima attraverso la torcia e successivamente convogliata al biofiltro (quando la concentrazione di metano è inferiore al 10% Vol). Successivamente il fermentatore interessato viene trattato con aria fresca inviata poi al biofiltro. Generalmente, ogni settimana, vengono svuotati e nuovamente riempiti tre fermentatori.

#### 4.2.4.1 Recupero del calore da cogenerazione

L'impianto di cogenerazione esistente, costituito da due motori endotermici a quattro tempi, è caratterizzato da:

- potenza elettrica: 499 kW per ogni motore, attualmente completamente recuperata;
- potenza termica: 530 kW per ogni motore, attualmente recuperata solo in parte

Si riporta nella tabella 3 il dettaglio della potenza termica recuperabile da ciascun modulo di cogenerazione, dalla quale si evince che è possibile recuperare calore sia tramite raffreddamento del blocco motore, sia dal raffreddamento dei gas di scarico portandoli a circa 180 °C.

Potenza termica recuperabile	u.d.m	Potenza cogeneratore	
		Pieno Carico (100 %)	Metà Carico (50 %)
Primo stadio intercooler	kW	55	1
Olio	kW	57	45
Acqua di raffreddamento motore	kW	185	150
<b>Potenza termica attualmente recuperabile</b>	kW	<b>297</b>	<b>196</b>
Gas di scarico raffreddati a 180°C	kW	233	128
<b>Potenza termica complessiva</b>	kW	<b>530</b>	<b>324</b>

Tabella 3 - Dettaglio potenza termica recuperabile

Attualmente, viene utilizzata solo una parte della potenza termica recuperata dal raffreddamento del blocco motore, per il riscaldamento delle celle di digestione anaerobica, del serbatoio di accumulo

<sup>1</sup> sono state riportate le concentrazioni dei componenti presenti in maggior quantità. Altre sostanze come H<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e silani sono contenuti in concentrazioni basse e irrilevanti.

del percolato, della palazzina uffici e dei locali tecnici; il calore in eccesso viene dissipato in aria.

Per massimizzare il recupero termico, è stata richiesta alla provincia di Forlì-Cesena

l'autorizzazione per realizzare i seguenti interventi:

1. un sistema di preriscaldamento dell'aria immessa al di sotto delle corsie di bioossidazione aerobica, sfruttando completamente il calore attualmente già disponibile dal raffreddamento del blocco motore;
2. la predisposizione al recupero di calore dai gas di scarico dei cogeneratori prima dell'immissione in atmosfera, incrementando la quota di energia termica disponibile in impianto.

#### 1) Sistema di preriscaldamento

Lo scopo del sistema di preriscaldamento è:

- aumentare la temperatura dell'aria immessa al di sotto delle corsie di bioossidazione aerobica;
- ridurre il quantitativo di umidità presente nel materiale posto sopra le corsie di bioossidazione aerobica.

Nella gestione del processo di compostaggio si ottiene così il miglioramento della fase di vagliatura del prodotto al termine delle fasi di bioossidazione intensiva e stabilizzazione aerobica, con un incremento nella produzione di compost di qualità e contemporanea riduzione della quantità di biostabilizzato (compost fuori specifica) prodotto.

L'intervento verrà realizzato posando una tubazione di collegamento tra l'accumulo del circuito di riscaldamento esistente, posto nel locale cogenerazione, ed il ventilatore che insuffla aria sotto i cumuli in bioossidazione: analogamente ad un impianto di riscaldamento domestico l'acqua calda attraverserà uno scambiatore di calore acqua-aria, posto all'interno del canale di aspirazione del ventilatore del capannone di bioossidazione, e ritornerà più fredda all'accumulo per rientrare nuovamente in circolo. Il sistema di preriscaldamento dell'aria potrà essere attivato o meno, a seconda delle esigenze di processo.

#### 2) Recupero calore dai gas di scarico dei cogeneratori

Con l'obiettivo di massimizzare il recupero di calore prodotto dal sistema di sfruttamento energetico del biogas, si effettuerà l'installazione di due scambiatori di calore aria-acqua, uno per ogni cogeneratore, in grado di recuperare energia termica dai gas di scarico. Nella figura seguente si riporta uno schema degli stadi termici dai quali è possibile recuperare il calore prodotto dalla sezione di cogenerazione, in cui è evidenziato l'intervento in progetto (si veda riquadro).

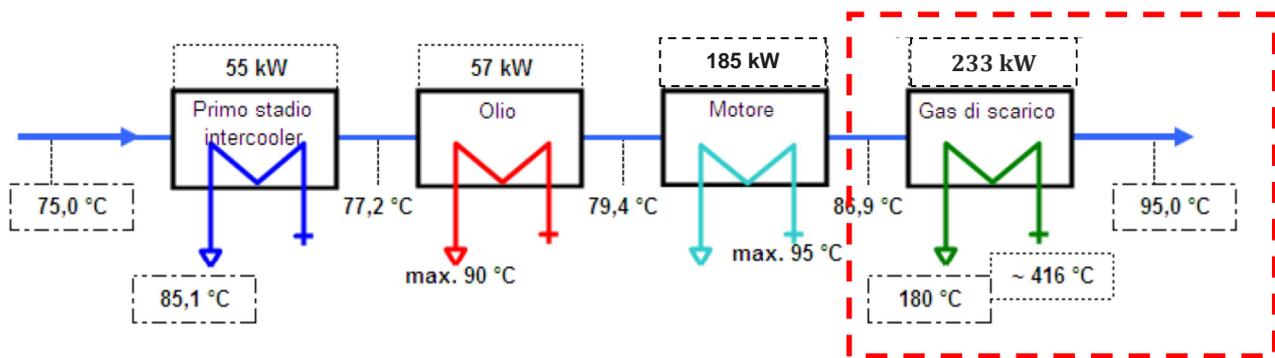


Figura 9 – Schema Circuito Recupero Calore (Elaborato n°3 “progetto preliminare”, documentazione Romagna Compost allegata alla domanda di Screening presentata alla provincia di Forlì-Cesena il 31/03/2014)

A seguito della realizzazione dell'intervento proposto, i fumi di scarico usciranno ad una temperatura di circa 180°C, invece che 450 °C.

#### 4.2.5 Miscelazione

Terminato il ciclo di fermentazione anaerobica circa il 50% del materiale digerato è avviato alla fase di compostaggio previa miscelazione con una quantità di materiale lignocellulosico, considerando tutti i possibili fattori necessari alla buona riuscita del processo aerobico, come porosità, rapporto C/N, umidità, densità apparente, ecc.

#### 4.2.6 Fase aerobica

Il compostaggio è una tecnica attraverso la quale viene controllato, accelerato e migliorato il processo naturale a cui va incontro qualsiasi sostanza organica per effetto della flora microbica naturalmente presente nell'ambiente. Il processo di compostaggio si compone essenzialmente di due fasi:

1. *bioossidazione (o fase attiva)*, nella quale si ha l'igienizzazione della massa;
2. *maturazione (o curing fase)*, durante la quale il prodotto si stabilizza arricchendosi di molecole umiche.

Il processo aerobico segue in questo caso la digestione anaerobica ed è costituito da una prima fase di affinamento intensivo in sei corsie con aerazione forzata con successiva stabilizzazione aerobica in platea areata, mediante un sistema di cumuli areati e rivoltati.

L'aria di processo è insufflata nel materiale dal basso attraverso la corsia.

Il parametro maggiormente controllato è la temperatura, misura fondamentale per valutare l'andamento del processo essendo un indicatore dell'attività microbica.

Temperature superiori a 55°C favoriscono l'igienizzazione del compost uccidendo i microrganismi patogeni, larve e uova di parassiti eventualmente presenti e i semi di molte piante infestanti. La

legge italiana prevede che il compost prodotto in impianti deve permanere per almeno tre giorni consecutivi alla temperatura di 55°C, per poter essere igienizzato.

Altro parametro che viene monitorato è il contenuto di ammoniaca ed anidride carbonica, mediante il quale è possibile stabilire l'indice di maturazione.

Tale analisi è effettuata sul compost al termine del processo mediante il test qualitativo "Solvita test", dal nome della società che lo ha brevettato, e si basa su una tecnica gel colorimetrica. Il campione di compost prelevato viene posto in un contenitore di incubazione per quattro ore insieme ad un dispositivo, che assumerà colori diversi in base alla concentrazione di NH<sub>3</sub> e CO<sub>2</sub>. Confrontando il risultato con la scala cromatica di riferimento, si individua il grado di degradazione biologica.

La gradazione di colore, per quanto riguarda l'analisi dell'anidride carbonica, è costituita da otto livelli (dall'arancio al viola), nel quale per ognuno è assegnata una determinata concentrazione. Per quanto riguarda l'analisi dell'ammoniaca, la scala cromatica è costituita da cinque colori (dal blu al giallo).

#### **4.2.7 Vagliatura**

La vagliatura consente di allontanare eventuali materiali di elevata pezzatura ed ottenere così un compost pulito con granulometria omogenea. Tale operazione permette di ottenere tre frazioni:

- sovrullo (CER 19 05 01, materiale non compostabile), costituito da plastica (sacchetti, bottiglie) e residui lignocellulosici, conferito ad altri impianti di smaltimento (discarica o inceneritore);
- biostabilizzato (CER 19 05 03, compost fuori specifica), costituito da compost grossolano, residui di plastiche, vetro, legno e materiali inerti. La sua granulometria è compresa tra 8-50 mm;
- ammendante compostato misto, il quale viene depositato negli appositi box, in attesa di essere venduto per agricoltura. È la frazione più fine, la sua granulometria è circa 8 mm.

#### **4.2.8 Trattamento arie esauste**

Le fasi di trattamento potenzialmente odorigene sono:

- ricezione e stoccaggio dei rifiuti organici;
- fase di apertura/chiusura dei fermentatori;
- bioossidazione intensiva e stabilizzazione aerobica.

Tutte queste sezioni sono mantenute in depressione mediante un sistema di aspirazione che capta e invia le arie esauste ad un sistema di trattamento costituito da scrubber e biofiltro. Il processo di aspirazione nei vari ambienti segue un "percorso a cascata", cioè: l'aria del capannone stoccaggio

rifiuti, dell'edificio di stabilizzazione e della zona di lavorazione sono aspirati dai relativi ambienti ed utilizzate per aerare i cumuli delle corsie di biossidazione intensiva. L'aria aspirata da quest'ultimo capannone, è poi inviata a scrubber e biofiltro per il trattamento finale. Il biofiltro è costituito da materiale lignocellulosico e ha una potenzialità di 60000 m<sup>3</sup>/h.

#### 4.2.9 Tipologia di emissioni

Le emissioni dell'impianto, derivano principalmente dal trattamento dei rifiuti organici e dalla combustione del biogas, come schematizzato in tab.5.

Denominazione Emissione	Biofiltro	Scarico gas combust cogeneratore 1 (impianto di abbattimento: post-combustore)	Scarico gas combust cogeneratore 2 (impianto di abbattimento: post-combustore)
Portata Autorizzata (Nmc/h)	60000	2377	2377
Altezza minima (m)	1.2	6	6
Sezione (m <sup>2</sup> )	600	0.049	0.049
Durata (h/g)	24	24	24
Concentrazione massima ammessa di inquinanti (da Aut. vigente)	300 UO/mc	Ossidi di Zolfo (espressi come SO <sub>2</sub> ) 500 mg/Nm <sup>3</sup> Ossidi di Azoto (espressi come NO <sub>2</sub> ) 450 mg/Nm <sup>3</sup> Materiale particolato 10 mg/Nm <sup>3</sup> CO 300 mg/Nm <sup>3</sup> HCl 10 mg/Nm <sup>3</sup> COT 150 mg/Nm <sup>3</sup> HF 2 mg/Nm <sup>3</sup>	(come cogeneratore 1)

Tabella 4 - Principali emissioni impianto

#### 4.2.10 Gestione e trattamento dei reflui prodotti

I reflui prodotti dall'impianto, sono compostati da:

- acque reflue di processo (eluati): sono le acque provenienti dalle varie fasi di trattamento a cui il rifiuto organico è sottoposto e dallo sgrondo del rifiuto fresco posto nel box di stoccaggio;
- acque reflue di dilavamento: sono costituite dalle acque meteoriche di dilavamento raccolte sui piazzali e nelle aree pavimentate esterne.

L'impianto di trattamento acque è costituito da un depuratore biologico a fanghi attivi con ultrafiltrazione finale mediante membrane sintetiche. Nello specifico, comprende due linee di funzionamento parallele costituite da:

- vasca per l'accumulo ed equalizzazione delle acque reflue;
- vasca di ossidazione biologica a fanghi attivi;
- ultrafiltrazione con membrane cave immerse;

- vasca di accumulo del refluo depurato;
- vasca di accumulo fanghi (ispessitore);
- centrifuga.

Il refluo depurato viene scaricato in pubblica fognatura. Al depuratore affluisce anche il percolato proveniente dalla discarica limitrofa gestita da Herambiente S.p.a.. I reflui prodotti dall'impianto di compostaggio, eccedenti rispetto alle capacità di trattamento del depuratore biologico interno, sono smaltiti in impianti autorizzati esterni. I fanghi disidratati, per centrifugazione, sono smaltiti in impianti esterni.

### 4.3 Adesione alle BAT

Al fine di valutare conformità/disarmonie rispetto alle BAT (*Best Available Techniques*) dell'impianto di compostaggio in oggetto, si sono considerate come riferimento le linee guida recanti i criteri per l'individuazione e l'utilizzazione delle *Migliori Tecniche Disponibili* di cui al D.M. 29/01/07: "Linee guida relative ad impianti esistenti per le attività rientranti nella Categoria IPPC 5 – Gestione Rifiuti (impianti di trattamento meccanico biologico)". Di seguito si riportano le BAT sopra elencate, analizzandone l'applicabilità alla realtà in esame e, in caso di effettiva applicabilità, verificando per ogni BAT la conformità dell'impianto.

#### 4.3.1 Conferimento e stoccaggio dei rifiuti all'impianto

Tecnica BAT individuata	Verifica di applicabilità e grado di rispondenza
<b>Caratterizzazione preliminare del rifiuto</b>	
Caratteristiche chimico-fisiche	L'impianto dispone di procedure di accettazione e di gestione dei rifiuti adeguate che prevedono la presenza e corretta compilazione dei documenti di accompagnamento ed il controllo visivo dei rifiuti conferiti.  Viene verificato il rispetto, da parte del trasportatore, delle norme di sicurezza, dei segnali di percorso e delle precauzioni da adottare durante lo scarico.
Classificazione del rifiuto e codice CER	
Modalità di conferimento e trasporto	
<b>Modalità di accettazione del rifiuto all'impianto</b>	
Programmazione delle modalità di conferimento dei carichi all'impianto	I conferimenti dei carichi all'impianto sono programmati in relazione alla capacità di trattamento dell'impianto.
Pesatura del rifiuto	Sono in atto procedure di accettazione e di gestione dei rifiuti adeguate. Viene effettuata la pesatura dei mezzi in ingresso.
Annotazione del peso lordo da parte dell'ufficio accettazione	Il peso lordo viene annotato da parte dell'ufficio accettazione
<b>Congedo automezzo</b>	
Bonifica automezzo con lavaggio ruote	Presenza delle strutture richieste in prossimità dell'uscita impianto.
Sistemazione dell'automezzo sulla pesa	Sono in atto procedure di accettazione e di gestione dei rifiuti adeguate, che prevedono annotazione della tara e la registrazione del carico sul registro di carico e scarico nei tempi previsti dalla normativa.
Annotazione della tara da parte dell'ufficio accettazione	
Congedo dell'automezzo	
Registrazione del carico sul registro di carico e scarico	

<b>Altre misure</b>	
Strutture di stoccaggio con capacità adeguata sia per i rifiuti da trattare sia per i rifiuti trattati	La progettazione delle strutture è stata tale da garantire adeguate capacità di stoccaggio sia per i rifiuti da trattare sia per i rifiuti trattati.
Mantenimento di condizioni ottimali nell'area di impianto	Presenza di procedure gestionali adeguate: i locali di scarico rifiuti sono dotati di pavimentazione impermeabile e sistema di raccolta dei percolati.
Adeguate isolamento e protezione dei rifiuti stoccati	Le strutture sono tali da garantire adeguate modalità di stoccaggio, in rapporto alle varie tipologie di rifiuti trattati e/o prodotti
Minimizzazione della durata dello stoccaggio	
Installazione di adeguati sistemi di sicurezza ed antincendio	Presenza delle strutture richieste: l'impianto dispone dei sistemi di sicurezza ed antincendio ed in possesso di CPI
Minimizzazione delle emissioni durante le fasi di movimentazione e stoccaggio	Sono in atto adeguate soluzioni sia per i rifiuti da trattare che per i rifiuti/materiali prodotti. I locali dello stoccaggio dei rifiuti organici in ingresso sono mantenuti in depressione da sistemi di aspirazione.
Area di stoccaggio delle matrici ad alta putrescibilità chiusa	Tutti i rifiuti facilmente fermentescibili sono stoccati al chiuso.
Area di stoccaggio delle matrici a bassa putrescibilità sotto tettoia o all'aperto in cassoni chiusi	Il legno e le ramaglie sono stoccati all'aperto su piazzali pavimentati a tenuta e dotati di sistema di raccolta delle acque meteoriche di dilavamento che sono convogliate alla fognatura nera.
Estrazione di aria con un tasso di ricambio 3-4 volumi di aria/ora	I locali di scarico rifiuti organici sono mantenuti in depressione con tasso di ricambio di 3-4 ricambi/ora.
Depurazione dell'aria estratta o il suo riutilizzo	L'aria aspirata viene riutilizzata nella bioossidazione
Minimizzare i tempi di stoccaggio dei rifiuti	Sono in atto procedure gestionali atti a limitare lo stoccaggio dei rifiuti particolarmente fermentescibili per non più di 48 ore, salvo casi eccezionali.
Pulizia frequente e regolare della pavimentazione e dei nastri trasportatori	Le pavimentazioni sono pulite regolarmente.
Impiego di porte ad azione rapida e automatica	Le sezioni di ricezione e di processo mantenute in depressione sono dotate di portoni ad impacchettamento rapido.
Pulizia frequente e regolare delle vie di traffico	Le vie di traffico sono mantenute in stato di pulizia con lavaggi frequenti

Le aree di lavorazione devono essere impermeabilizzate e confinate al fine di evitare dispersione del percolato	Le aree di lavorazione sono impermeabilizzate e confinate e dotate di rete fognaria di raccolta del percolato
Materiali di supporto (cippato, segatura) possono essere stoccati per lunghi periodi preferibilmente sotto tettoie	Il legno e le ramaglie sono attualmente stoccati su piazzali all'aperto.

Tabella 5 - Verifica di applicabilità e grado di rispondenza alle BAT per la fase conferimento e stoccaggio rifiuti

#### 4.3.2 Pretrattamento del rifiuto organico

Tecnica BAT individuata	Verifica di applicabilità e grado di rispondenza
Operazioni di pretrattamento in edifici chiusi con pavimentazione impermeabilizzata, dotata di idoneo sistema di drenaggio e recupero dei reflui	Le operazioni di pretrattamento consistenti nella triturazione ed eventuale vagliatura del rifiuto organico da avviare a lavorazione, sono effettuate in edificio chiuso, con pavimentazione impermeabilizzata, dotata di sistema di drenaggio e recupero dei reflui.
Triturazione/lacerazione/sfibratura (facoltativa)	Viene effettuata la triturazione dei rifiuti e la lacerazione dei sacchi di rifiuto organico
Vagliatura (facoltativa)	L'impianto dispone di una fase di vagliatura, eventualmente utilizzata in base alle caratteristiche del rifiuto
Deferrizzazione	Viene effettuata la rimozione dei metalli ferrosi

Tabella 6 - Verifica di applicabilità e grado di rispondenza alle BAT per la fase di pretrattamento del rifiuto organico

#### 4.3.3 Digestione anaerobica

Tecnica BAT individuata	Verifica di applicabilità e grado di rispondenza
Massimo riutilizzo acque di processo	Le acque di processo sono riciclate sui cumuli in digestione anaerobica. L'eccedenza viene conferita in impianti idonei.
Condizioni di termofilia	La fase di digestione anaerobica a secco avviene in condizioni di mesofilia.
Misurazione nei flussi in ingresso e in uscita dei livelli di TOC, COD, N, P, Cl	Non applicabile
Massimizzazione produzione biogas	PRESENTE, attraverso il controllo dei parametri del processo la resa viene mantenuta su valori ottimali. Si effettua il controllo in continuo di temperatura, pressione e portata del biogas prodotto. I valori sono memorizzati in forma numerica e grafica nel PLC di gestione per circa 30 giorni

Tabella 7 - Verifica di applicabilità e grado di rispondenza alle BAT per la fase di fermentazione anaerobica

#### 4.3.4 Trattamento aerobico

Tecnica individuata	Verifica di applicabilità e grado di rispondenza
Sistemazione del materiale in cumuli all'interno di andane ( <i>windrows</i> ) a sezione triangolare o trapezoidale	La tecnica adottata prevede l'adozione di soluzioni e di procedure gestionali conformi. Il trattamento aerobico avviene in cumuli periodicamente rivoltati e con areazione forzata programmabile.
La base dei cumuli varia da 3 a 6 m	
L'altezza dei cumuli varia da 1.5 a 3 m in funzione della densità e porosità del materiale	
I cumuli sono periodicamente rivoltati al fine garantire l'areazione del materiale e contenere i fenomeni anaerobici	
Nelle prime fasi del compostaggio sono richiesti rivoltamenti giornalieri, mentre verso la fine del processo è sufficiente un rivoltamento alla settimana	Non applicabile, in quanto nel processo in esame prima del trattamento aerobico, il materiale organico viene sottoposto a stabilizzazione tramite digestione anaerobica (durata minima compresa tra i 25 e i 34 giorni). La fase aerobica che segue ha una durata minima conseguente compresa, rispettivamente, tra 19 e 14 giorni. La durata totale minima del processo è compresa di conseguenza tra 44 e 48 giorni. Nel caso in cui al termine del processo si preveda la produzione anche di biostabilizzato, la fase aerobica dovrà avere una durata minima di 21 giorni.
La fase di compostaggio attivo dura da tre a nove settimane	
Dotazione della strumentazione idonea al controllo dell'andamento del processo e comunque della temperatura, misurata e registrata con frequenza giornaliera attraverso sonde termometriche	L'impianto adotta soluzioni gestionali in grado di garantire la conformità del processo alla specifica normativa per la produzione di ACM (ammendante compostato misto) e di CFS (compost fuori specifica) In particolare, al fine di garantire un adeguato livello di igienizzazione del materiale, la temperatura del cumulo viene mantenuta per almeno tre giorni sopra i 55°C e controllata attraverso sonde termometriche.
Possibilità, in fase attiva, di modulazione delle portate d'aria specifiche in relazione ai riscontri di processo, o almeno nelle diverse sezioni (corrispondenti a biomassa a diversi stadi di maturazione)	L'impianto adotta soluzioni gestionali in grado di garantire la conformità del processo alla specifica normativa per la produzione di ACM e di CFS. Possibilità di modulazione dei tempi di insufflazione nelle diverse sezioni.

Tecnica individuata	Verifica di applicabilità e grado di rispondenza
Utilizzo di un gruppo di continuità per la fornitura di energia elettrica per il funzionamento dei sistemi di monitoraggio o controllo	L'impianto dispone di un gruppo elettrogeno in caso di black-out elettrico.
Riutilizzo preferenziale delle arie aspirate dalle sezioni di ricezione e pretrattamento per l'ambientalizzazione delle sezioni di bioossidazione attiva e/o per l'insufflazione della biomassa, con almeno 3 ricambi/ora	Le arie aspirate nella fase di ricezione e pretrattamento rifiuto organico sono insufflate nelle sezioni di ossidazione. L'aspirazione delle arie esauste garantisce i ricambi d'aria minimi necessari.
Previsione, in fase attiva, della areazione forzata della biomassa, per aspirazione e/o insufflazione	È in funzione, in fase attiva, l'areazione forzata della biomassa per insufflazione.
Predisposizione di sistemi per l'inumidimento periodico della biomassa, in particolare nella fase attiva	Non applicabile, in quanto nel processo in esame prima del trattamento aerobico il materiale organico viene sottoposto a stabilizzazione tramite digestione anaerobica, che normalmente determina un inumidimento elevato della biomassa.

Tabella 8 - Verifica di applicabilità e grado di rispondenza alle BAT per la fase di trattamento aerobico

#### 4.3.5 Post trattamento

Tecnica BAT individuata	Verifica di applicabilità e grado di rispondenza
Raffinazione del prodotto (vagliatura, classificazione densimetrica, deferrizzazione)	Il prodotto viene vagliato. La deferrizzazione viene effettuata in testa all'impianto.
Limitare la produzione di polveri al fine di ridurre il rischio di esposizione dei lavoratori	L'operazione avviene nell'area di lavorazione coperta. Per proteggere i lavoratori dal rischio emissioni polveri, l'operazione è svolta, se necessario, con impianto aspirazione in funzione, e nel caso di rifiuto particolarmente secco, può essere attivato un abbattitore mobile di polveri a nebulizzazione. Sulle pale di movimentazione rifiuti sono installati filtri per l'abbattimento di polveri, H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub> e altre sostanze organiche.
Idonea pavimentazione per la pulizia ed il recupero di eventuali rifiuti	È presente idonea pavimentazione per la pulizia ed il recupero di eventuali rifiuti.
Essiccazione, pellettizzazione, granulazione	Tecniche non applicabili all'impianto nello stato attuale.

Tabella 9 - Verifica di applicabilità e grado di rispondenza alle BAT per la fase di post-trattamento

#### 4.3.6 Stoccaggio prodotto finito

Tecnica individuata	Verifica di applicabilità e grado di rispondenza
Conservazione del prodotto finito in cumuli all'aperto sotto tettoia o in silos.	Allo stato attuale i cumuli dei prodotti finiti (compost/biostabilizzato) sono conservati all'aperto.
Pavimentazione idonea alla pulizia ed al recupero dei reflui.	Tutte le pavimentazioni sono impermeabili e l'intero impianto è dotato di rete raccolta reflui.
I cumuli non dovrebbero mai superare l'altezza di 3-4 m.	L'altezza dei muri dei box di stoccaggio è circa 4 m e anche nello stato di progetto avranno un'altezza circa pari.
Chiusura delle aree di processo anche per la fase di maturazione o adozione di sistemi statici semiconfinati (es. mediante teli) per evitare la dispersione eolica.	Le aree di processo (fase di maturazione) sono chiuse.
Adozione di un sistema di areazione forzata della biomassa anche in fase di maturazione.	È presente un sistema di aerazione forzata della biomassa anche in fase di maturazione.

Tabella 10 - Verifica di applicabilità e grado di rispondenza alle BAT per lo stoccaggio del prodotto finito

#### 4.3.7 Trattamento delle emissioni gassose

Tecnica individuata	Verifica di applicabilità e grado di rispondenza
Adeguate individuazione del sistema di trattamento.	È stato adottato un sistema di trattamento costituito da scrubber e biofiltro delle arie esauste del processo.
Abbattimento delle polveri.	Le soluzioni adottate, trattandosi di sistemi ad umido, sono idonee all'abbattimento delle polveri.
Riduzione degli odori mediante l'utilizzo di appositi presidi ambientali.	È presente uno scrubber e un biofiltro adeguatamente dimensionato per garantire l'abbattimento delle emissioni odorigene.

Tabella 11 - Verifica di applicabilità e grado di rispondenza alle BAT per il trattamento delle emissioni gassose

#### 4.3.8 Trattamento dei reflui prodotti nell'impianto

Tecnica individuata	Verifica di applicabilità e grado di rispondenza
Impiego di sistemi di trattamento a minor produzione di effluenti.	In nessuna fase del processo è normalmente prevista l'aggiunta di acqua. Il tipo di digestione anaerobica adottata è a secco, con conseguente minore produzione di liquami.
Massimizzazione del ricircolo delle acque reflue.	È previsto il ricircolo dei reflui nella fase di digestione anaerobica.
Raccolta separata delle acque meteoriche pulite.	Le acque meteoriche di dilavamento delle coperture sono raccolte separatamente ed inviate al Rio della Busca.
Adeguati sistemi di stoccaggio ed	Presenza di vasche per le acque meteoriche di

equalizzazione.	dilavamento dei piazzali e per le acque nere.
Impiego di sistemi di trattamento chimico-fisico.	Nel trattamento dei reflui al depuratore biologico è previsto un sistema di filtrazione sui reflui in ingresso al depuratore e un sistema di trattamento fisico (membrane di ultrafiltrazione) finale.
Trattamento biologico delle acque reflue.	Le acque di dilavamento dei piazzali e le acque di processo vengono inviate a trattamento al depuratore biologico interno, che adotta la tecnologia MBR, fino alla saturazione della propria potenzialità. Le acque depurate sono scaricate in pubblica fognatura.

Tabella 12 - Verifica di applicabilità e grado di rispondenza alle BAT per il trattamento dei reflui prodotti dall'impianto

#### 4.3.9 Rumore

Tecnica individuata	Verifica di applicabilità e grado di rispondenza
Sistemi di scarico e pretrattamento al chiuso.	Lo scarico ed il pretrattamento del rifiuto organico avvengono in locali al chiuso.
Impiego di materiali fonoassorbenti e sistemi di coibentazione.	Sono state valutate acusticamente le sorgenti dell'impianto e si è provveduto ad effettuare idonei interventi di insonorizzazione e mitigazione ove necessario. Sono stati provviste di cabine fonoassorbenti alcuni ventilatori.
Impiego di silenziatori su valvole di sicurezza, aspirazioni e scarichi di correnti gassose.	Sono installati silenziatori sui ventilatori di ricambio aria del locale generatori.
Applicazione di rivestimenti e carenature.	Le macchine a motori a scoppio attualmente utilizzate sono provviste di carenature.

Tabella 13 - Verifica di applicabilità e grado di rispondenza alle BAT per il rumore)

#### 4.3.10 Sistemi di gestione ambientale

Tecnica individuata	Verifica di applicabilità e grado di rispondenza
Redigere un manuale operativo, funzionale ai rischi rilevati, che comprenda anche le attività di manutenzione e di emergenza.	Esistono piani e procedure gestionali adeguate.
Piano di gestione operativa.	
Programma di sorveglianza e controllo.	
Accreditamento ISO 9001	Ottenuto
Accreditamento ISO 14001	Ottenuto
Accreditamento ISO 50001	Ottenuto

Accreditamento BS OHSAS 18001:2007	Ottenuto
EMAS	L'impianto non è registrato Emas

Tabella 14 - Verifica di applicabilità e grado di rispondenza alle BAT per i sistemi di gestione ambientale

## 5 LA METODOLOGIA LCA

### 5.1 Introduzione alla metodologia LCA

La definizione di LCA (*Life Cycle Assessment*) proposta dalla SETAC (1993), oggi standardizzata nelle norme ISO 14040 e 14044, è la seguente: “è un procedimento oggettivo di valutazione dei carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o un’attività, effettuato attraverso l’identificazione dell’energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell’ambiente. La valutazione include l’intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l’estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l’uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale”. Una LCA, quindi, è fondamentalmente una tecnica quantitativa che permette di determinare fattori in ingresso (materie prime, uso di risorse, energia, etc.) e in uscita (produzione di rifiuti, emissioni di inquinanti in aria, acqua e suolo), valutandone i conseguenti impatti ambientali. Attraverso lo studio è possibile individuare le fasi di un processo o di un sistema di gestione in cui si concentrano maggiormente le criticità ambientali e le informazioni necessarie per realizzare gli interventi di miglioramento.

Le applicazioni della metodologia LCA possono riguardare, per esempio:

- confronto tra sistemi alternativi di produzione con la medesima funzione;
- confronto degli impatti ambientali con uno standard di riferimento;
- identificazione degli stadi del ciclo di vita di un prodotto per individuare le fasi più impattanti dal punto di vista ambientale;
- confronto tra sistemi alternativi per la gestione dei rifiuti;
- riduzione dei costi tramite l’individuazione di aree che necessitano di ottimizzazione;
- comunicazione d’informazioni ambientali.

L’analisi LCA non è adatta per:

- risolvere problemi di localizzazione;
- risolvere problemi ambientali di un’azienda;
- risolvere problemi di uno specifico processo produttivo;

- rispondere a problemi relativi alla sicurezza e al rischio.

### **5.1.1 Storia LCA**

Le origini dell'*Environmental Life Cycle Thinking* (considerazione delle problematiche ambientali nell'ottica del ciclo di vita) risalgono alla fine degli anni sessanta, quando alcuni ricercatori iniziarono a studiare con metodi scientifici i problemi relativi al consumo di risorse e alla produzione di reflui connessi ai processi industriali. L'analisi "*from cradle to grave*" (dalla culla alla tomba) nell'ottica di uno studio completo relativo all'intero ciclo di vita non assunse subito la denominazione LCA, ma si adottarono altre terminologie. I primi studi sull'analisi del ciclo di vita risalgono ai primi anni settanta, con l'obiettivo di riuscire a quantificare le emissioni e l'utilizzo di risorse necessarie per la produzione e lo sviluppo di prodotti, tramite l'utilizzo della LCA, da parte di alcune grandi aziende statunitensi e dall'agenzia per la protezione dell'ambiente americana (US-EPA), come strumento di supporto alle decisioni. Tra le molte ricerche, svolte tra la fine degli anni '60 e '70, meritano di essere citati gli studi commissionati dalla Coca Cola Company per la determinazione dei carichi ambientali connessi alla produzione di diversi tipi di contenitori per bevande (plastica, vetro o alluminio) e per determinare quale sistema di gestione di fine vita fosse migliore a livello energetico ed ambientale. Un altro importante studio svolto per la Mobil Chemical Company fu sviluppato per stabilire l'eco-compatibilità dei fogli in polistirene utilizzati per incartare prodotti alimentari rispetto ai concorrenti fogli di carta. Nello stesso tempo, a livello mondiale, ricercatori e studiosi cominciarono ad affrontare temi come lo sfruttamento eccessivo delle risorse e gli effetti conseguenti sull'ambiente, in quanto iniziava a diffondersi la consapevolezza che la disponibilità delle risorse è limitata e pertanto esauribile. Parallelamente, in Europa, viene pubblicato il manuale di Analisi Energetica di Boustead e Hancock (1979), considerato una delle pietre miliari della metodologia LCA. Per una definizione più completa di LCA, ci si può riferire al congresso SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) del 1990, svolto a Vermont in Canada, nel quale fu definita la metodologia di studio e i primi strumenti di calcolo per un suo impiego pratico. La struttura di una LCA prevedeva in origine tre fasi successive, da svolgersi ciclicamente: fase di inventario, fase di interpretazione e fase di miglioramento. Nei primi anni novanta furono organizzate numerose iniziative per la standardizzazione della metodologia che portarono alla pubblicazione di manuali, testi scientifici, strumenti di calcolo e banche dati per l'applicazione pratica. L'impegno del comitato ISO per la standardizzazione della metodologia trovò la prima attuazione nell'emanazione delle norme ISO 14040, 14041, 14042, 14043, le quali definiscono le linee guida proposte dalla SETAC, successivamente accorpate in due sole norme: la ISO 14040:2006 e la ISO 14044:2006.

### 5.1.1.1 Studi di LCA applicata al processo di digestione anaerobica e compostaggio

Di seguito vengono riportati alcuni studi pubblicati in letteratura, che si riferiscono ai processi di interesse per il presente lavoro.

2008. *Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: landfilling, sorting plant and incineration* (Cherubini et al., 2008). Lo studio analizza tre scenari per la gestione del rifiuto solido urbano (RSU) nel comune di Roma:

- scenario 1: smaltimento in discarica con recupero di biogas;
- scenario 2: raccolta differenziata con separazione della frazione inorganica e organica, con produzione di biogas e compost;
- scenario 3: incenerimento del rifiuto indifferenziato.

L'analisi include, oltre alla metodologia LCA, anche altri strumenti come l'impronta ecologica (IE) e il *Material Flow Accounting* (MFA). L'unità funzionale è la quantità di rifiuti trattati nel 2003, ovvero 1460 kt. I risultati ottenuti mostrano che l'opzione preferibile, anche se con qualche problema locale di tipo ambientale derivante dall'emissioni in atmosfera, risulta essere la separazione dei rifiuti con successiva produzione di biogas e compost. La produzione di energia elettrica rinnovabile comporta rilevanti vantaggi su scala globale per le categorie GWP (*Global Warming Potential*) e AP (*Acidification Potential*) e riduce fortemente l'impronta ecologica della gestione dei rifiuti.

2009. "*Anaerobic digestion and digestate use: accounting of greenhouse gases and global warming contribution*" (Møller et al., 2009). L'articolo analizza il processo di fermentazione anaerobica della frazione organica di rifiuti solidi urbani (FORSU), valutando le possibili emissioni di gas ad effetto serra (GHGs, *Green House Gases*) per il calcolo del fattore globale di riscaldamento (GWF, *Global Warming Factor*), in accordo con IPCC, calcolando la CO<sub>2</sub> equivalente per tonnellata di rifiuto in input. Per il conteggio di quest'ultimo sono state distinte due categorie di emissione:

- dirette: da combustione di fuel (biogas), perdita di gas dall'impianto di fermentazione (piping e reattore), da utilizzo del biogas o upgrading;
- indirette: emissioni a monte del processo (es. approvvigionamento di elettricità, calore e acqua, produzione di materiale utilizzato sull'impianto, etc), emissioni a valle per l'utilizzo del digestato in agricoltura ed emissioni evitate per la produzione di energia elettrica, produzione di fertilizzante e dalla sequestrazione del carbonio nel suolo.

Le perdite di biogas nell'impianto sono state stimate il 3% della produzione totale di metano. Il GWF per l'impianto di digestione anaerobica oggetto di studio è compreso tra -95 e -4 kg CO<sub>2</sub> eq./t di FORSU.

2010. *"Food waste conversion option in Singapore: Environmental impacts based on an LCA perspective"* (Khoo et al., 2010) effettuano una LCA comparativo tra quattro possibili scenari, con l'obiettivo di fornire informazioni alle organizzazioni governative e supportarle nelle scelte tecnologiche per la gestione e il trattamento degli scarti alimentari a Singapore. Sono stati analizzati quattro scenari:

- Scenario 1: raccolta differenziata di rifiuti alimentari. La frazione organica viene trattata in un impianto di fermentazione anaerobica con una potenza installata di 3.5 MW. Il digestato ottenuto è poi compostato, mentre il resto dei rifiuti (frazione non degradabile) viene incenerito.

- Scenario 2: raccolta differenziata dei rifiuti alimentari e digestione anaerobica in un impianto con potenzialità da 6 MW, seguito dal compostaggio. La frazione non degradabile viene incenerita;

- Scenario 3: raccolta differenziata dei rifiuti alimentari. La frazione organica è destinata ad un impianto di fermentazione a 9.5 MW con successivo compostaggio, mentre la frazione non degradabile viene incenerita.

- Scenario 4: raccolta differenziata dei rifiuti alimentari, di cui il 59% viene incenerito mentre la rimanente frazione organica è destinata tutta al processo di fermentazione anaerobica e compostaggio.

L'unità funzionale per tutti gli scenari è la quantità di rifiuti prodotta nella città di Singapore in un anno, cioè 570000 t/anno. Lo scenario 4, dal punto di vista degli impatti, è il migliore. Gli autori sottolineano che la digestione anaerobica è preferibile al compostaggio, per via delle minor emissioni di CO<sub>2</sub> e NH<sub>3</sub>. Il guadagno netto è dato soprattutto dagli indicatori del GWP (*global warming potential*) e EP (eutrofizzazione), in quando il compost ottenuto evita la produzione di fertilizzante sintetico.

2012. *The environmental sustainability of anaerobic digestion as a biomass valorization technology* (De Meester et al., 2010). Lo studio riguarda la valutazione della sostenibilità ambientale della digestione anaerobica sotto tre prospettive:

- confronto tra l'impatto nella produzione di energia elettrica convenzionale e l'energia prodotta dalla fermentazione anaerobica di rifiuto organico (FORSU) o colture energetiche;

- la possibilità di alimentare diversamente il digestore nel contesto agricolo (es. insilato di mais, barbabietola da zucchero, erba, etc.);
- l'utilizzo del digestato come fertilizzante in agricoltura (al posto dei concimi convenzionali).

La valutazione è quindi effettuata a due livelli:

- 1) calcolo dell'efficienza di conversione di questa tecnologia mediante bilancio energetico ed exergetico;
- 2) LCA applicata a due casi studio: il primo è una digestione con insilato di mais e piccole quantità di segale e pollina con una potenzialità di 20000 t/anno, in un contesto agricolo (Germania), il secondo è un impianto di fermentazione anaerobica (Belgio) che tratta rifiuti organici domestici (FORSU) con una potenzialità di 45000 t/anno. Lo studio, *from cradle to grave*, include la produzione di energia, calore e compost.

In entrambe le analisi LCA è stato utilizzato il database Ecoinvent 3.1, mentre per la valutazione degli impatti si è utilizzato il metodo Recipe 2014 con indicatori di midpoint e approccio gerarchico, selezionando sei categorie: cambiamento climatico, assottigliamento dello strato di ozono, formazione di ossidanti fotochimici, acidificazione terrestre, eutrofizzazione marina e delle acque dolci. Le altre categorie, come la tossicità, non sono state considerate per mancanza di dati dettagliati e specifici. Infine, l'analisi dell'incertezza è stata eseguita mediante l'analisi statistica Monte Carlo.

2013. “*Life cycle assesment of energy from waste via anaerobic digestion: a UK case study*” (Evangelisti, et al., 2013). Analisi LCA per comparare gli impatti del processo di fermentazione anaerobica del rifiuto organico con produzione di energia e fertilizzante, con due approcci alternativi: incenerimento con produzione di energia e smaltimento in discarica con contemporanea produzione di energia elettrica. Dove possibile, per i processi di *foreground* (processi di “primo piano”), ovvero quelli centrali nel ciclo di vita di un prodotto per i quali è disponibile l'accesso diretto alle informazioni, sono stati utilizzati dati sito-specifici del territorio londinese (UK). I dati mancanti sono stati integrati con dati da letteratura o datasets specifici. L'unità funzionale è la quantità totale di frazione organica dei rifiuti solidi urbani prodotta annualmente nell'area analizzata. Lo studio prende in considerazione le seguenti categorie d'impatto: il *Global Warming Potential* (GWP), come indicatore di effetto serra, il potenziale di acidificazione (AP) come indicatore per le piogge acide, potenziale di formazione di ossidanti fotochimici (POCP) come indicatore di smog fotochimico, mediante il metodo CML; l'arricchimento di nutrienti (NE) come

indicatore di eutrofizzazione delle acque, mediante il metodo EDIP97. Tali categorie sono state scelte per la loro significatività ambientale, in accordo con la ISO 14044. La modellazione degli impatti è stata realizzata utilizzando il software Gabi 5 (PE International) considerando un orizzonte temporale di cento anni ed è stata valutata la robustezza del modello con un'analisi di sensibilità. I risultati ottenuti indicano che la digestione anaerobica è la migliore opzione di trattamento in termini di CO<sub>2</sub> ed SO<sub>2</sub> risparmiata, quando la produzione di energia e compost permette la sostituzione di energia, calore e fertilizzanti convenzionali. Per quanto riguarda la formazione di ossidanti fotochimici e il potenziale arricchimento di nutrienti, l'incenerimento risulta la tecnologia meno impattante, seguito dal processo di fermentazione e infine dalla discarica.

2013. *“Anaerobic digestion of different feedstock: impact on energetic and environmental balances of biogas process”* (Bacchetti et al., 2013). Lo studio valuta la produzione di energia elettrica da biogas sotto il profilo energetico e ambientale, analizzando tre impianti di digestione anaerobica ad umido situati nel Nord Italia, nello specifico a Pavia, Vercelli e Lodi, con diverse potenzialità e feedstock. Per tutti e tre i sistemi bioenergetici è stato adottato un approccio *“from cradle to grave”*. Il sistema di produzione del biogas è costituito da due fasi principali:

- 1) la conversione del materiale organico in biogas;
- 2) l'utilizzo del biogas come combustibile per la produzione di energia elettrica e calore, tramite cogenerazione.

Pertanto, i ricercatori hanno ritenuto opportuno definire due unità funzionali, una per la produzione e la raccolta del feedstock, come insilato di mais e liquame suino (1 t di materiale da alimentare al reattore) e una relativa alla produzione di energia da biogas (1 kWh di elettricità prodotta). I dati, sono stati raccolti negli impianti tra Novembre 2011 e Ottobre 2012, per i dati mancanti è stato usato il database di Ecoinvent. L'analisi energetica è stata condotta con il metodo *Cumulative Energy Demand* (CED), mentre l'impatto sul cambiamento climatico è stato valutato, come definito da IPCC (2006), basandosi sulle emissioni di GHG espresse in CO<sub>2</sub> equivalenti, con un periodo di riferimento di cento anni.

2013. *“Economic and environmental analysis of four different configurations of anaerobic digestion for food waste to energy conversion using LCA for a food service provider case study”* (Franchetti M., 2013). Lo studio LCA si pone come obiettivo di confrontare quattro diverse configurazioni di trattamento per i rifiuti organici, dal punto di vista economico, energetico e ambientale. Il caso studio è un'azienda fornitrice di servizi alimentare nel nord-ovest dell'Ohio, USA. L'unità funzionale è la quantità di rifiuti alimentari generati in un anno.

Gli scenari considerati sono i seguenti:

- Scenario 1: gli scarti alimentari vengono smaltiti presso la discarica comunale (scenario attuale);
- Scenario 2: i rifiuti alimentari generati da attività di ristorazione sono separati alla fonte, subiscono poi un trattamento con ultrasuoni e successiva fermentazione anaerobica a due stadi;
- Scenario 3: i rifiuti organici sono separati e convogliati in tre reattori in serie. Dall'ultimo reattore sono prelevati i fanghi digeriti per inoculare il primo fermentatore;
- Scenario 4: il rifiuto organico è trattato in un impianto di fermentazione a lungo termine stabilizzato con l'aggiunta di oligoelementi quali Co, Fe, Mo e Ni;
- Scenario 5: i rifiuti organici subiscono un trattamento di fermentazione anaerobica standard.

I risultati dello studio dimostrano che gli scenari 2,3 e 4 hanno tutti una performance migliore rispetto allo scenario 1 (scenario attuale). Nel considerare le alternative al sistema attuale, la fermentazione anaerobica a due stadi con pretrattamento ad ultrasuoni risulta essere la scelta migliore in termini di costi ed emissioni di gas serra (CO<sub>2eq</sub>).

2014. *“Environmental sustainability assessment of food waste valorization options”* (T.Vandermeersch et al., 2014). L'articolo analizza le performance ambientali per due scenari di valorizzazione della frazione organica, di una compagnia belga che opera nel settore di gestione dei rifiuti, attraverso analisi exergetica, *Exergetic Life Cycle Assessment (ELCA)* e l'analisi tradizionale LCA. Il primo scenario considera che tutti i rifiuti organici siano valorizzati mediante digestione anaerobica, mentre il secondo suddivide la frazione organica in due flussi: uno destinato all'alimentazione animale (mangimi per allevamenti) e l'altro alla fermentazione anaerobica. Per quanto riguarda l'analisi LCA, si considera l'approccio *“cradle to grave”*, valutando gli impatti con il metodo Recipe 2014 con prospettiva gerarchica. I risultati ottenuti mostrano come il secondo scenario mostri risultati migliori su dieci categorie considerate.

2014. *“Life Cycle Assessment di un impianto integrato di trattamento della frazione organica dei rifiuti. Il caso di Voltana di Lugo (RA)”* (Righi S. et al, 2014). Il lavoro presentato nella tesi di laurea magistrale per la facoltà di Scienze Ambientali di Ravenna ha come obiettivo l'analisi del ciclo di vita dell'impianto di trattamento della FORSU, con sistema integrato anaerobico-aerobico, sito nella frazione di Voltana di Lugo (RA). Lo studio confronta lo scenario attuale con quello antecedente al 2012, in cui era presente solo il processo di compostaggio. In secondo luogo entrambe le configurazioni sono confrontate con uno scenario di riferimento in cui si ipotizza che

tutto il rifiuto organico trattato presso l'impianto sia smaltito in discarica. L'analisi LCA è stata condotta con l'ausilio del software Gabi 5 e l'unità funzionale è rappresentata dalle tonnellate di rifiuto trattate in un mese. Dal confronto tra lo scenario attuale e quello di compostaggio tradizionale è emerso che la nuova configurazione ha performance ambientali migliori ed entrambe sono risultate nettamente migliori rispetto allo smaltimento in discarica. I processi che hanno influenzato maggiormente gli impatti sono: in negativo, lo smaltimento in discarica del materiale non compostabile (CER 19 05 01), in positivo, il recupero energetico, che consente di utilizzare energia elettrica rinnovabile, evitando la produzione con sistemi convenzionali (impatto evitato).

## **5.2 Norme di riferimento per uno studio di LCA**

Le norme di riferimento per il Life Cycle Assessment fanno parte della serie delle ISO 14000 e, più in particolare, della famiglia delle norme orientate ai prodotti della serie ISO 14040. In una prima versione, le principali per l'applicazione della metodologia LCA sono state:

1. ISO 14040: principi e struttura;
2. ISO 14041: definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione ed analisi di inventario;
3. ISO 14042: valutazione dell'impatto del ciclo di vita;
4. ISO 14043: interpretazione dei risultati.

Successivamente, la serie ISO 14040-14043 è stata aggiornata e sostituita dalle ISO 14040:2006 (principi e struttura) e ISO 14044:2006 (requisiti e linee guida), le quali rappresentano un ulteriore perfezionamento alle linee guida proposte dalla SETAC, e costituiscono il riferimento attuale a livello internazionale per l'esecuzione di un'analisi LCA.

## **5.3 Struttura concettuale di una LCA**

L'elaborazione di una LCA si articola essenzialmente in quattro fasi:

1. *Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione (Goal and scope definition)*, nella quale si definiscono in maniera univoca lo scopo e i confini del sistema considerato;
2. *Analisi d'inventario (Life Cycle inventory analysis)*, dove vengono quantificati i flussi in ingresso e in uscita dai confini del sistema definiti nella fase precedente;
3. *Valutazione degli impatti (Impact Assessment)*, nella quale i dati della tabella di inventario sono trasformati in contributo ad un numero limitato di categorie d'impatto;
4. *Interpretazione dei risultati e valutazione dei possibili miglioramenti (Improvement Assessment)*, tramite una procedura sistematica e trasversale rispetto alle altre fasi di

identificazione e controllo delle conclusioni tratte dall'analisi d'inventario e dalla valutazione degli impatti del sistema.

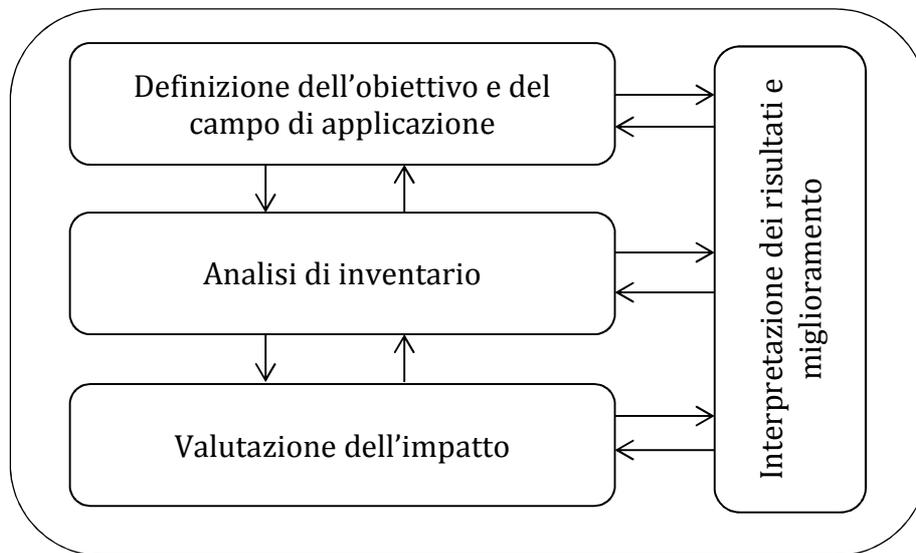


Figura 10 - Fasi di un LCA

La complessità dell'analisi LCA risiede nel suo carattere multidisciplinare, infatti i tre ambiti necessari per ottenere un'analisi valida e completa hanno caratteristiche molto differenti (Hofsetter, 1998):

- *Technosphere*, che riguarda la modellazione del sistema tecnico, la descrizione del ciclo di vita e tutte le procedure basate su relazioni di causa-effetto. L'incertezza in questo ambito è relativamente bassa;
- *Ecosphere*, la modellazione dei meccanismi ambientali, ovvero cosa succede in seguito all'emissione nota. Le incertezze sono maggiori, si utilizzano modelli piuttosto incerti, difficilmente verificabili e dati con un'unità di misura aventi errori di diversi ordini di grandezza;
- *Valuesphere*, la modellazione nel settore delle scienze sociali, considera le scelte soggettive e pertanto gioca un ruolo fondamentale nella fase di allocazione o nell'assegnazione di un orizzonte temporale. In questo ambito, non si possono considerare le incertezze, in quanto possono essere percorribili diverse strategie ed esiste un elevato grado di soggettività.

### 5.3.1 Definizione dell'obiettivo e dello scopo

Lo scopo dello studio descrive le principali scelte metodologiche, le assunzioni fatte e le limitazioni ed è utilizzato per ottenere le necessarie specificazioni dello studio.

#### Unità funzionale

Il primo passo è la definizione dell'unità funzionale, cioè il prodotto, il servizio o la funzione su cui impostare l'analisi e il confronto con le possibili alternative (es. kg di prodotto, t di rifiuto trattato, kWh di energia fornita, etc). Lo scopo dell'unità funzionale, come definito nella norma ISO 14040, è quello di fornire un riferimento a cui legare i flussi in entrata e in uscita di un determinato processo e/o prodotto. È un riferimento necessario per consentire la comparabilità dei risultati di LCA, specialmente quando si valutano sistemi differenti. In questa fase viene definito anche lo scopo dello studio, ovvero i tipi di problemi ai quali si vuole rispondere.

### Confini del sistema

In secondo luogo occorre definire i limiti spaziali tra il sistema studiato e l'intorno (ambiente) e dettagliare il processo disegnando il suo diagramma di flusso con una prima stima di input e output verso l'ambiente. La scelta dei confini può influenzare notevolmente i risultati finali, la significatività, i tempi e i costi dello studio, e devono essere coerenti con lo scopo. In LCA, con il termine "sistema" si definisce un qualsiasi insieme di dispositivi tramite i quali si realizzano operazioni industriali con una funzione specifica. Sebbene la filosofia LCA preveda di tracciare tutti i processi dalle origini fino al loro completamento, è necessario tracciare dei confini, e quindi escludere consapevolmente alcune parti per evitare analisi troppo complesse (Burgess and Brennan, 2001). Ogni decisione di omissione deve essere chiaramente dichiarata e devono essere spiegate le ragioni e le implicazioni che ne conseguono.

È possibile definire diversi confini del sistema:

- *confini del ciclo di vita*, che possono essere determinati in funzione degli stadi del ciclo di vita del prodotto stesso (es. *cradle to grave*);
- *confini geografici*, stabiliscono i limiti fisici del sistema produttivo;
- *confini temporali*, ovvero il periodo di riferimento dell'analisi, i dati devono essere raccolti in un tempo ben definito e possono rappresentare una situazione media di funzionamento o la migliore tecnica a disposizione (*Best Available Techniques*, BAT);
- *confini di carico ambientale*, includono la scelta di materie prime rinnovabili e non, emissioni atmosferiche e liquide, rifiuti solidi, perdite di energia, radiazioni e rumore. L'analisi può essere svolta considerando l'intera lista di input e output (LCA completo) o tenendo conto solo di determinati carichi (LCA parziale).

La norma ISO 14044 descrive i criteri per eseguire l'esclusione (cut off) di input e output:

- se la massa del flusso in ingresso è inferiore ad una certa percentuale;
- se il valore economico del flusso è inferiore ad una certa percentuale del valore totale del prodotto del sistema;
- se il contributo di un flusso in input al carico ambientale è più basso di una certa percentuale. Sebbene la logica sia giusta, quest'ultimo criterio di esclusione è difficile da applicare, in quanto il contributo ambientale non si conosce con adeguata precisione prima di studiare il sistema.

Per quanto riguarda i rilasci del sistema nell'ambiente, si dovrebbero sempre includere:

- flussi in ingresso e uscita nella sequenza principale fabbricazione/processo;
- distribuzione/trasporto;
- produzione e utilizzazione di combustibili, elettricità e calore;
- uso e manutenzione dei prodotti;
- smaltimento dei rifiuti e prodotti derivanti dal processo;
- recupero di prodotti dopo l'uso;
- fabbricazione di materiali ausiliari;
- operazioni supplementari, illuminazione e riscaldamento.

#### Criteri di allocazione

Molti processi hanno più di una funzione o producono più output e pertanto il carico ambientale può essere ripartito nei diversi flussi. Con il termine allocazione, si intende la distribuzione proporzionale della responsabilità per il consumo di risorse ed energia e per i flussi in uscita dal processo nel ciclo di vita (Burgess and Brennan, 2001). Gli standard ISO 14040/14044 definiscono i diversi criteri da seguire qualora vi siano problemi di allocazione, in ordine d'importanza:

- evitare l'allocazione, dividendo il processo in modo che venga descritto come due processi separati, ognuno con il proprio output, ma spesso questa strada non è percorribile;
- evitare l'allocazione, estendendo i confini del sistema e includendo processi necessari per ottenere output simili;

- se non è possibile evitare l'allocazione, la norma ISO suggerisce di allocare i carichi ambientali sulla base di caratteristiche fisiche, come la massa, il volume o il contenuto energetico degli output. Per scegliere il parametro più adatto, occorre conoscere dettagliatamente il sistema:

- se la precedente strada non è percorribile, gli standard ISO consigliano di usare un'allocazione su basi socio-economiche, come il valore economico.

### 5.3.2 *Analisi d'inventario*

Questa analisi raccoglie tutti i dati dei processi unitari all'interno di un sistema prodotto e le lega all'unità funzionale dello studio. L'inventario consiste nella descrizione quantitativa di tutti i flussi di materiali ed energia che attraversano i confini del sistema sia in ingresso sia in uscita. Il dettaglio dell'analisi d'inventario dipende dal tipo di studio che si vuole condurre, dal tempo e dal budget a disposizione.

Per prima cosa, è necessario definire i sistemi di *foreground* e *background*. Il primo può comprendere generalmente tutte le operazioni che forniscono direttamente l'unità funzionale, mentre il secondo comprende le attività che scambiano materiali ed energia con il sistema principale.

Pertanto, è possibile distinguere i dati raccolti in due categorie:

- dati primari (o *foreground*): sono i dati specifici che descrivono in maniera dettagliata il prodotto del sistema;

- dati secondari (o *background*): sono dati generici, provenienti da letteratura (es. articoli scientifici) o database (uno dei maggior database presenti in SimaPro è Ecoinvent, pubblicato nel 2003).

L'analisi d'inventario è quindi il momento più importante di uno studio LCA, perché occorre definire il grado di dettaglio e quindi la precisione dell'intera analisi. Il risultato dell'inventario è la stesura di una tabella d'inventario che mostra tutti gli usi delle risorse, le emissioni associate all'unità funzionale, comprese, ad esempio, tutte le sostanze e i composti chimici utilizzati, ripartiti nelle seguenti categorie:

1. materie prime;
2. energia;
3. prodotti, co-prodotti e rifiuti;
4. emissioni in aria, acqua e suolo.

### Requisiti di qualità e affidabilità dei dati

La qualità dei dati utilizzati nell'inventario si riflette naturalmente nel risultato finale dell'analisi, ed è importante che essa sia descritta e valutata in modo sistematico, per consentire a chiunque se ne occupi di comprendere e riprodurre l'analisi compiuta. I requisiti di qualità per i dati raccolti sono i seguenti:

- copertura temporale, mediante la definizione dell'età desiderata dei dati (ad esempio gli ultimi cinque anni) e del tempo necessario per la loro raccolta;
- copertura spaziale, ovvero un'area geografica ben definita da cui possono essere raccolti i dati per un'unità di processo;
- grado tecnologico;
- precisione;
- completezza;
- rappresentatività;
- coerenza;
- riproducibilità.

Le caratteristiche spaziali e temporali sono di solito ignorate, essendo l'analisi LCA principalmente uno strumento per la conservazione di risorse e la prevenzione dei rifiuti.

### ***5.3.3 Valutazione degli impatti***

La norma ISO 14001, definisce l'impatto come qualsiasi alterazione causata da un dato aspetto ambientale, ossia da qualsiasi elemento che può interagire con l'ambiente. La valutazione degli impatti è la fase destinata a comprendere e valutare l'importanza ed il significato degli impatti ambientali potenziali di un sistema prodotto. Tale valutazione può essere basata anche su obiettivi politici o ecologici da raggiungere. La mancanza di una metodologia standard di valutazione dell'impatto ambientale rappresenta un problema, in quanto assegnare il peso relativo ad ogni categoria d'impatto è la parte più soggettiva e controversa del ciclo di vita. A tal proposito, risulta fondamentale selezionare le appropriate categorie d'impatto, gli indicatori ed i modelli di caratterizzazione in linea con lo scopo e il campo di applicazione dello studio. Per valutare i benefici del recupero di materia o di energia nella maggior parte dei casi si utilizza la metodologia degli impatti evitati, quindi, definito il sistema che permette il recupero, si sottraggono dagli impatti

generali quelli associati alla produzione dei flussi recuperati. Questo approccio può portare anche ad impatti con risultati negativi, i quali indicano che il sistema produce impatti minori rispetto al sistema di confronto.

La valutazione degli impatti presenta alcune limitazioni:

- si rivolge solo ai problemi ambientali specificati nello scopo e nel campo di applicazione e quindi non valuta tutti i problemi ambientali del sistema oggetto di studio;
- non può sempre trovare differenze significative tra le categorie d'impatto ed i risultati dei relativi indicatori di sistemi alternativi;
- la mancanza delle dimensioni di spazio e tempo nei risultati introduce incertezza in quanto essa varia con le caratteristiche di spazio e tempo di ogni categoria di impatto.

#### 5.3.3.1 Il metodo Recipe 2014

Quanto ai metodi di valutazione dell'impatto, ai sensi delle norme ISO si distingue tra:

- elementi obbligatori, come la classificazione e la caratterizzazione;
- elementi opzionali, come la normalizzazione, il raggruppamento e la pesatura.

#### Classificazione

I risultati dell'analisi di inventario di solito contengono molteplici dati di emissioni differenti e parametri di estrazione delle risorse e pertanto occorre organizzare tutti gli elementi associandoli alle corrispettive categorie d'impatto. È possibile assegnare la stessa emissione o consumo di risorse ed energia contemporaneamente a più categorie d'impatto, le quali rappresentano i rispettivi effetti sull'uomo e sull'ambiente. Distribuire i valori di tutte le emissioni gassose, liquide e solide, dirette o indirette, può risultare alquanto difficile, specialmente se si considera che la stessa emissione può contribuire a più fenomeni d'impatto. L'aggregazione dei dati in categorie d'impatto è solo il primo step della fase di valutazione e permette di individuare, nel confronto tra più processi, quello con minor consumo di risorse e minor impatto a seguito dei rilasci nell'ambiente. A tal proposito i metodi di valutazione degli impatti sono suddivisi in:

- *midpoint level*, se i dati sono associati a categorie di impatto intermedio (es. acidificazione terrestre, cambiamento climatico);
- *endpoint level*, se i dati sono associati a categorie di impatto finale (danni alla salute umana, all'ecosistema e al consumo di risorse).

### Caratterizzazione

Dopo aver definito le categorie d'impatto e aver assegnato i risultati dell'analisi d'inventario, è necessario definire il fattore di caratterizzazione. Tramite tale fattore viene quantificato il potenziale contributo di ogni impatto ambientale e quindi è possibile capire quanto una sostanza contribuisce alla sua categoria d'impatto mediante comparazione con una sostanza di riferimento.

### Normalizzazione

È una procedura che mostra quanto una categoria d'impatto contribuisce significativamente al problema ambientale globale, dividendo le categorie per un parametro di normalizzazione. Questo valore può essere determinato in diversi modi. La procedura più comune è quella di determinare gli indicatori delle categorie d'impatto in un'area definita in un periodo di un anno e dividere il risultato ottenuto per il numero di abitanti nell'area oggetto di studio.

La fase di normalizzazione ha due scopi principali:

- le categorie d'impatto che contribuiscono in piccola parte possono non essere considerate, riducendo così il numero di aspetti che devono essere valutati;
- i risultati normalizzati mostrano l'ordine di grandezza dei problemi ambientali generati dal ciclo di vita del prodotto, rispetto ai carichi ambientali totali.

### Pesatura

La pesatura è la fase più difficile e controversa della valutazione di impatto del ciclo di vita. Ci sono diverse soluzioni per semplificare o risolvere il problema:

1. utilizzare un elenco per la valutazione delle categorie d'impatto e proporre pesi standard;
2. distanza dall'obiettivo: se è possibile impostare un obiettivo per ogni categoria di impatto e il suo target, questo può essere usato per determinare il fattore di ponderazione;
3. monetizzazione: tutti i danni sono espressi con la stessa unità monetaria, i diversi carichi ambientali sono associabili ai costi, ad es. i costi relativi all'estrazione delle risorse attuali e futuri possono variare.

Il metodo ReCiPe (2014) è un metodo di valutazione degli impatti che offre risultati sia a livello di *midpoint* che di *endpoint*, derivante dalla combinazione di due approcci principali:

- il metodo CML (Centrum Milieukunde Leiden), proposto come metodo linea guida per la caratterizzazione nell'*Handbook of LCA* (Guinée et al. 2002), per le categorie di *midpoint*;

- il metodo Eco-indicator 99 (Goedkoop & Spriensma, 1999) per le categorie di *endpoint*.

Recipe 2014 comprende due gruppi di categorie di impatto con opportunamente associati dei fattori di caratterizzazione. A livello di midpoint il metodo prevede ben diciotto categorie di impatto che sono:

1. cambiamento climatico (CC);
2. assottigliamento dello strato di ozono (OD);
3. acidificazione terrestre (TA);
4. eutrofizzazione delle acque dolci (FE);
5. eutrofizzazione marina (ME);
6. tossicità umana (HT);
7. ossidazione fotochimica (POF);
8. formazione di particolato (PMF);
9. ecotossicità terrestre (TET);
10. ecotossicità delle acque dolci (FET);
11. ecotossicità marina (MET);
12. radiazione ionizzante (IR);
13. occupazione di terreno agricolo (ALO);
14. occupazione di terreno urbano (ULO);
15. trasformazione del suolo naturale (NLT);
16. esaurimento delle risorse idriche (WD);
17. esaurimento delle risorse minerali (MRD);
18. esaurimento del combustibile fossile (FD).

A livello di *endpoint*, queste diciotto categorie di impatto *midpoint*, sono ulteriormente convertite e aggregate nelle seguenti tre categorie:

1. danno alla salute umana (*Human Health*, HH);
2. danno alla diversità dell'ecosistema (*Ecosystem Diversity*, ED);
3. danno alla disponibilità di risorse (*Resource Availability*, RA).

La figura 12 riassume tutte le categorie accennate relative ai due approcci e mostra graficamente i collegamenti tra le categorie di impatto *midpoint* e le tre categorie di danno (*endpoint*), a partire dai dati di inventario, ossia dalla fase LCI. Si noti come alcune categorie a livello di *midpoint* (*Occupied area*, *Transformed area*, *Hazard W. Conc.*, *Water use*) non vengono considerate in un ulteriore modello ambientale per il calcolo relativo alle categorie di *endpoint*.

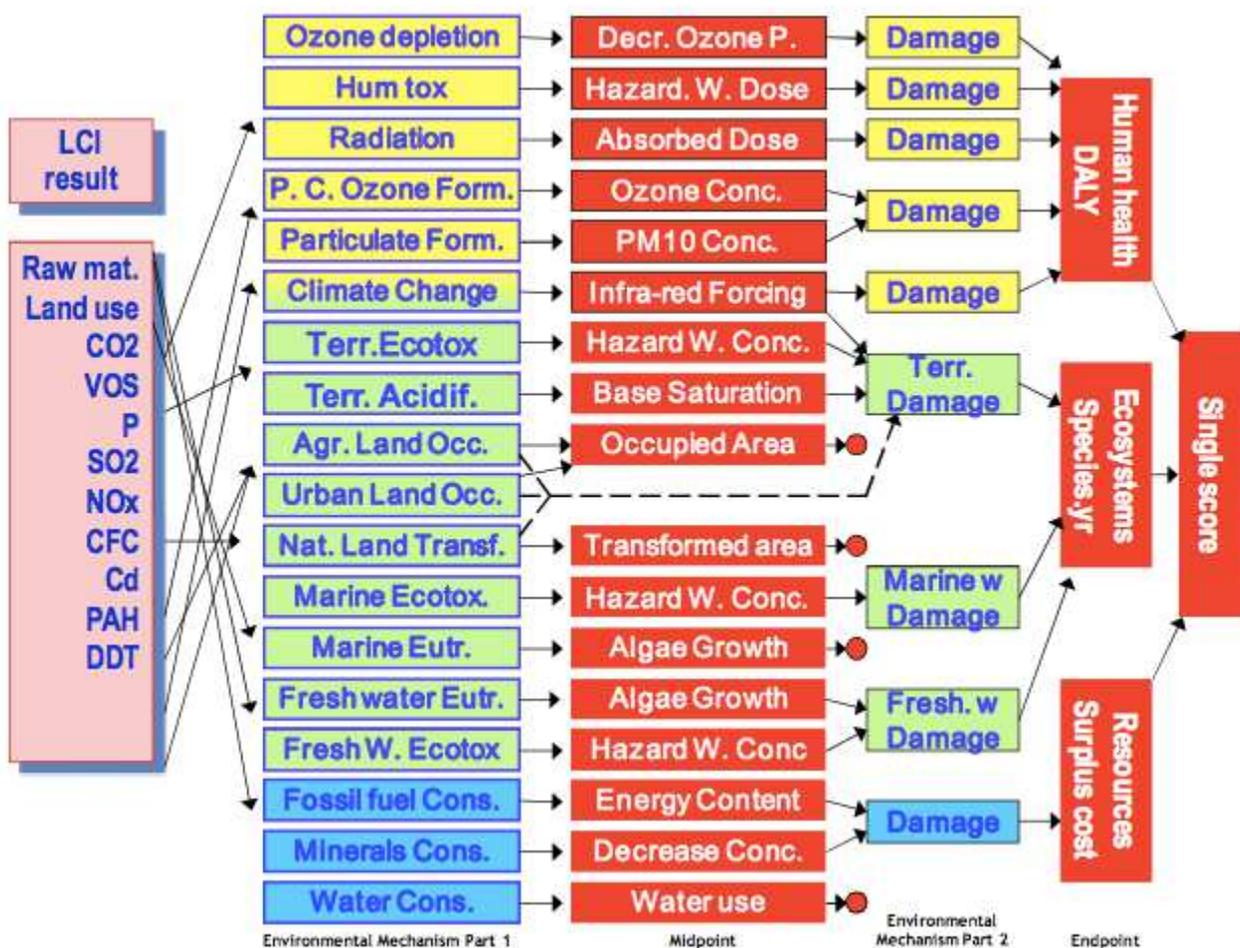


Figura 12 - Relazioni tra i parametri LCI, gli indicatori di midpoint e gli indicatori di endpoint (Recipe 2008, Goedkoop et.al,2012).

Per le categorie di endpoint, sono necessari due fattori di caratterizzazione: uno per convertire i risultati dell'indicatore di midpoint nel corrispettivo indicatore di endpoint, l'altro per convertire l'impatto (es. emissione) direttamente in indicatore di endpoint:

$$Q_{ei} = \sum_m Q_{em} Q_{mi} \quad (\text{Eq.1})$$

con:

Q, fattore di caratterizzazione;

i, carico ambientale;

m, indicatore di *midpoint*;

e, indicatore di *endpoint*.

I fattori di caratterizzazione ottenuti sono poi convertiti in indicatori di risultato (I).

Per quanto riguarda la categoria di *midpoint* m, l'indicatore I risulta pari a:

$$I_m = \sum_i Q_{mi} m_i \quad (\text{Eq.2})$$

dove  $m_i$  è la magnitudine del carico ambientale  $i$  (ad esempio la massa di CO<sub>2</sub> rilasciata in aria)

L'indicatore di risultato I, per la categoria di *endpoint* può essere calcolato in due modi:

1. Si calcola direttamente dal valore del carico ambientale senza passare dagli intermedi di *midpoints*:

$$I_e = \sum_i Q_{ei} m_i \quad (\text{Eq.3})$$

2. Si passa attraverso il calcolo degli intermedi di *midpoints*:

$$I_e = \sum_m Q_{em} I_m \quad (\text{Eq.4})$$

### **Danno alla salute umana**

All'interno di questa categoria sono compresi i danni causati da:

- sostanze cancerogene (*HH Carcinogenic effects*);
- sostanze organiche (*HH Respiratory effects organic*);
- sostanze inorganiche (*HH Respiratory effect inorganics*);
- cambiamenti climatici (*HH Climate Change*);
- radiazioni ionizzanti (*HH Radiation*);

- assottigliamento dello strato di ozono (*HH Ozone depletion*).

La metodologia solitamente valuta il danno alla salute umana stimando il *Disability-Adjusted Life Years*, DALYs (Hofstetter,1998). L'obiettivo è quello di correlare gli effetti sulla salute umana al numero di anni vissuti dall'uomo con disabilità e al numero di anni di vita persi. Considerando che viene data la stessa importanza per un anno di vita perso nelle diverse età e che non viene considerata alcuna variazione per le generazioni future, il DALYs è la somma degli anni di vita persi (YLL) e degli anni di vita vissuti con la disabilità (YLD):

$$DALY = YLL + YLD \quad (\text{Eq.5})$$

Con:

$$YLD = w * D \quad (\text{Eq. 6})$$

dove :

w, fattore di severità compreso tra 0 (stato di piena salute) e 1 (morte);

D, durata della malattia.

Il DALY è molto utile per valutare il danno alla salute umana, ma è un metodo che dipende fortemente da assunzioni soggettive, in quanto:

- si riferisce ad una specifica regione in un certo arco di tempo, applicando poi una media mondiale nel calcolo dei fattori di caratterizzazione, si assume che questa sia accettabile;
- non considera le differenze di età e le variazioni per le generazioni future;
- conferisce un peso soggettivo all'entità delle malattie.

### **Danno alla diversità dell'ecosistema (ED)**

La categoria comprende i danni causati da:

- emissione di sostanze tossiche (*EQ Ecotoxicity*);
- combinazione degli effetti di acidificazione ed eutrofizzazione (*EQ Acidification/ Eutrophication*);
- occupazione e riconversione del territorio (*EQ Land-use*).

Gli ecosistemi sono eterogeni e molto complessi da monitorare, ma la biodiversità, le funzioni ecologiche, le risorse e le informazioni genetiche sono aspetti importanti per tutta l'umanità. Un approccio per descrivere la qualità degli ecosistemi è in termini di energia, materia e flussi informativi. Quando tali flussi sono utilizzati per caratterizzare la qualità dell'ecosistema, si considera lo stato di alta qualità, la condizione che permette ai flussi di verificarsi senza alcuna interruzione causata dall'attività antropica. Pertanto, il parametro più importante per la determinazione della qualità di un ecosistema è il grado di perturbazione dei flussi chiave. I fattori antropogenici possono influenzare tutti i gruppi di specie presenti, ma dato che è impossibile controllarle tutte, sono state selezionate solo le specie in grado di rappresentare la qualità totale dell'ecosistema. Inoltre, occorre scegliere tra:

- estinzione totale o reversibile di specie;
- scomparsa reversibile o irreversibile di una specie in una regione durante un certo periodo di tempo.

Il primo tipo di danno è estremamente difficile da modellare nel contesto LCA, inoltre si suppone che la completa estinzione di solito sia causata da molteplici fattori. Tale ipotesi implica che nessun singolo ciclo di vita può causare da solo l'estinzione di una specie. Sulla base di questo ragionamento si utilizza solo il secondo tipo di danno. ReCiPe considera che la perdita di ogni specie, marina o terrestre, è ugualmente importante e calcola il numero totale di specie di riferimento perse.

Il fattore di caratterizzazione *endpoint* per il danno all'ecosistema ( $CF_{ED}$ ) si calcola con la somma del PDF (*Potential Disappear Fraction of species*) moltiplicato per la densità delle specie (SD):

$$CF_{ED} = PDF_{TERR} * SD_{TERR} + PDF_{fw} * SD_{fw} + PDF_{mw} * SD_{mw} \quad (\text{Eq. 7})$$

Dove:

PDF = fattore di caratterizzazione;

SD = densità della specie;

terr = sistemi terrestri;

fw = sistemi d'acqua dolce;

mw = sistemi di acqua marina.

Si deve poi determinare il totale delle specie sulla terra, registrate da UNEP (United Nations Environment Programme), a loro volta suddivise in specie terrestri, d'acqua dolce e marittime:

- numero totale specie terrestri: 1'600'000;
- numero totale di specie d'acqua dolce: 100'000;
- numero totale di specie marittime: 250'000.

Infine, occorre stimare l'area terrestre (escludendo le aree agricole, i ghiacciai e i deserti) e il volume delle acque dolci e marine (fino ad una profondità di 200m, entro il quale vi è la maggior concentrazione di specie).

- Densità specie terrestri:  $1.48 E^{-08} [m^{-2}]$ ;
- densità specie d'acqua dolce:  $7.89 E^{-10} [m^{-3}]$ ;
- densità specie d'acqua marina:  $3.46 E^{-12} [m^{-3}]$ .

### **Disponibilità di risorse (RA)**

Il rischio che l'umanità esaurisca le risorse per le generazioni future è uno dei principali problemi, motivo per cui alcuni gruppi di studiosi considerano l'esaurimento delle risorse come l'unica questione da monitorare. I danni di questa categoria sono causati fondamentalmente da:

- estrazione di minerali (*R Mineral*);
- estrazione di combustibili fossili (*R Fossil Fuel*).

Per comprendere al meglio le esigenze di risorse, occorre distinguere tra un materiale e la funzione che può fornire, o come Müller-Wenk (1998) afferma, la proprietà essenziale del materiale che viene utilizzato per servire un certo scopo. Il gruppo di lavoro sulla valutazione d'impatto dell'organizzazione SETAC-UNEP Life Cycle Initiative ha classificato le risorse in tre categorie: biotic, abiotic (flussi, riserve e scorte) e land. Per la valutazione delle risorse abiotiche esistono vari approcci:

- aggregazione basata sul deposito (D) e sul consumo (U), ma la dimensione del deposito rimane piuttosto incerta (Modello CML 2000);
- aggregazione basata su interventi ambientali causati da ipotetici processi futuri, come ad esempio il metodo proposto da Müller-Wenk (1998), basata sul surplus di energia per future estrazioni di bassa qualità. Quest'ultimo metodo è stato applicato, con alcune modifiche, nel modello Eco-

indicator 99. Questo tipo di approccio deve supporre scenari futuri e ciò rende il fattore di caratterizzazione piuttosto incerto;

- exergia, come proposto da Finnveden (1997). Tuttavia, è lecito chiedersi se l'exergia attuale riflette i problemi ambientali, in quanto è una proprietà fisica che rispecchia lo sforzo per produrre le risorse a prescindere dalla sua scarsità nell'ambiente. Come tale, l'indicatore non esprime la scarsità della risorsa.

Recipe 2014 non utilizza nessuno di questi approcci, infatti, si basa sulla distribuzione geologica di minerali e risorse fossili, valutando come l'uso di queste risorse può contribuire negativamente all'estrazione delle risorse stesse. Pertanto, si fa riferimento ad una funzione che considera l'aumento del costo di estrazione nel tempo, non considerando l'aumento di richiesta energetica in un futuro lontano.

L'aumento marginale del costo (MCI, in \$/kg<sup>2</sup>) è il fattore che rappresenta l'aumento del costo di un prodotto r (\$/kg) dovuto all'estrazione o resa (kg) di risorsa r:

$$MCI_r = \frac{\Delta Cost_r}{\Delta Yield_r} \quad (\text{Eq. 4})$$

L'aumento del costo deve essere moltiplicato per un fattore che esprime l'ammontare consumato. Questo stadio converte l'aumento di risorse in aumento di costo per la società.

#### **5.3.4 Il concetto di Cultural Theory**

Tale teoria, presa in considerazione dal metodo ReCiPe 2014, è stata ottenuta da Thompson considerando i comportamenti delle persone rispetto a due dimensioni fondamentali dell'esistenza umana: l'attaccamento al gruppo ed il grado di indipendenza nei confronti di imposizioni e prescrizioni esterne. Differenti combinazioni di valori delle due dimensioni considerate identificano una "way of life", la quale influisce sulle scelte e sul sistema di valori di ciascun individuo e del gruppo di appartenenza. È importante sottolineare che la teoria non implica che ci siano esclusivamente cinque tipi di persone, poiché la personalità dell'uomo è estremamente sfaccettata. Vengono di seguito elencate le principali categorie di individui previste dalla teoria:

1. individualista (*Individualist*), persona libera da qualsiasi legame. Nella sua visione tutto è provvisorio e soggetto a negoziazione;
2. ugualitario (*Egalitarian*), persona molto legata al gruppo ma non alle sue imposizioni, di conseguenza non riconosce nemmeno i ruoli e relazioni all'interno del gruppo stesso;

3. gerarchico (*Hierarchist*), soggetto che possiede forti legami sia con il gruppo sia con le sue regole, in grado di creare una forte stabilità, favorendo azioni di controllo su di sé e sugli altri;
4. fatalista (*Fatalist*), persona che dipende fortemente dalle prescrizioni ma non avverte l'appartenenza al gruppo e agisce quindi singolarmente;
5. autonomista (*Autonomist*), soggetto appartenente ad una minoranza che rifiuta l'influenza del gruppo e di tutte le sue prescrizioni.

È evidente che le prime tre tipologie di persone basano le proprie scelte su prospettive solide, al contrario delle ultime due, le quali, per questo motivo, non possono essere considerate nel modello. Il fatalista, infatti, tende a non avere opinioni proprie ma ad uniformarsi al giudizio degli altri, mentre l'autonomista ha un pensiero completamente sfuggente a qualsiasi tipo di modellizzazione. A seconda della prospettiva culturale scelta, i risultati dell'analisi possono variare, pertanto la prospettiva culturale scelta sarà indicata in seguito nella parte sperimentale.

#### 5.3.4 Interpretazione dei risultati e valutazione dei possibili miglioramenti

È lo stadio nel quale i risultati dell'analisi di inventario e della valutazione degli impatti sono considerati insieme e pertanto può essere previsto un processo iterativo di rivisitazione e revisione del campo di applicazione e della qualità dei dati raccolti. Lo scopo della fase di interpretazione dei risultati, in accordo con le norme ISO, è quello di analizzare i risultati traendo opportune conclusioni, ricordandosi delle limitazioni che possono derivare dalle assunzioni fatte, come per esempio l'esclusione di alcune categorie d'impatto (Burgess and Brennan, 2001).

#### Analisi della qualità dei dati

Tutti i dati nei modelli di ciclo di vita hanno delle incertezze, in particolare possiamo distinguere tra:

- incertezza dei dati. Queste sono relativamente facili da gestire, in quanto possono essere espresse come deviazione standard. Metodi statistici, come l'analisi Monte Carlo, possono essere utilizzati per calcolare l'incertezza dei risultati in una LCA;
- incertezza sulla correttezza (rappresentatività) del modello, si riferisce al fatto che non c'è solo un modo per ricreare un sistema che riproduca la realtà. In ogni analisi LCA, scelte più o meno soggettive, possono influenzare il modello nei seguenti aspetti:

1. rappresentatività: spesso si usano dati di processo provenienti da diversi fonti;
2. allocazione: si possono scegliere diversi criteri di allocazione;

3. eventi futuri: è difficile definire il “fine vita” di certi prodotti nel lungo tempo;

4. scelta dell'unità funzionale, spesso non è chiaro come comparare i prodotti.

Tutti questi fattori hanno un impatto significativo sul risultato finale della LCA, ma non è sempre possibile utilizzare l'analisi Monte Carlo; in questi casi si utilizza un'analisi di sensibilità, come descritto in seguito.

- incertezza causata dall'incompletezza del modello: si riferisce all'inevitabile mancanza di dati dovuta a:

- confini del sistema, non è facile applicare confini di sistema e criteri di cut-off coerenti;

- schede dati incomplete o non specificate sufficientemente;

- mancata corrispondenza tra l'inventario e la valutazione dell'impatto. Spesso i dati raccolti non hanno fattori di caratterizzazione.

Per valutare tale incertezza possiamo utilizzare:

1. analisi di sensibilità;
2. analisi di contributo;
3. analisi di incertezza.

#### Analisi di sensibilità

L'obiettivo è quello di valutare l'affidabilità dei risultati finali e le conclusioni che ne derivano, determinando la loro influenza dall'incertezza dei dati, dai metodi di allocazione o dai risultati di calcolo delle categorie d'impatto. Tale analisi, come indicato nella norma ISO 14044, viene effettuata all'inizio e alla fine di una LCA ed è in grado di valutare come i cambiamenti dei dati e delle scelte metodologiche influenzino i risultati nella fase d'inventario.

#### Analisi di contributo

È uno strumento importante per comprendere l'incertezza del risultato e determinare quali processi giocano un ruolo significativo nei risultati. Spesso una LCA contiene centinaia di diversi processi, ma i risultati sono determinati da appena una decina di questi. Con le informazioni ottenute dall'analisi è possibile focalizzare l'attenzione sui processi determinanti e analizzare se questi sono sufficientemente rappresentativi, completi e se le assunzioni fatte sono importanti per il processo.

## Analisi di incertezza

È una procedura che determina come l'incertezza dei dati e le assunzioni fatte avanzano nei calcoli (ISO 14044). Come metodo di valutazione si può utilizzare l'analisi Monte Carlo, un metodo numerico per valutare l'incertezza dei dati e stabilire un intervallo di incertezza nel risultato. L'analisi Monte Carlo, ha un elemento di gioco di azzardo e pertanto il suo nome deriva dall'omonimo Stato, famoso per le sue sale da gioco e i suoi casinò.

## **6 SOFTWARE E DATABASE**

### ***6.1 Software SimaPro***

L'analisi del ciclo di vita è stata eseguita con l'ausilio del software SimaPro (versione 8.0.4), un programma, sviluppato dalla Pré Consultant conforme alla normativa ISO vigente e tra i più utilizzati per questo tipo di studio [PRé Consultants, 2008]. All'interno del programma è possibile trovare una sezione dedicata ai processi e una ai prodotti:

1. processi (*process*). All'interno è possibile scegliere tra diversi processi a seconda del sistema oggetto di studio; sono completi di documentazione che specifica la loro realizzazione (autore, fonte di dati, specifiche tecniche), di informazioni di tipo ambientale, sociale ed economico relative ai flussi in input e in output (es. utilizzo materie prime, emissioni, impatti economici e impatti evitati). Ciascun processo può essere singolo (*unit process*) o può contenere a sua volta altri processi (*system process*);
2. stadi di prodotto (*product stages*). Suddivide il sistema oggetto di studio nelle varie fasi del ciclo di vita:
  - produzione, considera tutte le fasi di trasporto per le materie prime, i semilavorati o il prodotto finito;
  - ciclo di vita, quindi lo stadio di assemblaggio e di utilizzo del prodotto;
  - fine vita, all'interno del quale sono presenti tutte le fasi che comprendono il fine vita di un prodotto, come il disassemblaggio, il trattamento, il recupero, il riciclo e lo smaltimento con i relativi carichi ambientali che ne conseguono;
  - disassemblaggio, definisce i flussi e li indirizza ai rispettivi scenari di fine vita;
  - riuso, considera tutte le fasi della categoria e gli impatti ambientali prodotti ed evitati.

## **6.2 Database Ecoinvent**

La banca dati Ecoinvent (versione 3.1), di origine svizzera, copre quasi 3000 processi, per lo più di attività presenti in Svizzera e nell'Europa occidentale relativi a:

- energia;
- trasporti;
- materiali da costruzione;
- prodotti chimici;
- agricoltura;
- trattamento degli inquinanti.

Il primo database fu pubblicato nel 2003 dallo Swiss Centre for Life Cycle Inventories e successivamente aggiornato e integrato con altri database. Per via della grande quantità di dati presenti, questo database è utilizzato anche per altri tipi di studi, come Integrated Product Policy (IPP) o Design for Environment (DfE).

## **PARTE SPERIMENTALE**

## **7 ANALISI DEL CICLO DI VITA**

Verranno ora fornite informazioni relative all'obiettivo dello studio ed al campo di applicazione.

### **7.1 Definizione dell'obiettivo e dello scopo**

L'obiettivo dello studio consiste nel valutare in modo sistematico e completo l'entità delle differenti tipologie di impatto ambientale, relative all'impianto di trattamento rifiuti organici di Romagna Compost, in un arco di tempo ben definito.

La comparazione dei risultati ottenuti per due periodi differenti permette di raggiungere l'obiettivo e di comprendere come sono variati gli impatti dell'impianto tra lo stato ante-operam (tecnologia di compostaggio tradizionale) e post-operam (sistema integrato anaerobico-aerobico con annesso impianto di depurazione per il trattamento delle acque reflue di processo).

Le motivazioni che hanno portato a realizzare tale studio sono molteplici: in primo luogo, la configurazione dell'impianto è cambiata notevolmente nel tempo, in particolare nel 2009 l'ampliamento ha permesso l'introduzione di tecnologie più innovative, che consentono la produzione di energia elettrica rinnovabile e calore. Inoltre, si è voluto testare l'applicazione della metodologia LCA alla valutazione di un impianto di trattamento di rifiuti, settore a cui è stata applicata solo recentemente, essendo inizialmente sviluppata ed impiegata per la valutazione di prodotti e servizi.

Il modello è stato creato partendo inizialmente da processi pre-esistenti nel database Ecoinvent, modificati poi con i dati primari, per adattarli alla configurazione impiantistica oggetto di studio.

### **7.2 Definizione del campo di applicazione**

Si è scelto di eseguire l'analisi LCA per un certo numero di anni, nel corso dei quali sono avvenuti cambiamenti significativi del processo e della configurazione impiantistica; pertanto gli anni considerati sono i seguenti: 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013. Nel 2009 si è concluso l'ampliamento dell'impianto e nel corso dell'anno è stato condotto sia il processo di compostaggio sia i primi riempimenti dei fermentatori anaerobici, per cui i dati di questo periodo non esprimono la reale potenzialità dell'impianto.

Il 2010 è stato il primo anno di avviamento dell'impianto, con 30000 t/anno di rifiuto organico trattato, mentre nel 2011 l'impianto è entrato a regime, raggiungendo la capacità massima di trattamento autorizzata, ovvero 40000 t/anno di FORSU.

L'unità funzionale scelta è una tonnellata di rifiuto organico (FORSU) in ingresso all'impianto, poiché è l'elemento rappresentativo del sistema ed è possibile riferirvi in maniera diretta l'energia prodotta e consumata dal processo, le materie prime utilizzate e le emissioni di inquinanti.

Lo studio LCA si compone essenzialmente di tre fasi:

*Fase 1:* analisi dell'impianto prima e dopo l'ampliamento, considerando come confini del sistema l'ingresso del rifiuto organico nell'impianto fino allo smaltimento finale dei flussi di rifiuto prodotti; negli anni successivi all'ampliamento è stato considerato anche il recupero energetico del biogas.

La funzione principale del sistema studiato è quindi legata alle operazioni di trattamento biologico del rifiuto organico, abbinata al recupero energetico, quando esistente.

Per quanto riguarda il processo di fermentazione anaerobica e compostaggio sono stati considerati i processi legati all'impiego di carburanti, lubrificanti, al trasporto dei rifiuti solidi e liquidi, al loro trattamento e smaltimento, oltre alle emissioni di differente natura.

*Fase 2:* estensione dei confini del sistema, includendo il trasporto del rifiuto organico dal luogo di raccolta all'impianto di recupero Romagna Compost s.r.l.;

*Fase 3:* estensione dei confini del sistema alla gestione dei rifiuti in Italia, considerando la possibilità di smaltire il rifiuto organico all'interno dell'ambito territoriale di riferimento in cui è stato prodotto, in base alla dotazione impiantistica regionale.

Ciascun dato è associato ad un'incertezza specifica che lo descrive, la trattazione è possibile trovarla al paragrafo 11.2.

È stato scelto di presentare i risultati ottenuti sotto forma di grafici, in quanto permettono di confrontare la variazione delle diverse categorie di impatto negli anni; inoltre ciascun grafico è corredato da una breve spiegazione ed interpretazione.

## **8 ANALISI DI INVENTARIO**

Vengono di seguito riportati i dati utilizzati per la modellazione degli anni oggetto di studio e dei processi ad essi correlati che sono stati inclusi nei confini del sistema.

I dati raccolti sono stati riorganizzati per fasi di processo per poter valutare le fasi più incisive dal punto di vista ambientale e valutare gli effetti degli interventi di miglioramento. Nello specifico, con l'ausilio del software SimaPro sono stati creati sette scenari, ciascuno per ogni anno di funzionamento:

- impianto di compostaggio (anni 2007-2008);
  - impianto di compostaggio tradizionale e avvio dell'impianto di trattamento acque reflue e del processo di fermentazione anaerobica (anno 2009);
  - impianto con sistema integrato anaerobico-aerobico (anni 2010-2013);
- all'interno dei quali sono stati inseriti tutti gli impatti suddivisi per fasi di processo:

1. stoccaggio e pretrattamento del rifiuto;
2. fermentazione anaerobica;

3. compostaggio e vagliatura;
4. trattamento arie di processo;
5. trattamento percolati e acque reflue di processo;
6. utilities.

La fase 2 e la fase 5 non sono state considerate per gli anni 2007-2008 in quanto non presenti nell'impianto, come è possibile notare dai lay-out di fig. 1 e fig.2.

Gli impatti evitati derivanti dalla produzione di energia elettrica, calore e ammendante compostato misto sono evidenziati in verde.

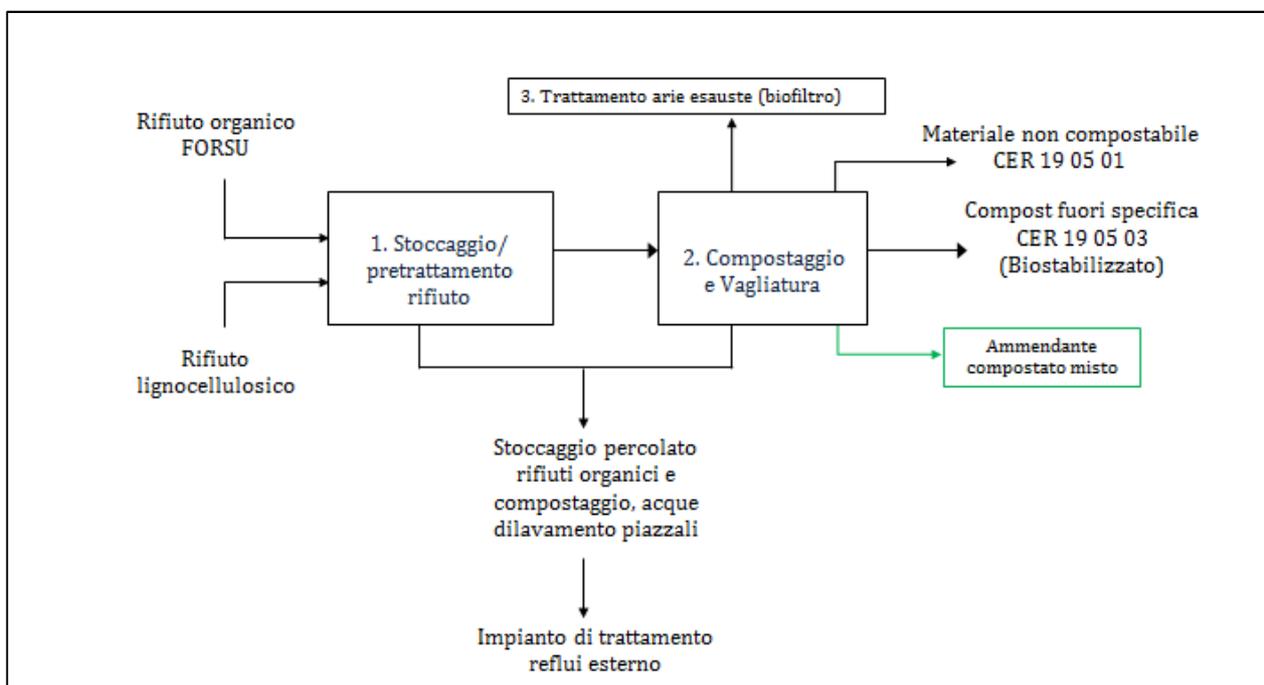


Figura 13 - Lay-out impianto di compostaggio tradizionale (anni 2007-2008)

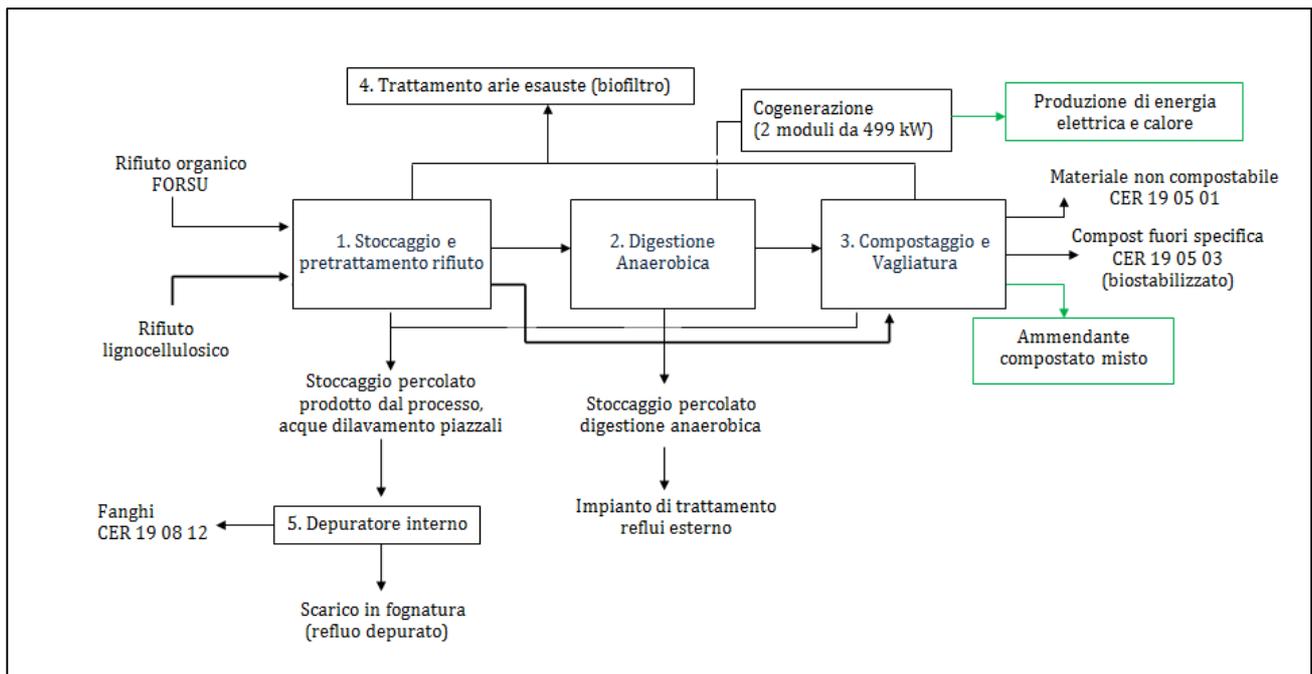


Figura 14 - Lay-out impianto con sistema integrato anaerobico - aerobico (anni 2012-2013)

## 8.1 Flussi di massa ed energia

In tabella 1 sono riportati i dati relativi ai flussi di massa ed energia, in entrata e in uscita dalla varie fasi del processo, da cui è già possibile trarre alcune considerazioni.

La maggior parte dei dati utilizzati sono dati primari derivanti dai report di conduzione e gestione dell'impianto e dalle relazioni tecniche inviate ad Enti pubblici (provincia, ARPA, etc), pertanto si tratta di dati di elevata attendibilità. Per altre informazioni di cui non erano noti i dati specifici dell'impianto, come le emissioni diffuse o gli impatti associati alle infrastrutture, sono stati assunti validi i dati già presenti del database di riferimento Ecoinvent o di articoli utilizzati come riferimento bibliografico, facendo quindi ricorso a dati secondari.

Per un numero minimo di informazioni relativo quasi esclusivamente ai consumi di risorse quali acqua e carburante negli anni 2007-2008 è stato necessario ricorrere ad approssimazioni, utilizzando dati terziari.

	Linee di processo/parametri		Impianto di compostaggio tradizionale		Impianto con sistema integrato anaerobico-aerobico				
					Avvio nuovo impianto	1° anno di funzionamento	Impianto a regime		
							Anno		Anno
1	Stoccaggio e pretrattamento rifiuto	u.d.m	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
INPUT	Quantità rifiuto organico (FORSU)	t/anno	13194	11955	17193	29706	39551	39795	38453
	Quantità di rifiuto lignocellulosico	t/anno	1534	2455	4696	5598	6691	7317	9008
	Trasporto rifiuto organico	tkm/t FORSU	40	40	40	79	63	72	109
	Trasporto rifiuto lignocellulosico	tkm/t FORSU	35	35	35	35	35	35	35
	Utilizzo carburante per triturazione rifiuti	MJ/t FORSU	15.79	15.79	15.79	14.41	14.41	14.41	14.41
	Consumo carburante per movimentazione pale	t/anno	3.68	3.60	5.47	8.82	11.50	11.78	11.86
	Consumo energia elettrica	kWh/anno	-	-	10000	19272	19008	23366	27348
	Lubrificanti	t/anno	0.20	0.20	0.20	0.40	0.50	0.50	0.50
OUTPUT	Percolato prodotto e non trattato nell'impianto di depurazione interno	t/anno	850	1721	901	3313	2237	1836	1730
	Trasporto percolato prodotto	km/t	0.69	0.69	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41
2	Fermentazione anaerobica	u.d.m	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
INPUT	Quantità di FORSU in digestione	t/anno	-	-	1270	26735	35596	35816	34608
	Digestato (inoculo)	t/anno	-	-	-	28951	30331	29494	28929
	Carburante consumato per la movimentazione delle pale	t/anno	-	-	9.00	10.00	14.58	14.58	14.58

	Energia consumata da impianto di fermentazione	kWh/anno	-	-	11200	180374	221702	234439	251200
	Lubrificanti	t/anno	-	-	-	3.30	3.30	3.30	3.30
OUTPUT	Produzione di biogas	Nm <sup>3</sup> /anno	-	-	88618	3175147	3781487	4090939	4198117
	Produzione di energia elettrica	kWh/anno	-	-	141789	5251617	6345389	6989286	7182523
	Produzione di energia termica	kWh/anno	-	-	93580	2276849	2751057	3063365	3080853
	Percolato prodotto dall'impianto	t/anno	-	-	-	2434	2694	4534	5176
	Trasporto percolato in impianto di smaltimento	tkm/anno	-	-	-	2.41	2.41	2.41	2.41
	Olio minerale esausto	t/anno	-	-	-	1.90	1.90	1.90	2.90
	<i>Emissioni cogeneratori</i>								
	Temperatura uscita fumi	°C	-	-	-	450	450	450	450
	Portata media fumi secca	Nm <sup>3</sup> /h	-	-	2147	2147	2147	2147	2147
	Ossidi di azoto espressi come NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	-	-	450	450	450	450	450
	Monossido di carbonio – CO	mg/Nm <sup>3</sup>	-	-	300	300	300	300	300
	Materiale particella PM	mg/Nm <sup>3</sup>	-	-	10	10	10	10	10
	Ossidi di zolfo espressi come SO <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	-	-	500	500	500	500	500
3	Compostaggio e Vagliatura	u.d.m	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
INPUT	Digestato	t/anno	-	-		14858	26503	28000	24593
	Rifiuto organico	t/anno	12798	11596	15940	-	-	-	-
	Rifiuto lignocellulosico (strutturante)	t/anno	1534	2455	4696	5598	6691	7317	9008
	Energia elettrica consumata dalla fase di biossidazione	kWh/anno	-	-	69420	215548	305617	380132	432209
	Energia elettrica consumata dalla fase di maturazione	kWh/anno	65019	60092	60092	38747	99966	101095	93913
	Carburante consumato per la	t/anno	7.85	7.10	9.00	12.00	18.00	16.40	16.40

	movimentazione delle pale								
	Consumo carburante vagliatura	t/anno	7.40	6.60	6.60	5.96	5.66	7.34	5.75
	Consumo energia elettrica vagliatura	kWh	-	-	-	2745	14538	6815	5338
OUTPUT	Biostabilizzato prodotto (CER 19 05 03)	t/anno	5360	3447	3670	6507	6467	6697	7737
	Trasporto biostabilizzato ad impianto smaltimento	km/t	0.25	0.25	0.25	0.12	0.13	1.11	3.64
	Sovvallo (CER 19 05 01)	t/anno	1555	1420	1192	1510	4812	6713	7075
	Trasporto sovvallo ad impianto di smaltimento	km/t	0.25	0.25	3.83	3.83	3.37	3.50	3.15
	Ammendante compostato misto	t/anno	1846	936	340	2377	3591	2930	2370
4	Trattamento arie di processo	u.d.m	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
INPUT	Acqua consumata dallo scrubber	t/anno	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480
	Energia consumata da pompe scrubber	kWh/anno	334098	334098	334098	334098	334098	334098	334098
	Energia consumata da aspiratore biofiltro	kWh/anno	602910	602910	602910	602910	602910	602910	602910
	Cippato per biofiltro	m <sup>3</sup> /anno	200	200	200	200	200	200	200
OUTPUT	Emissioni biofiltro – unità odorimetriche	Ou <sub>E</sub> /m <sup>3</sup>	300	300	300	300	300	300	300
	Cippato biofiltro esausto (CER 15 02 03)	t/anno	169	169	169	169	169	169	169
5	Trattamento percolati e acque reflue di processo		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
INPUT	Acque reflue in ingresso al depuratore	t/anno	-	-	7150	25206	15979	20009	26167
	% percolato proveniente dalla discarica	%	-	-	48	70	62	74	77
	COD medio in ingresso	mg/l	-	-	18720	18457	19829	19800	19143
	COD medio in uscita	mg/l	-	-	2000	2000	2000	2000	2000

	Refluo scaricato in fognatura (al netto del percolato)	t/anno	3000	3000	3000	11850	5748	9528	17898
	Fanghi palabili (al netto del percolato)	t/anno	-	-	303	1151	488	272	144
	Trasporto fanghi	km/t	-	-	2.41	2.41	2.41	6.36	6.35
	Energia elettrica consumata dal depuratore	kWh/anno	-	-	227659	227659	231780	324409	324642
	Consumo di acqua potabile	t/anno	-	-	3200	3374	3806	6897	7243
	Acido cloridrico	t/anno	-	-	35	33	36	51	37
	Ipoclorito di sodio	t/anno	-	-	2.00	1.00	2.00	2.00	5.00
	Acido citrico soluzione	t/anno	-	-	11	13	7	10	18
	Antischiuma	t/anno	-	-	6.00	6.00	4.00	1.75	2.75
6	Utilities (uffici, locali tecnici, spogliatoi, etc)		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
	Energia elettrica consumata	kWh/anno	-	-	-	18466	137957	116024	159549
	Acqua potabile	t/anno	180	180	180	1380	1380	1380	1400

Tabella 15 - Flussi di materia ed energia in entrata e uscita dall'impianto

Risulta subito evidente che la quantità di rifiuti organici recuperati è triplicata dopo l'intervento di ampliamento dell'impianto, passando da 12575 t/anno nel biennio 2007-2008 a 37950 t/anno per il biennio 2012-2013. I dati per gli anni 2012 e 2013 sono stati ricavati dai report utilizzati in impianto e dalle relazioni tecniche annuali, mentre per gli anni precedenti (antecedenti al 2008), a causa del minor personale presente in impianto, la quantità di dati raccolti e disponibili è inferiore. Pertanto, per alcuni parametri, come il consumo di carburante, sono stati calcolati basandosi sui dati degli anni successivi.

## 9 CREAZIONE DEL MODELLO PER ANALISI

Come è già stato accennato nei capitoli precedenti, la modellazione del processo di fermentazione anaerobica e compostaggio è basata su processi appartenenti alla banca dati Ecoinvent del software SimaPro; partendo quindi da essi e modificandone opportunamente i dati e le interconnessioni, è stato possibile creare il modello delle attività dell'impianto oggetto di studio. Per tale motivo è utile conoscere le caratteristiche dei processi di partenza e comprendere come essi siano legati a molti altri processi contenuti all'interno delle banche dati di riferimento. Di seguito saranno analizzate nello specifico le varie fasi e le assunzioni fatte per il calcolo dei parametri.

### 9.1 Prima fase LCA: confini del sistema dall'ingresso dei rifiuti organici all'impianto fino allo smaltimento dei flussi di rifiuto finali

#### 9.1.1 Stoccaggio e pretrattamento del rifiuto

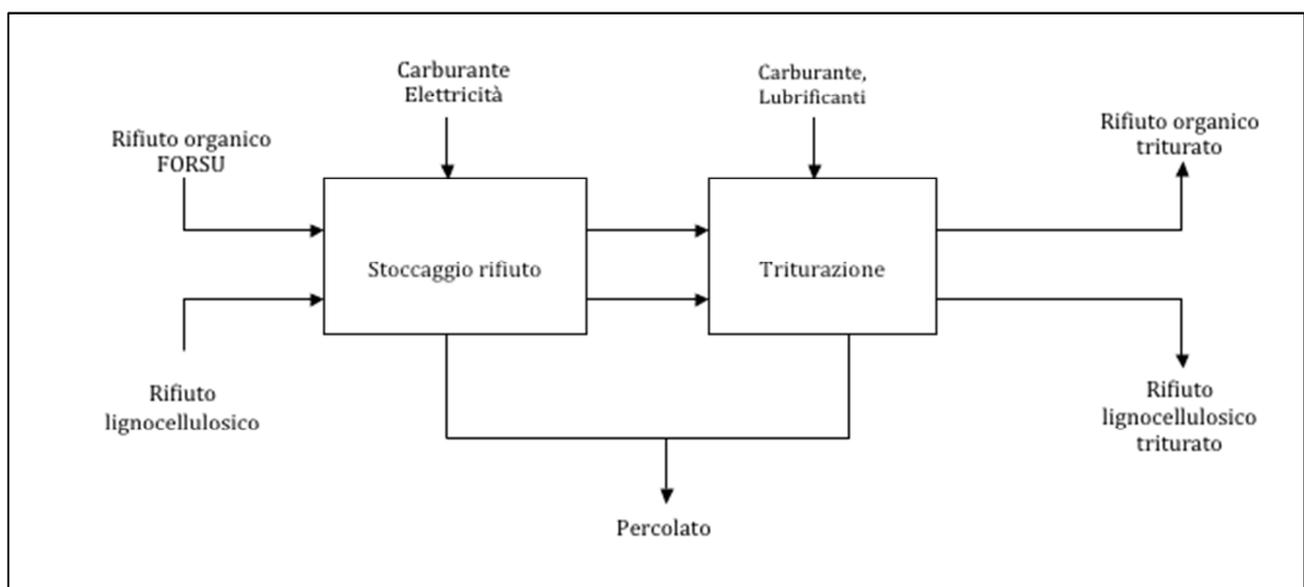


Figura 15 - Flussi di materia ed energia per la fase di stoccaggio e pretrattamento del rifiuto

Il processo di stoccaggio e pretrattamento del rifiuto, in figura 15, comprende il conferimento del rifiuto organico e lignocellulosico negli appositi box e la loro triturazione. Mentre il rifiuto organico

è stoccato all'interno di box chiusi mantenuti in depressione, il legno proveniente da sfalci, potature e manutenzione del verde viene posizionato all'aperto nel piazzale di conferimento.

Pertanto, in fase di modellazione, occorre considerare due input di materia, il rifiuto lignocellulosico e il rifiuto organico.

Facendo una ricerca nel database di riferimento EcoInvent, presente nel software SimaPro, è stato scelto per il trattamento del rifiuto organico il processo "*biowaste, at collection point/CH*", il quale comprende anche l'impatto associato alla raccolta del rifiuto, considerato nella seconda fase dello studio.

All'interno del processo sono stati inseriti anche i dati relativi al consumo di energia (*Electricity, low voltage, production IT, at grid/IT U*) per il funzionamento degli estrattori, che permettono di mantenere in depressione i box di stoccaggio rifiuti ed evitare la dispersione di sostanze maleodoranti. Tali consumi sono presenti a partire dal 2009, in quanto nella precedente configurazione lo scarico dei rifiuti avveniva in un capannone aperto, con conseguenti problemi di odore.

Per ciascun anno sono stati inseriti i consumi di carburante per la movimentazione delle pale gommate (*diesel at regional storage/RER U*), la triturazione del rifiuto organico (*diesel burned in chopper/RER U*) e i relativi lubrificanti (*lubricating oil, at plant/RER U*).

Infine, la quota di percolato prodotto nella fase di stoccaggio smaltito in impianti di depurazione esterni è stato espresso come flusso in uscita di COD ed azoto ammoniacale, i principali inquinanti presenti. Per tali flussi in uscita, occorre considerare anche il trasporto fino all'impianto di smaltimento (*operation, lorry 20-28 t, fleet average/CH U*, dal database di EcoInvent).

Per quanto riguarda il secondo input, il rifiuto lignocellulosico, è stato creato un processo specifico "rifiuto lignocellulosico, impatto trattamento" che comprende la risorsa, "*wood and wood waste, 9,5 MJ/kg*" (dal database Ecoinvent), il consumo di carburante per la sua triturazione, la movimentazione con pala gommata e i lubrificanti utilizzati.

Non è presente il consumo di energia elettrica associabile a questo processo, poiché il rifiuto lignocellulosico viene stoccato in un piazzale esterno e non sono presenti aspiratori.

### 9.1.2 Fermentazione anaerobica

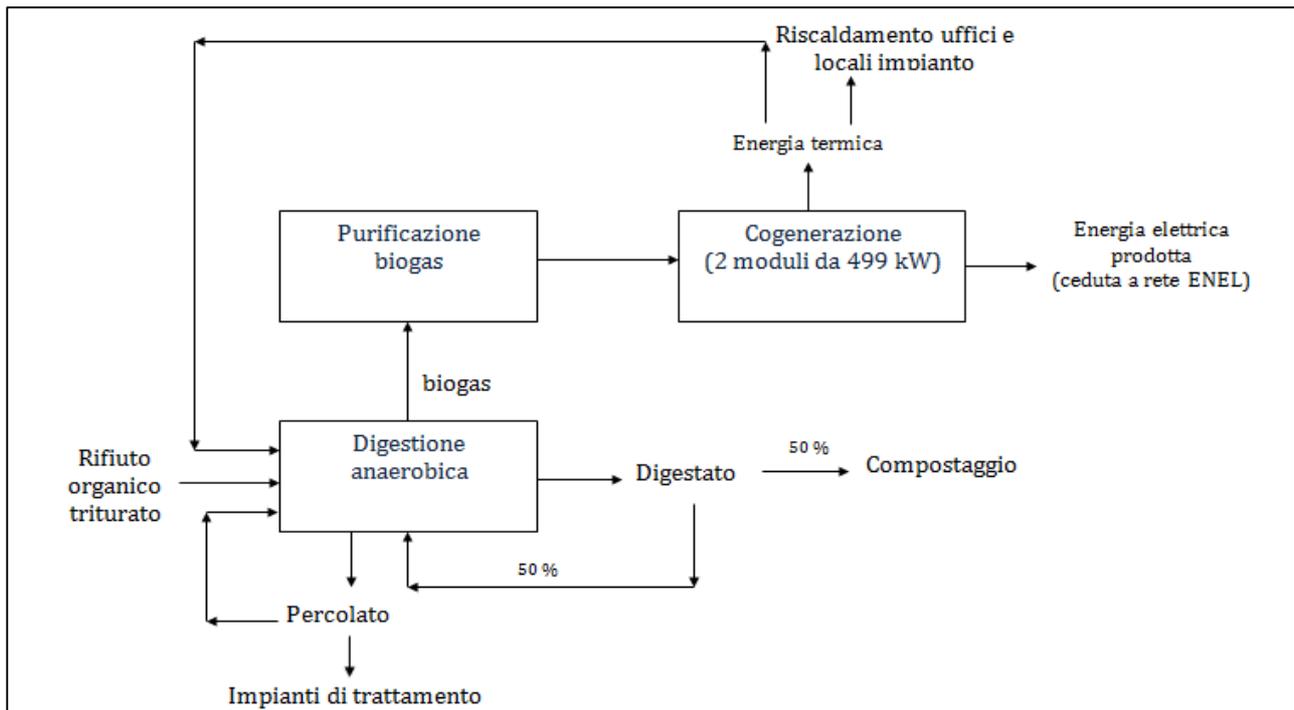


Figura 16 – Flussi di materia ed energia processo di fermentazione anaerobica

Il processo di fermentazione anaerobica è presente solo nell'analisi di inventario del nuovo impianto (anni 2009-2013). In questa fase occorre considerare l'impatto evitato, associato alla produzione di energia elettrica e termica prodotta dalla combustione del biogas nei due moduli di cogenerazione da 499kW. I processi scelti nel database Ecoinvent sono rispettivamente *“Electricity, low voltage, production IT, at grid/IT U”* e *“Heat, unspecific, in chemical plant/RER U”*. L'energia elettrica rinnovabile è stata ricavata dai dati del contatore ENEL, mentre l'energia termica prodotta è stata stimata in base all'efficienza del motore e alle caratteristiche del biogas, poiché non è presente alcun contatore. Attualmente, solo il 20% del calore prodotto può essere recuperato per il riscaldamento dei fermentatori e gli uffici, il restante 80% viene dissipato in aria.

Inoltre, occorre considerare anche per questo processo gli impatti associati al consumo di carburante per la movimentazione delle pale e l'utilizzo di lubrificanti.

L'energia elettrica consumata dall'impianto di fermentazione (pompe, compressori e altri componenti accessori) è stata determinata mediante lettura del contatore a servizio di questa specifica utenza, utilizzando sempre il processo *“Electricity, low voltage, production IT, at grid/IT U”*.

L'impatto associato all'infrastruttura dell'impianto di digestione anaerobica è stato scelto dal database Ecoinvent, *“Anaerobic digestion plant, biowaste/CH U”*.

Per quanto riguarda la fase di trattamento del biogas, è necessario l'olio minerale utilizzato nei cogeneratori e le emissioni prodotte dalla combustione. Quest'ultime sono state inserite all'interno del processo presente nel database di SimaPro denominato "Cogen unit 500 kWe, common component for heat+electricity/RER/U" e modificate con i dati specifici dell'impianto oggetto di studio.

I flussi di rifiuti in uscita da questa fase, sono principalmente l'olio minerale esausto e il percolato prodotto dall'impianto, anch'esso espresso come COD (*Chemical Oxygen Demand*) ed azoto ammoniacale.

### 9.1.3 Compostaggio e Vagliatura

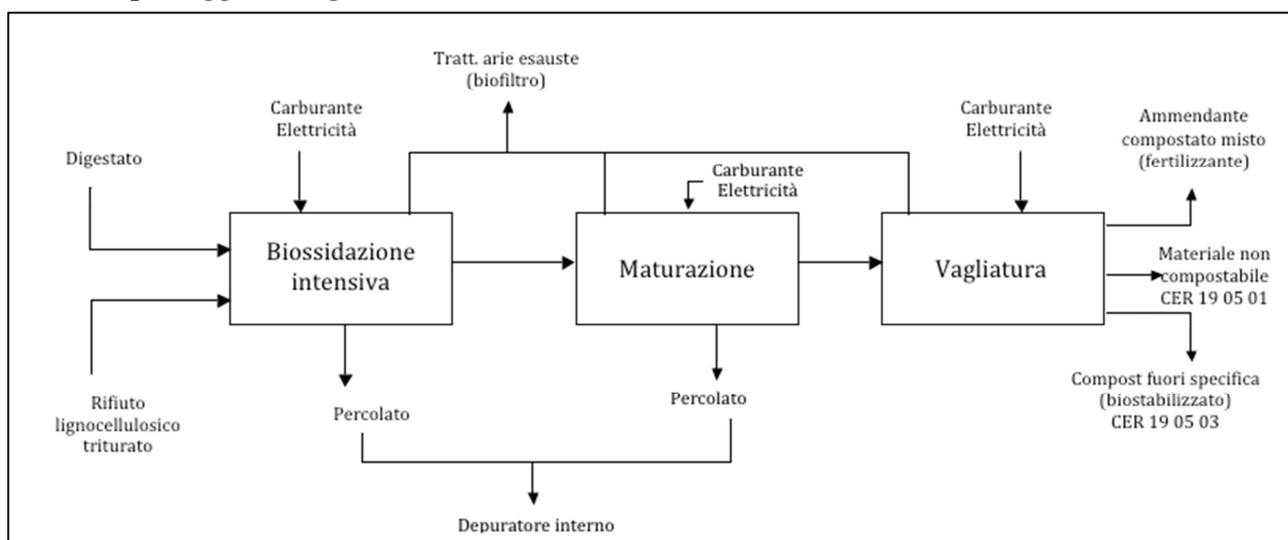


Figura 17 - Flussi di materia ed energia per la fase di compostaggio (anni 2012-2013)

Lo schema di flusso di fig.17, rappresenta il processo di compostaggio nella nuova configurazione. Il vecchio impianto era costituito solo dall'attuale capannone di maturazione, all'interno del quale aveva luogo l'intero processo di ossidazione biologica (fig.1).

In questa fase occorre considerare l'impatto delle infrastrutture per la costruzione del capannone (*compost plant, open/CH/I U*), i consumi di energia elettrica per il funzionamento dei ventilatori nel capannone di biossidaazione (quando presente) e maturazione, utilizzando il processo presente nel database di riferimento Ecoinvent "Electricity, low voltage, production IT, at grid/IT U" e il carburante per la movimentazione delle pale e il funzionamento dei vagli (*diesel, at regionale storage/RER U*). Nel 2010 è stato acquistato un vaglio stellare per la linea di vagliatura, pertanto è necessario includere i consumi elettrici associati al suo funzionamento.

Il materiale al termine della fase di compostaggio viene vagliato producendo tre frazioni con granulometria differente, considerati come flussi di output:

- *ammendante compostato misto* ( $d_p < 8$  mm);
- *compost fuori specifica*, chiamato anche biostabilizzato ( $8 \text{ mm} < d_p < 28$  mm);
- *materiale non compostabile*, sovrvallo ( $d_p > 28$  mm).

La frazione più fine, il compost, è un ammendante che può sostituire i convenzionali fertilizzanti azotati utilizzati in agricoltura a pieno campo o per parchi e giardini. Si è quindi valutato come l’impatto evitato per la produzione di un fertilizzante chimico presente nel database Ecoinvent, “Urea, as N, at regional storehouse/RER U”. L’urea considerata nel processo ha un titolo di azoto del 46%, mentre il compost prodotto dall’impianto ha un contenuto di azoto dell’1%, con una conversione è stato quindi possibile determinare la quantità evitata.

Il biostabilizzato (fig.18) è un rifiuto speciale non pericoloso (CER 19 05 03) costituito da residui grossolani di compost, plastica, vetro e altri inerti, che può essere utilizzato come materiale d’ingegneria per la copertura giornaliera o finale dei rifiuti in discarica, al posto del terreno (Delibera Regionale N.ro 2006/1996). Sebbene tale rifiuto sia destinato a recupero, sono stati considerati gli impatti associati alla frazione di vetro, plastica e inerte presente al suo interno. La frazione organica, non è stata considerata, poiché è equivalente al terreno già utilizzato come copertura.

<b>Frazioni merceologiche</b>	<b>u.d.m</b>	<b>Valori</b>
Vetro	% ss	4.3
Plastica	% ss	1.1
Inerti	% ss	9.8
Umidità	%	27.7

Tabella 16 - Composizione merceologica biostabilizzato



Figura 18 - Biostabilizzato CER 19 05 03

I processi individuati nel database di EcoInvent sono i seguenti:

- frazione vetro: “*Disposal, glass, 0 % water, to inert material landfill/CH U*”;
- frazione plastica: “*Disposal, plastic mixture, 15.3 % water, to sanitary landfill/CH U*”;
- frazione inerti, costituiti principalmente da legno: “*Disposal, wood untreated, 20% water, to sanitary landfill/ CH U*”;

Inoltre, è stato valutato l’impatto associato al trasporto del biostabilizzato fino alla discarica; dai dati di Tab.1 è possibile notare un notevole aumento della distanza, 0.29 km/t nel 2008 a 3.64 km/t nel 2013. Nel 2012, infatti, la discarica limitrofa è stata chiusa e tale rifiuto è stato conferito alla discarica di Ravenna, di Voltana o di Finale Emilia in base all’esigenza degli impianti, comportando un aumento dei costi di trasporto e degli impatti che ne conseguono.

La fase di modellazione per il sovrvallo, materiale non compostabile (CER 19 05 01), costituito principalmente da plastica e legno, è analoga a quella del biostabilizzato. Nel 2013, l’85% del rifiuto è stato smaltito in discarica, mentre il restante 15% è stato conferito all’inceneritore di Coriano e all’impianto CDR (combustibile da rifiuto) di Ravenna.



Figura 19 - Frazioni merceologiche sovrvallo: sovrvallo tal quale, frazione legnosa, frazione plastica

Considerando la sua composizione merceologica (55% rifiuto legnoso e 45% rifiuti plastici) per lo smaltimento in discarica sono stati creati 2 flussi di rifiuto, utilizzando processi già presenti in Ecoinvent:

- flusso di rifiuto costituito da legno destinato in discarica: “*Disposal, wood untreated, 20% water, to sanitary landfill/CH U*”;
- flusso di rifiuto costituito da plastiche destinato alla discarica: “*Disposal, plastic, mixture, 15.3% water, to sanitary landfill/CH U*”.

Negli anni 2007-2010, il sovrvallo era costituito esclusivamente da plastiche, pertanto si è considerato solo il flusso di rifiuti plastici destinati alla discarica limitrofa. Per lo stesso motivo del biostabilizzato, anche per il sovrvallo si nota un notevole aumento delle distanze, da 0.25 km/t nel 2008 al 3.15 km/t nel 2013 (tab.1). Negli anni 2007-2008, infatti, il sovrvallo poteva essere conferito

alla discarica limitrofa, ma a seguito di alcune modifiche autorizzative, il rifiuto è stato destinato all'inceneritore di Coriano (RN) o alla discarica di Ravenna e Voltana.

Gli impatti del sovrappeso destinato ad incenerimento sono rappresentati dal processo “*Disposal, municipal solid waste, 22,9% water, to municipal incineration/CH*”, modificato con i dati relativi al caso studio inceneritore di Rimini (*Environmental impact assessment of a WTE plant after structural upgrade measures*, Passarini et al, 2013). Lo studio LCA condotto sull'inceneritore di Coriano (RN) si compone di sei differenti scenari, 1996,2003,2008,2009,2010,2011, anni significativi per l'evoluzione strutturale ed impiantistica dello stesso.

I confini del sistema si estendono dall'arrivo del rifiuto solido urbano all'impianto WTE (*Waste to energy*) fino al rilascio delle emissioni solide, liquide e gassose nell'ambiente. All'interno del processo sono inclusi: la produzione e lo smaltimento di materiali ausiliari, il trasporto e lo smaltimento finale di rifiuti prodotti dall'incenerimento e il recupero energetico. L'unità funzionale è 1 t di rifiuto solido urbano.

Per la modellazione dello smaltimento del CER 19 05 01 (materiale non compostabile) è stato utilizzato solo il processo relativo all'anno 2011, poiché rappresenta lo scenario attuale dell'impianto. Il percolato proveniente dalla fase di biossificazione e maturazione nel 2012-2013, non è stato considerato come flusso in output, poiché è trattato nel depuratore interno mentre nel 2007-2008 è presente il flusso in uscita in termini di COD e azoto ammoniacale.

#### 9.1.4 *Trattamento arie di processo*

Il trattamento delle arie di processo non ha subito modifiche durante l'ampliamento e quindi presenta gli stessi impatti per tutti gli scenari considerati (2007-2013).

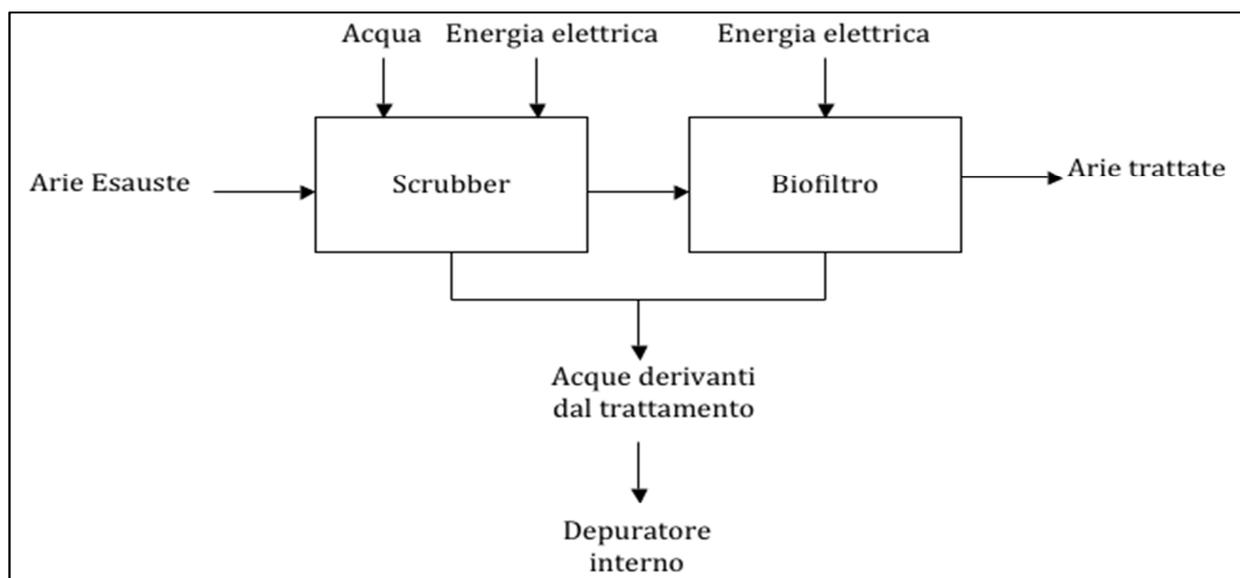


Figura 20 – Schema flussi di materia ed energia per la fase di trattamento arie esauste, anni 2010-2013

I principali flussi di materia in ingresso sono l'acqua utilizzata nello scrubber per umidificare l'aria in ingresso al biofiltro (è stata scelta la risorsa “*water, cooling, drinking*”) e l'energia elettrica consumata dalle pompe di ricircolo dell'acqua e dall'aspiratore con una portata di 60000 m<sup>3</sup>/h, che convoglia l'aria esausta al letto biofiltrante (*Electricity, low voltage, production IT, at grid/IT U*). Inoltre, occorre inserire come flusso di input il materiale filtrante (*wood chips, softwood, u=140%, at forest/RER U*), utilizzato come corpo di riempimento e substrato per i microrganismi del biofiltro. Lo stesso cippato è presente anche come flusso di rifiuti in uscita dall'impianto, poiché è previsto il reintegro al bisogno e la sua completa sostituzione ogni tre anni (circa 600 m<sup>3</sup>). Poiché tutti i dati sono annuali, tale quantità è stata dilazionata nei tre anni, considerando circa 169 t/anno. Le acque reflue raccolte sono convogliate all'impianto di depurazione interno e non sono presenti come flussi in uscita. L'aria depurata, in uscita dal biofiltro ed emessa in atmosfera, deve rispettare il limite di 300 unità odorimetriche.

### 9.1.5 Trattamento percolati e acque reflue di processo

Il trattamento dei percolati è attivo a partire dal 2009, grazie alla costruzione di un depuratore biologico a servizio dell'impianto.

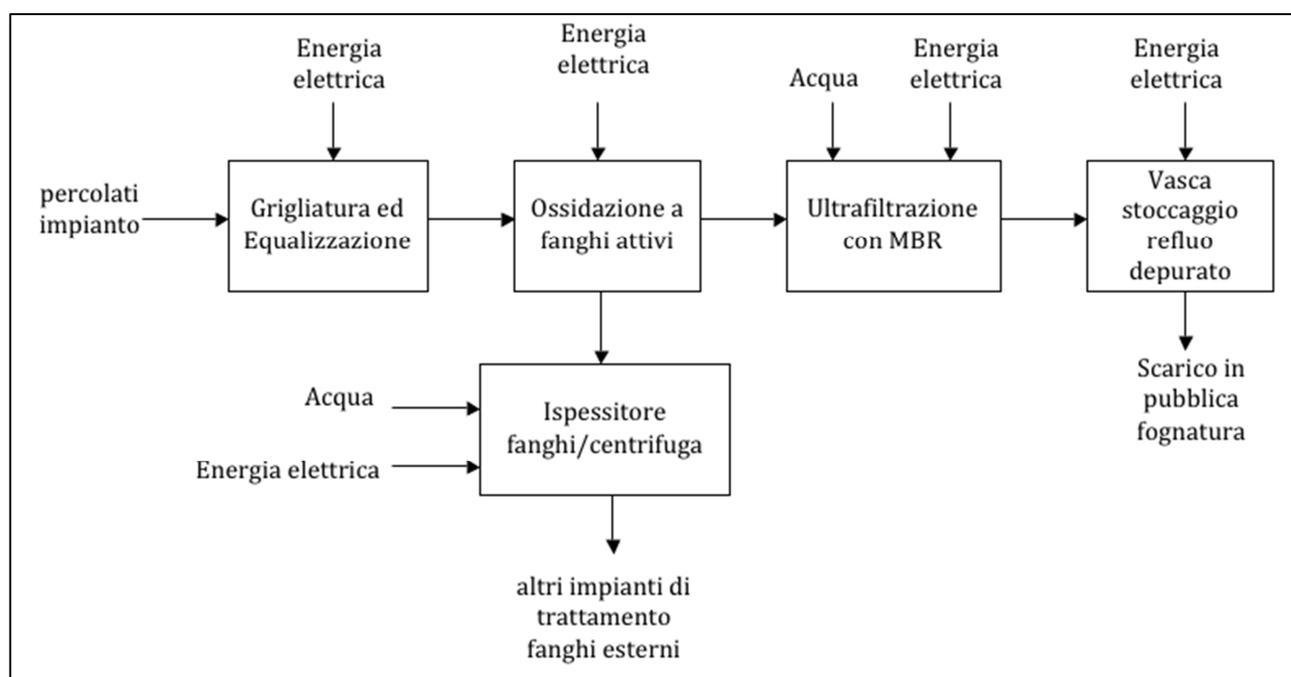


Figura 21 - Schema flussi di materia ed energia depuratore, anni 2012-2013

Il depuratore è costituito da due linee parallele in grado di trattare sia il percolato della discarica limitrofa che le acque reflue provenienti dall'impianto di compostaggio. Per valutare gli impatti associati solo a quest'ultimo, sono stati sottratti i consumi relativi al trattamento del percolato di discarica. In questa fase occorre considerare l'energia consumata per il funzionamento delle soffianti che permettono l'insufflazione di aria all'interno della vasca a fanghi attivi, delle pompe e di altri

componenti (*Electricity, low voltage, production IT, at grid/IT U*) e il consumo di acqua per il lavaggio delle membrane biologiche per l'ultrafiltrazione (*water, cooling, drinking*). I dati sono stati ottenuti dalle letture dei contatori installati a servizio dell'impianto di depurazione.

Inoltre, è necessario inserire l'impatto legato alla produzione dei reagenti utilizzati per la pulizia delle membrane (acido cloridrico, ipoclorito, acido citrico, antischiuma, etc) e l'impatto legato all'infrastruttura (*wastewater treatment plant, class 5/ CH/I U*). Infine, il refluo depurato scaricato in pubblica fognatura è stato considerato come flusso in output di COD e azoto ammoniacale (N-NH<sub>4</sub>). I fanghi, estratti dalle vasche di ossidazione, vengono centrifugati per ridurre il contenuto di umidità e destinati ad altri processi di smaltimento, per cui è stato considerato anche l'impatto del trasporto fino all'impianto di destinazione.

#### **9.1.6 Utilities**

In questo processo sono stati inseriti i consumi di energia elettrica e acqua potabile non associabili alle fasi dell'impianto, come gli uffici, gli spogliatoi, l'illuminazione generale ed altri componenti. Per gli anni 2007-2009 non è possibile valutare tali utenze, per via del numero ridotto di personale impiegato presso l'impianto e per il fatto che spogliatoi ed uffici erano in comune con i dipendenti della discarica limitrofa.

#### **9.1.7 Emissioni diffuse**

Le emissioni diffuse sono presenti sia nella fase di fermentazione anaerobica che in quella di compostaggio. Non essendo disponibili dati primari presso l'impianto, occorre avvalersi di dati secondari. Per quanto riguarda la fermentazione anaerobica, le emissioni fuggitive di metano sono difficili da determinare e spesso variano in base alla tecnologia e alla configurazione dell'impianto.

L' "Intergovernmental Panel on Climate Change" (IPPC) considera per il processo di fermentazione anaerobica un'emissione diffusa compresa tra 0-10% della produzione di metano, ma afferma anche che qualora le norme tecniche per impianti di biogas garantiscano la combustione di eventuali emissioni involontarie di CH<sub>4</sub>, tali perdite possano essere nulle. Altri studiosi, stimano perdite pari al 3% della produzione di metano (Møller et.al, 2009). Per la fase di modellazione è stato ritenuta valida una perdita di metano del 1% rispetto alla sua produzione totale, considerando che l'impianto è dotato di una torcia di emergenza.

Nel processo di compostaggio le emissioni dirette causate dalla degradazione e mineralizzazione della sostanza organica che possono contribuire all'effetto serra, sono costituite principalmente da CO<sub>2</sub> biogenica e in piccole parti da CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O. L'anidride carbonica, in genere non viene conteggiata come emissione, in quanto è considerata come parte integrante del ciclo naturale del carbonio. Il rilascio di CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O dipende dalla tecnologia, dal tipo di stoccaggio dei rifiuti e dalla

gestione del processo. La presenza di un biofiltro a valle del processo, come nell'impianto oggetto di studio, permette di rimuovere gli inquinanti presenti in tracce, con buone efficienze di abbattimento. In tabella 17 è riportata una panoramica delle emissioni dirette per il processo di compostaggio pubblicate nell'articolo "Composting and compost utilization: accounting of greenhouse gases and global warming contributions" (Boldrin et.al, 2009).

Per il processo di compostaggio tradizionale (anni 2007-2009), in base ai dati di tabella 17, sono state considerate le emissioni fuggitive di metano pari a 0.91 kg CH<sub>4</sub>/t ww, considerando la presenza del biofiltro a valle del processo.

Emissioni	Tecnologia impianto	Tipologia di rifiuto	Degradazione	Emissioni
CO <sub>2</sub>	aperto	biowaste	<b>50-60 % input di C org</b>	47-173 kg CO <sub>2</sub> /t ww
	<b>chiuso (in depressione)</b>			<b>250-390 kg CO<sub>2</sub>/t ww</b>
CH <sub>4</sub>	aperto	biowaste	0.8-2.5 % C degradato	0.03-1.5 kg CH <sub>4</sub> /t ww
	<b>chiuso (in depressione)</b>		<b>2.4-3 % C degradato</b>	<b>0.02-1.80 kg CH<sub>4</sub>/t ww</b>
N <sub>2</sub> O	aperto	biowaste	0.1-0.7 % input di N	7.5 - 252 kg N <sub>2</sub> O/t ww
	<b>chiuso (in depressione)</b>		<b>1.8 % input di N</b>	<b>10-120 kg N<sub>2</sub>O/t ww</b>

Tabella 17 - Emissioni gassose durante il processo di compostaggio di rifiuto organico ( Boldrin et.al,2009)

## 9.2 Seconda fase LCA: Estensione dei confini del sistema al trasporto dei rifiuti organici.

Dopo aver valutato i dati strettamente correlati al processo, si è ritenuto opportuno estendere i confini del sistema fino al trasporto del rifiuto organico, dal luogo di raccolta all'impianto Romagna Compost. I dati relativi al trasporto sono stati inseriti nel processo "biowaste, at collection point /CH U", come tonnellate\*chilometro, tkm, moltiplicando le tonnellate di rifiuto trasportato per la distanza in km di ciascun produttore. In tabella 18 e nel grafico 2, è possibile notare il notevole aumento negli anni di questo valore, dovuto principalmente al conferimento di rifiuto proveniente da altre regioni, per sfruttare e pieno la capacità produttiva dell'impianto di Romagna Compost (40000 t/anno).

Anno	Potenzialità impianto	Quota rifiuto proveniente da fuori regione	Trasporto rifiuto organico
2007-2009	15000 t/anno	0 %	40 tkm/t
2010	30000 t/anno	18 %	79 tkm/t
2011	40000 t/anno	17 %	63 tkm/t
2012	40000 t/anno	20 %	72 tkm/t
2013	40000 t/anno	29 %	109 tkm/t

Tabella 18 - Flussi di rifiuto provenienti da fuori regione e distanze di trasporto

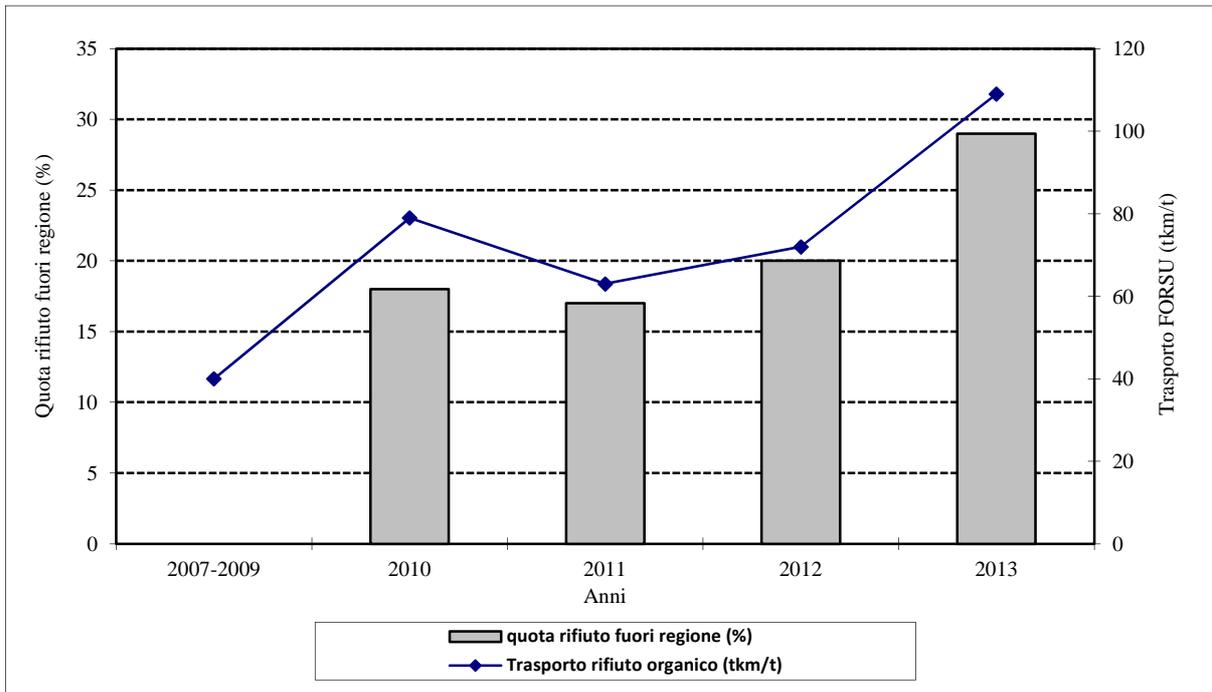
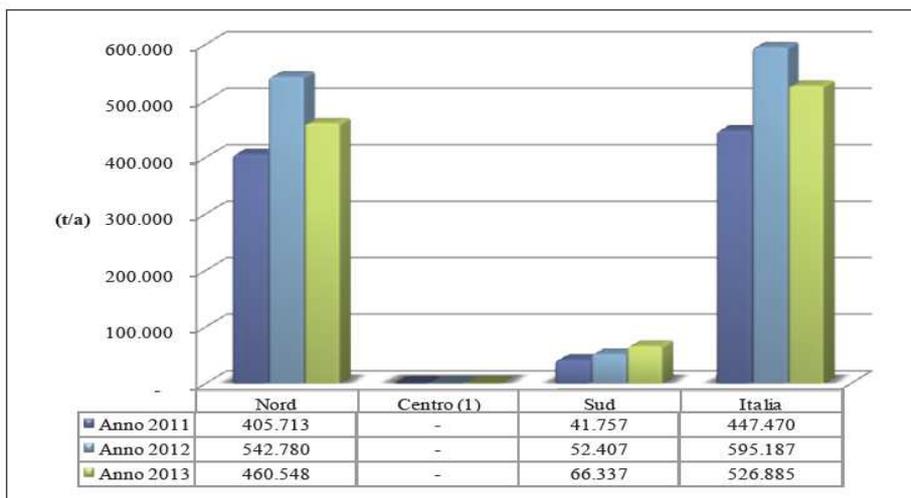


Grafico 2 - Correlazione tra la quota di rifiuto proveniente da fuori regione e il trasporto della FORSU

La quota di rifiuto proveniente da fuori regione, specialmente da Marche, Abruzzo e Campania, può variare di anno in anno, non dipende quindi dal processo, ma da fattori logistici ed economici.

Il rapporto sui rifiuti urbani (ISPRA, 2014) sottolinea la mancanza di impianti di digestione anaerobica nel centro Italia; infatti nell'anno 2013, su un totale di 50 impianti censiti, l'86% è localizzato nelle regioni del nord, il 2.3 % nel Centro e l'11.6 % al sud (fig.9).



Note: (1) L'unico impianto operativo in tale area del Paese è funzionale alla fase di compostaggio aerobico; pertanto, i quantitativi trattati non figurano nel presente grafico.

Figura 22 - Digestione anaerobica della frazione organica da raccolta differenziata, per macroarea geografica, anni 2011-2013 (Rapporto rifiuti urbani, ISPRA 2014)

Nelle regioni del Centro, in molti casi, la discarica rappresenta ancora la forma di gestione prevalente, nonostante il d.lgs. n. 36/2003 preveda specifici obiettivi di riduzione progressiva dei rifiuti urbani biodegradabili gestiti in discarica.

### **9.3 Terza Fase LCA: Estensione dei confini del sistema alla gestione dei rifiuti organici in Italia.**

Nell'ultima fase dello studio è stato ampliato ulteriormente il confine del sistema, considerando l'impatto evitato derivante dai rifiuti fuori regione trattati presso l'impianto Romagna Compost, che altrimenti sarebbero stati smaltiti nelle discariche per mancanza di impianti di recupero adeguati nelle regioni di produzione. A tal riguardo, l'art. 182 del d.lgs. n. 152/2006 stabilisce il principio di autosufficienza per lo smaltimento dei rifiuti urbani non pericolosi e per i rifiuti derivanti dal loro trattamento a livello di ambito territoriale ottimale, ad esclusione delle frazioni destinate al recupero per le quali è sempre permessa la libera circolazione sul territorio nazionale al fine di favorire quanto più possibile il loro recupero, privilegiando il concetto di prossimità di tali impianti.

Pertanto, al fine del D.lgs 36/2003 e del D.lgs 152/2006, è stato opportuno effettuare l'analisi per capire se l'evitato ricorso alla discarica giustificava il trasporto dei rifiuti organici per il loro recupero nel Nord Italia.

Il processo scelto per valutare l'impatto evitato per lo smaltimento in discarica è "*Disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to sanitary landfill/CH U*", dal database di riferimento Ecoinvent. Il trasporto dei rifiuti organici è stato stimato considerando una distanza media dal luogo di raccolta alla discarica comunale di 20 tkm/t, utilizzando il processo "*Operation, lorry 20-28 t, fleet average/CH U*" del database Ecoinvent.

## 10. QUALITÀ DEI DATI

È stata eseguita un'analisi della qualità dei dati per il modello LCA creato, basandosi sulla matrice dei valori (*pedrigree matrix*) sviluppata da Weidema (Weidema & Wesnaes, 1996), con la quale è possibile stimare la deviazione standard. Ogni dato del modello viene valutato rispetto a sei criteri: metodo di acquisizione, indipendenza delle fonti dei dati, rappresentatività, correlazione temporale, correlazione geografica, correlazione tecnologica. Per ciascuno di essi può essere attribuito un punteggio da 1 (qualità migliore) a 5 (situazione peggiore).

Criteri	Punteggio indicatore				
	1	2	3	4	5
<b>Metodo di acquisizione</b>	Dati misurati	Dati calcolati da misurazioni	Dati calcolati da approssimazioni	Dati stimati da esperti del settore	Dati approssimati non qualificati
<b>Indipendenza delle fonti dei dati</b>	Dati certi, fonti pubbliche e/o indipendenti	Dati acquisiti direttamente in impianto	Fonti indipendenti, ma basati su dati dell'impianto non verificati	Dati di impianti simili non verificati	Dati dell'impianto non verificati
<b>Rappresentatività</b>	Dati rappresentativi da un numero adeguato di campioni, ottenuti in un lungo periodo	Dati rappresentativi da un numero minore di campioni, ottenuti in un lungo periodo	Dati rappresentativi da un numero adeguato di campioni, ottenuti in un breve periodo	Dati da un numero adeguato di campioni, ottenuti in un breve periodo	Rappresentatività sconosciuta o incompleta di dati ottenuti in un breve periodo
<b>Correlazione temporale</b>	Meno di 3 anni	Meno di 5 anni	Meno di 10 anni	Meno di 20 anni	Più di 20 anni, o di età sconosciuta
<b>Correlazione geografica</b>	Dati provenienti dall'area di studio	Media di dati da aree diverse, compresa l'area di studio	Dati da aree con produzioni simili a quella di interesse (esclusa)	Dati da aree con produzioni approssimabili a quella di interesse	Dati da aree sconosciute o con produzioni diverse da quella di studio
<b>Correlazione tecnologica</b>	Dati da impianti, processi e materiali sotto studio	Dati da processi e materiali in esame, ma da impianti simili	Dati da processi e materiali in esame, ma da impianti diversi	Dati da processi e/o materiali simili ma di uguale tecnologia	Dati da processi e/o materiali simili, ma di tecnologia diversa

Tabella 19 - Quality pedigree matrix adattata da Weidema & Wesnaes, 1996

Per il calcolo della matrice Weidema sono stati presi in considerazione due scenari, anno 2007 e anno 2013, i quali rappresentano le due diverse configurazioni: il compostaggio tradizionale e il sistema integrato anaerobico-aerobico a seguito dell'ampliamento dell'impianto. In tabella 20 si riportano gli indicatori di punteggio per i dati presi in considerazione.

<b>Scenario Anno 2007</b>	Metodo di acquisizione	Indipendenza delle fonti dei dati	Rappresentatività	Correlazione temporale	Correlazione geografica	Correlazione tecnologica
Flusso di rifiuti in input	1	2	1	1	1	1
Input di materie prime	2	2	1	1	1	1
Trasporto	2	2	1	1	1	1
Emissioni in acqua	3	2	1	1	1	1
Emissioni diffuse in aria	4	1	1	1	5	4
Flussi di rifiuti in output	1	2	1	1	1	1
Consumi di energia	2	2	1	1	1	1
Recuperi di materia	1	2	1	1	1	1

<b>Scenario Anno 2013</b>	Metodo di acquisizione	Indipendenza delle fonti dei dati	Rappresentatività	Correlazione temporale	Correlazione geografica	Correlazione tecnologica
Flusso di rifiuti in input	1	2	1	1	1	1
Input di materie prime	2	2	1	1	1	1
Trasporto	2	2	1	1	1	1
Emissioni in acqua	2	2	1	1	1	1
Emissioni in aria	3	2	1	1	1	1
Emissioni diffuse in aria	4	1	1	2	5	4
Flussi di rifiuti in output	1	2	1	1	1	1
Consumi di energia	1	2	1	1	1	1
Recuperi di materia	1	2	1	1	1	1
Recupero di energia elettrica	1	2	1	1	1	1
Recuperi di energia termica	2	2	1	1	1	1
Calore dissipato	2	2	1	1	1	1

Tabella 20 – Indicatori di punteggio della matrice Weidema per gli scenari 2007 e 2013

Come già anticipato nel capitolo 5, relativo alla descrizione della metodologia LCA, in questa fase vengono elaborati i dati raccolti nell'analisi di inventario, per comprendere l'entità dei carichi ambientali associati ai flussi in ingresso e in uscita dal sistema studiato, e quali categorie di impatto sono interessate maggiormente.

## 11. VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI

### 11.1 Categorie e metodo di valutazione degli impatti

Il metodo utilizzato è il Recipe 2014, aggiornato all'anno 2014, in grado di analizzare i carichi ambientali associabili ad ogni scenario e classificarli in opportune categorie di danno. In particolare, sono state considerate solo sette delle diciotto categorie di danno a livello di *midpoint*, in quanto ritenute le più significative per le finalità dello studio. Di seguito saranno presentate nel dettaglio le categorie scelte, soffermandosi sui fattori di caratterizzazione e sugli aspetti che incidono nella quantificazione degli impatti.

- *Cambiamento climatico (Climate Change)*. Tale categoria provoca una serie di meccanismi ambientali che interessano sia la salute umana (*Climate Change Human Health*) sia l'ecosistema

(*Climate Change Ecosystems*). Il metodo Recipe 2014 (versione 1.11) valuta l'effetto causato dall'emissione di una certa quantità di CO<sub>2</sub> e altri gas serra (espressi come quantitativo di CO<sub>2</sub> equivalente), calcolato utilizzando il *Global Warming Potentials* (GWP). Il GWP è impiegato come fattore di caratterizzazione, in quanto valuta il potenziale contributo all'effetto serra di ogni emissione gassosa rispetto ad un composto di riferimento, la CO<sub>2</sub>, con fattore GWP unitario. Gli effetti del cambiamento climatico sulla salute umana possono essere diretti, come sbalzi di temperatura, inquinamento atmosferico, allergeni, o indiretti, cioè che agiscono sulla proliferazione di malattie infettive, malnutrizione e sconvolgimenti sociali ed economici. Il fattore utilizzato è il DALY's (*Disability-Adjusted Life Years*), che, come descritto nel paragrafo 5.3.3, indica la somma degli anni di vita persi (per malattia) e di quelli vissuti in condizioni di disabilità.

Dal punto di vista del danno all'ecosistema, ci sono diversi "percorsi" che collegano i cambiamenti climatici alla perdita di una specie, come l'impatto di condizioni meteorologiche estreme, cambiamenti negli oceani e nei mari, le inondazioni costiere. Pertanto, il fattore di caratterizzazione è espresso in termini di numero di specie scomparse per anno a seguito di un'emissione nell'ambiente (species.yr/ kg CO<sub>2</sub>)

- *Consumo di combustibili fossili (Fossil depletion)*. Questa categoria si riferisce al consumo di risorse che contengono idrocarburi, sia prodotti volatili come il metano e il petrolio liquido, sia non volatili come il carbone. Il danno per questa categoria viene definito come aumento del prezzo delle risorse, causato da una diminuzione della sua disponibilità. Il fattore di caratterizzazione è il *Fossil Depletion Potential* (MDP), espresso sotto forma di kg di petrolio equivalente per kg (o m<sup>3</sup>) di sostanza consumata.

- *Formazione di materiale particolato (Particulate matter formation)*. Il particolato può essere prodotto da fonti naturali o antropiche. Nell'analisi oggetto di studio, si considera solo il danno associato al particolato di origine antropica, in quanto generato da un processo industriale, come i processi di combustione che avvengono all'interno del sistema considerato. Un'ulteriore classificazione può essere fatta in base alle sue dimensioni in grossolano e fine.

Il particolato con dimensioni uguali o inferiori ai 10µm (PM<sub>10</sub>) appartiene alla prima categoria; esso è costituito da un complesso insieme di sostanze organiche ed inorganiche che raggiungono le parti alte del sistema respiratorio ed i polmoni causando problemi alla salute (difficoltà respiratorie, problemi cardiovascolari e mortalità). La seconda categoria comprende il particolato fine, con dimensioni granulometriche uguali o inferiori ai 2.5µm (PM<sub>2.5</sub>), maggiormente dannoso per la salute umana poiché è in grado di penetrare profondamente nei polmoni. Il fattore di caratterizzazione utilizzato per valutare gli impatti ascrivibili a questa categoria è rappresentato dai kg di PM<sub>10</sub> equivalenti, emessi in una determinata area in un anno.

- *Tossicità umana (Human Toxicity)*. Il fattore di caratterizzazione per la tossicità umana valuta la persistenza ambientale (destino), l'accumulazione nel cibo (esposizione) e la tossicità (effetto) di un prodotto chimico rilasciato in ambiente. Il destino e il fattore di esposizione possono essere calcolati mediante modelli multimediali valutativi, mentre gli effetti sulla salute possono essere determinati sulla base dei dati di tossicità presenti per esseri umani e animali. Il fattore di caratterizzazione è il potenziale di tossicità umana ed è espresso in  $\text{kg}_{\text{eq}}$  di 1,4-diclorobenzene in aria nell'ambiente urbano.

- *Ecotossicità delle acque dolci (Freshwater EcoToxicity)*. Il danno associato alla qualità degli ecosistemi è espresso come la percentuale di specie che si stima siano scomparse da una certa area a causa delle mutate condizioni ambientali per la presenza di prodotti chimici rilasciati nell'ambiente. Il fattore di caratterizzazione per questa categoria è il potenziale di ecotossicità espresso in  $\text{kg}_{\text{eq}}$  di 1,4-diclorobenzene in acqua dolce.

- *Trasformazione del territorio naturale (Natural Land Transformation)*. Gli impatti relativi a questa categoria, che prevede la trasformazione del territorio, si riflettono maggiormente in danni agli ecosistemi. L'indicatore per esprimere la trasformazione del territorio è espresso in  $\text{m}^2$  di terreno. Il fattore di caratterizzazione descrive la combinazione di due processi: conversione e ripristino. Il primo termine descrive la trasformazione attiva del territorio, da uno stato all'altro (es. il disboscamento di una foresta per la produzione di legno) in un certo periodo di tempo, di solito più breve rispetto al tempo necessario per il ripristino dello stesso. Il ripristino, invece, può essere un processo del tutto naturale o in parte assistito mediante azioni in grado di accelerare il ripristino naturale del territorio precedentemente trasformato. Il danno derivante dalla conversione dell'area è determinato dalla differente ricchezza di specie presenti prima e dopo la trasformazione e dal tempo necessario al ripristino. Il fattore di caratterizzazione è espresso in  $\text{m}^2$  di terreno naturale.

Come già descritto nel paragrafo 5.3.4, per garantire una maggiore oggettività agli studi che si basano sulla metodologia LCA, è stato applicato il concetto di *Cultural Theory* (Thompson, 1990) nella valutazione del danno a livello di *endpoint*. Nell'analisi oggetto di studio si è scelto di utilizzare la prospettiva culturale *Hierarchist* (H), gerarchica, poiché rappresenta una visione intermedia tra l'individualista o *Individualist* (persona libera da ogni legame, soggetto a negoziazione, con visione del tutto provvisoria) e l'ugualitaria o *Egalitarian* (individuo con forte attaccamento al gruppo ma non alle sue imposizioni, pertanto provoca ambiguità nelle relazioni all'interno del gruppo scatenando conflitti).

## 11.2 Valutazione del danno

Nel presente paragrafo sono raccolti i principali risultati ottenuti dalla valutazione del danno, sotto forma di grafici e tabelle.

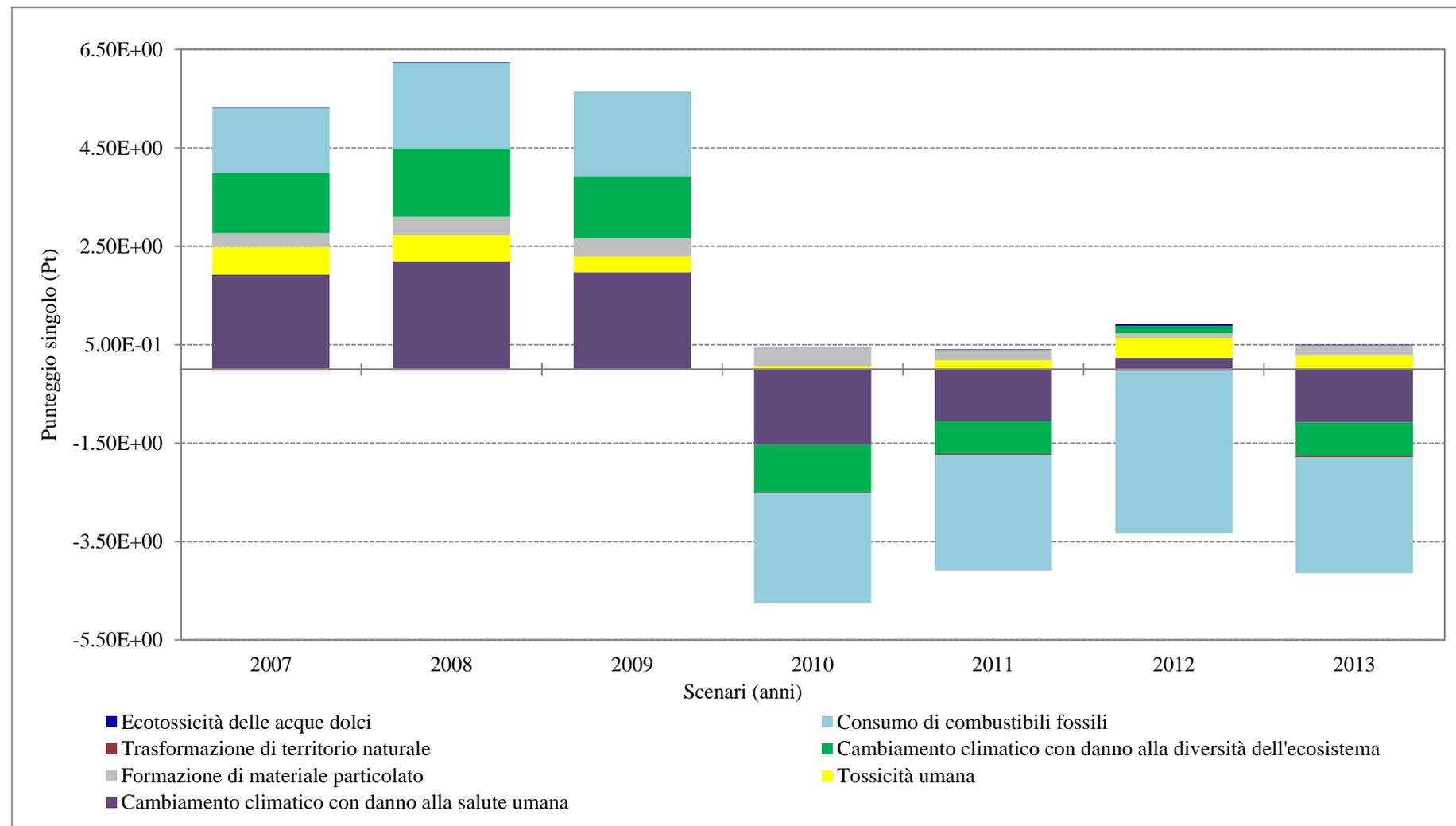


Figura 23 - Punteggio singolo: impatto del solo processo per gli scenari 2007-2013, categorie di impatto midpoint

Categoria d'impatto	Unità	Anno						
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Cambiamento climatico con danno alla salute umana	Pt	1.93E+00	2.20E+00	1.98E+00	-1.53E+00	-1.05E+00	2.41E-01	-1.07E+00
Cambiamento climatico con danno all'ecosistema	Pt	1.22E+00	1.39E+00	1.25E+00	-9.71E-01	-6.65E-01	1.52E-01	-6.81E-01
Tossicità umana	Pt	5.61E-01	5.36E-01	3.23E-01	6.83E-02	1.86E-01	3.99E-01	2.83E-01
Formazione di materiale particolato	Pt	2.85E-01	3.70E-01	3.64E-01	3.86E-01	2.10E-01	9.22E-02	2.06E-01
Consumo di combustibili fossili	Pt	1.32E+00	1.75E+00	1.71E+00	-2.25E+00	-2.35E+00	-3.31E+00	-2.36E+00
Trasformazione di territorio naturale	Pt	-2.25E-02	-2.01E-02	-1.09E-02	-1.17E-02	-2.28E-02	-2.50E-02	-3.31E-02
Ecotossicità delle acqua dolci	Pt	1.11E-02	1.03E-02	5.79E-03	5.34E-03	1.11E-02	3.18E-02	1.20E-02

Tabella 21 - Punteggio singolo: impatto del processo per gli scenari 2007-2013, categorie di impatto midpoint

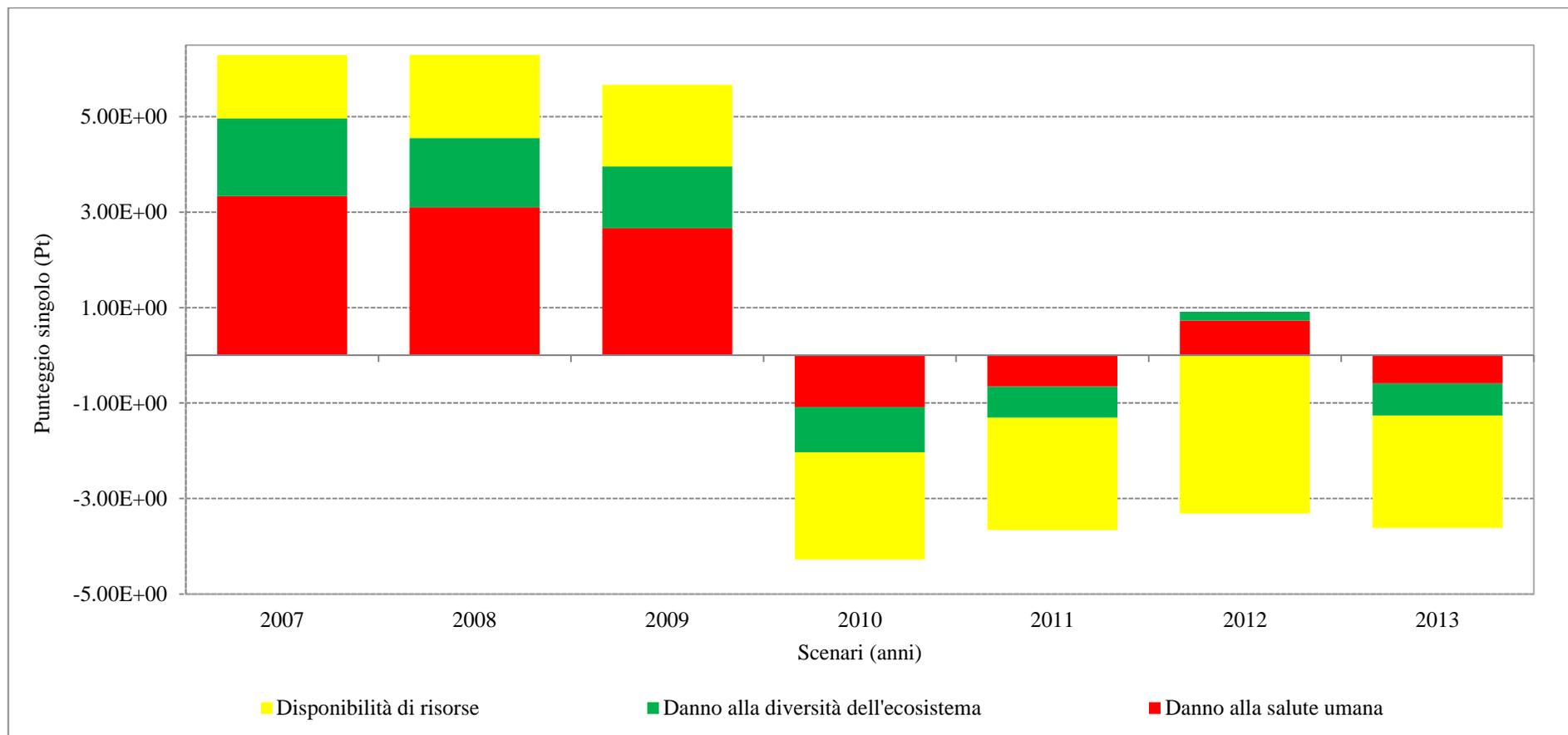


Figura 24 - Punteggio singolo: impatto del processo per gli scenari 2007-2013, categorie di impatto endpoint

Categoria di danno	Unità	Anno						
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Danno alla salute umana	Pt	3.34E+00	3.10E+00	2.67E+00	-1.08E+00	6.54E-01	7.31E-01	-5.86E-01
Danno alla diversità dell'ecosistema	Pt	1.63E+00	1.45E+00	1.29E+00	-9.51E-01	-6.52E-01	1.83E-01	-6.74E-01
Disponibilità di risorse	Pt	1.32E+00	1.75E+00	1.71E+00	-2.25E+00	-2.35E+00	-3.31E+00	-2.36E+00

Tabella 22 - Punteggio singolo: impatto del processo per gli scenari 2007-2013, categorie di impatto endpoint

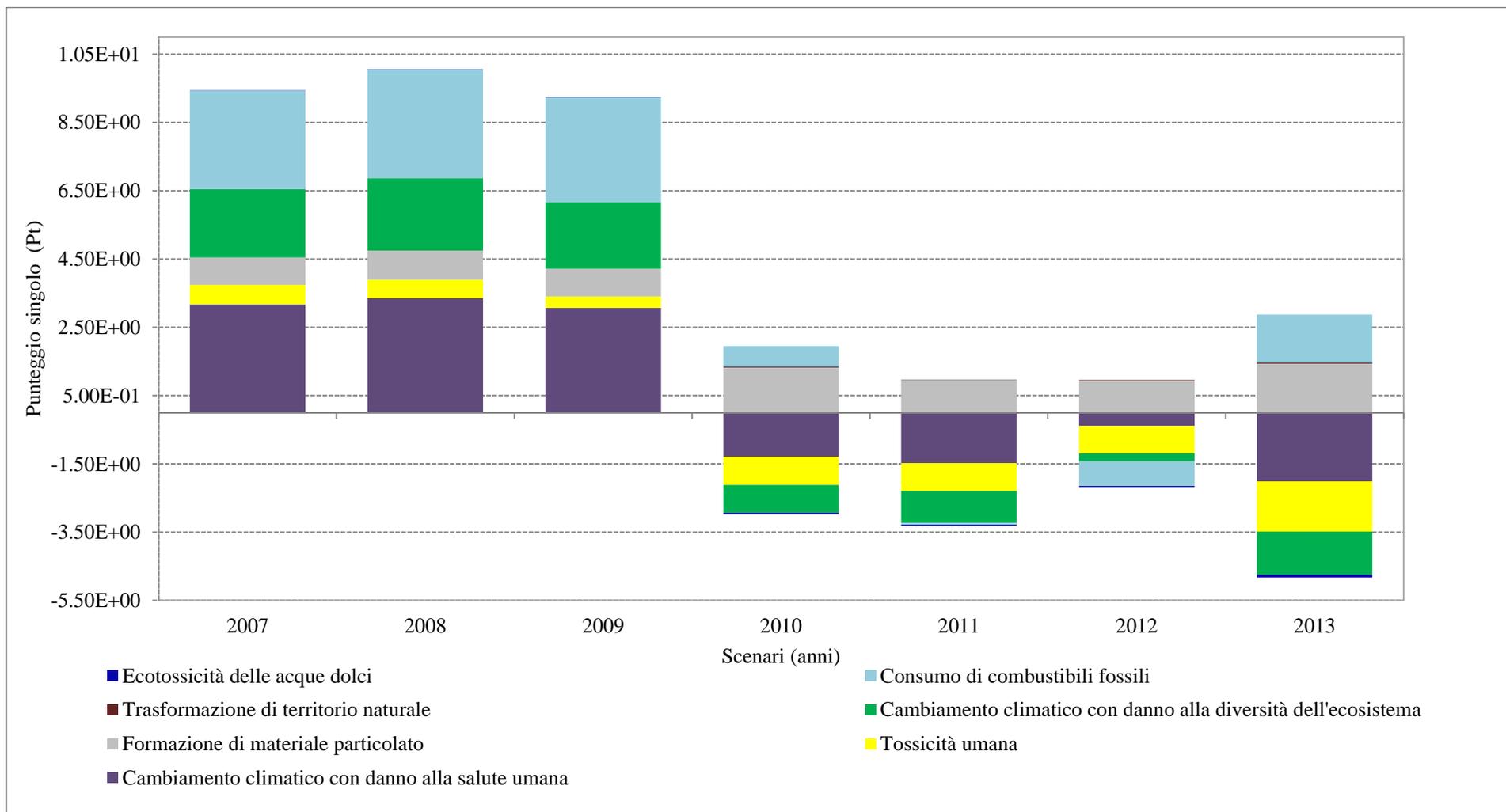


Figura 25 - Punteggio singolo: impatto del processo con estensione dei confini alla gestione dei rifiuti organici in Italia per gli scenari 2007-2013, categorie di impatto midpoint

Categoria d'impatto	Unità	Anni						
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Cambiamento climatico con danno alla salute umana	Pt	3.17E+00	3.35E+00	3.07E+00	-1.29E+00	-1.48E+00	-3.86E-01	-2.01E+00
Tossicità umana	Pt	5.72E-01	5.46E-01	3.32E-01	-8.31E-01	-8.21E-01	-8.02E-01	-1.47E+00
Formazione di materiale particolato	Pt	8.04E-01	8.50E-01	8.19E-01	1.32E+00	9.62E-01	9.38E-01	1.44E+00
Cambiamento climatico con danno alla diversità dell'ecosistema	Pt	2.01E+00	2.12E+00	1.94E+00	-8.11E-01	-9.29E-01	-2.38E-01	-1.26E+00
Ecotossicità delle acqua dolci	Pt	1.11E-02	1.03E-02	5.83E-03	-4.14E-02	-4.09E-02	-3.02E-02	-7.87E-02
Trasformazione del territorio naturale	Pt	-2.23E-02	-1.99E-02	-1.07E-02	2.05E-02	1.30E-02	1.76E-02	2.92E-02
Consumo di combustibile fossile	Pt	2.88E+00	3.19E+00	3.07E+00	6.04E-01	-5.17E-02	-7.19E-01	1.41E+00

Tabella 23 - Punteggio singolo: impatto del processo con estensione dei confini alla gestione dei rifiuti organici in Italia per gli scenari 2007-2013, categorie di impatto midpoint

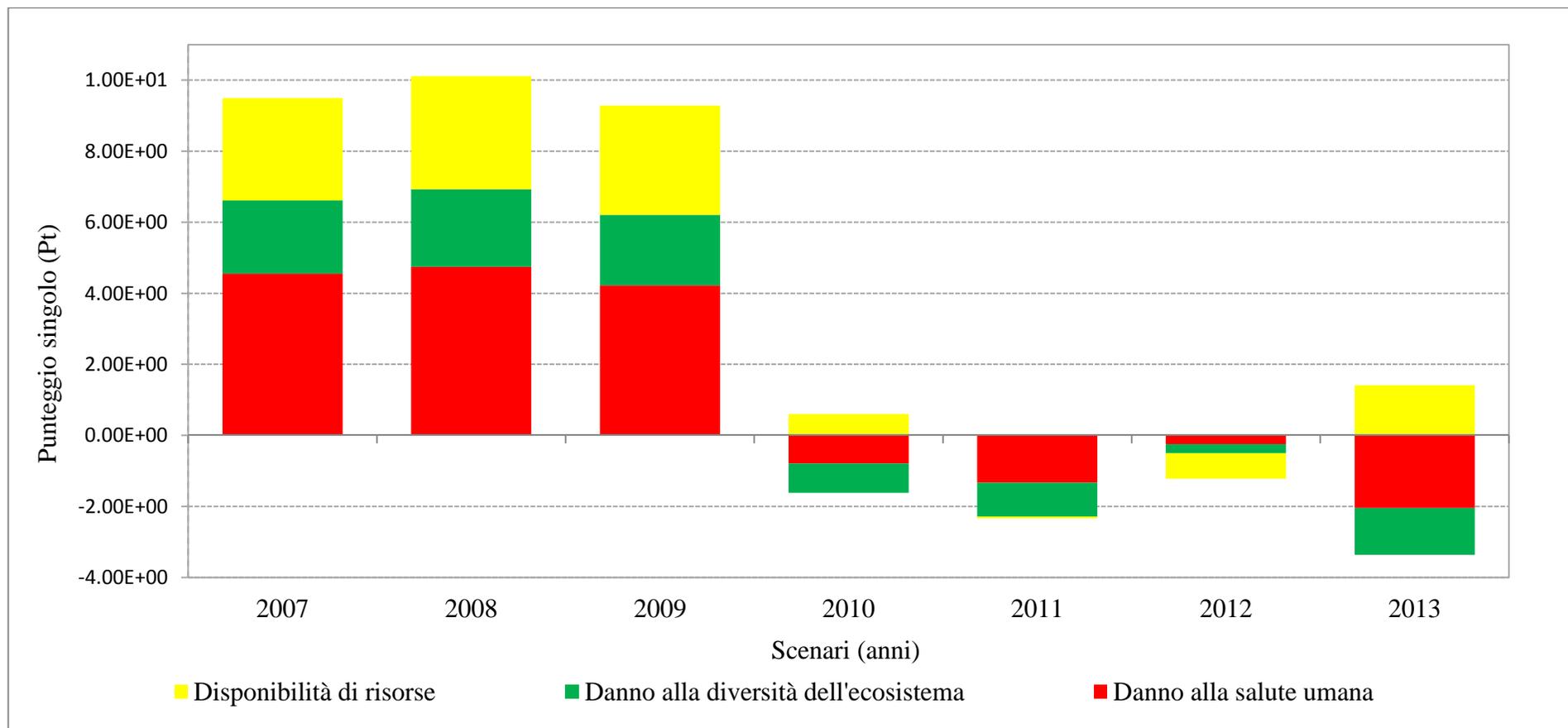


Figura 26 - Punteggio singolo: impatto del processo con estensione dei confini alla gestione dei rifiuti organici in Italia per gli scenari 2007-2013, categorie di impatto endpoint

Categoria di danno	Unità	Anni						
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Danno alla salute umana	Pt	4.55E+00	4.75E+00	4.22E+00	-7.96E-01	-1.33E+00	-2.49E-01	-2.05E+00
Danno alla diversità dell'ecosistema	Pt	2.07E+00	2.18E+00	1.99E+00	-8.21E-01	-9.52E-01	-2.50E-01	-1.32E+00
Disponibilità di risorse	Pt	2.88E+00	3.19E+00	3.08E+00	6.04E-01	-5.16E-02	-7.19E-01	1.41E+00

Tabella 24- Punteggio singolo: impatto del processo con estensione dei confini alla gestione dei rifiuti organici in Italia per gli scenari 2007-2013, categorie di impatto endpoint

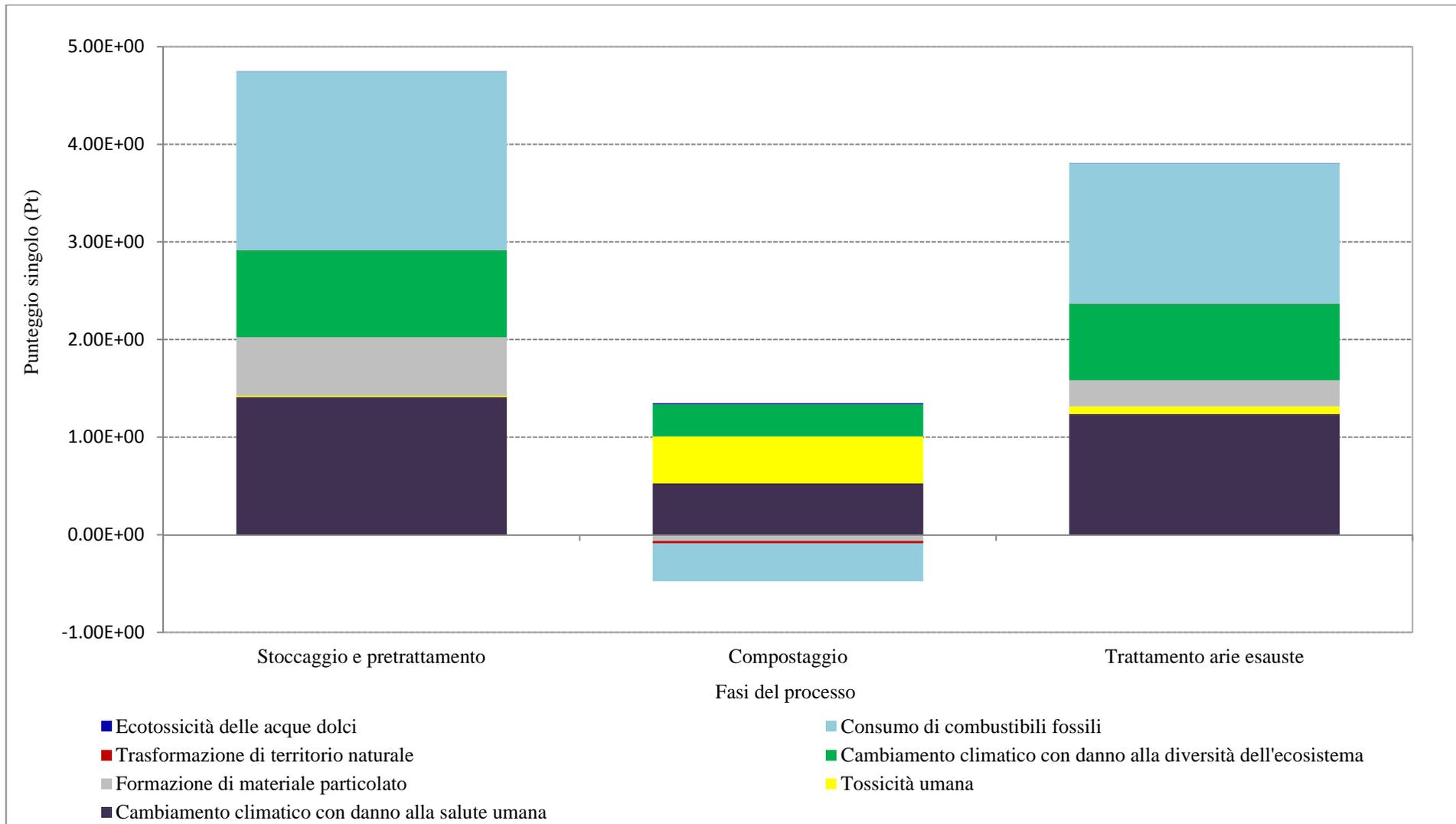


Figura 27 - Punteggio singolo: impatto delle diverse fasi del processo per lo scenario 2007, categorie di impatto midpoint

Categoria d'impatto	Unità	Fasi del processo (scenario 2007)		
		Stoccaggio e pretrattamento	Compostaggio	Trattamento arie esauste
Cambiamento climatico con danno alla salute umana	Pt	1.41E+00	5.24E-01	1.24E+00
Tossicità umana	Pt	1.27E-02	4.82E-01	7.73E-02
Formazione di materiale particolato	Pt	5.99E-01	-6.30E-02	2.69E-01
Cambiamento climatico con danno alla diversità dell'ecosistema	Pt	8.93E-01	3.30E-01	7.83E-01
Trasformazione di territorio naturale	Pt	2.55E-04	-2.46E-02	2.07E-03
Consumo di combustibili fossili	Pt	1.83E+00	-3.90E-01	1.44E+00
Ecotossicità delle acque dolci	Pt	5.54E-05	1.08E-02	2.44E-04

Tabella 25 - Punteggio singolo: impatto delle diverse fasi del processo per lo scenario 2007, categorie di impatto endpoint

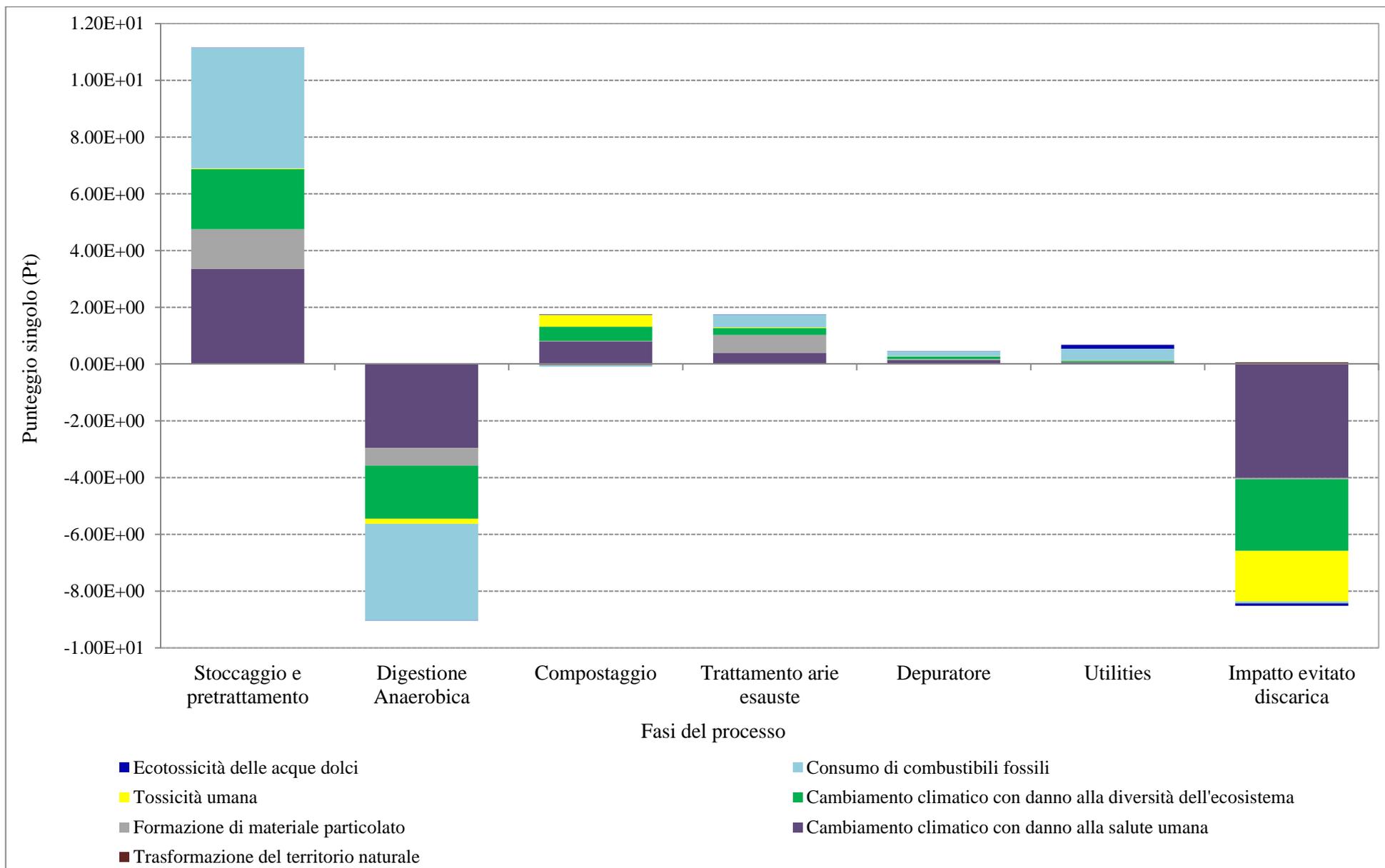


Figura 28 - Punteggio singolo: impatto delle diverse fasi del processo per lo scenario 2013, categorie di impatto midpoint

Categoria d'impatto	Unità	Fasi del processo (scenario 2013)						
		Stoccaggio e pretrattamento	Digestione Anaerobica	Compostaggio	Trattamento arie esauste	Depuratore	Utilities	Impatto evitato discarica
Consumo di combustibili fossili	Pt	4.24E+00	-3.40E+00	-5.75E-02	4.46E-01	1.66E-01	4.18E-01	-6.36E-02
Trasformazione del territorio naturale	Pt	6.00E-04	-3.40E-03	-3.06E-02	6.43E-04	1.63E-04	7.70E-05	6.18E-02
Cambiamento climatico con danno alla diversità dell'ecosistema	Pt	2.12E+00	-1.87E+00	5.01E-01	2.43E-01	9.05E-02	4.13E-02	-2.53E+00
Formazione di materiale particolato	Pt	1.40E+00	-6.24E-01	2.26E-02	6.39E-01	3.16E-02	1.41E-02	-4.88E-02
Tossicità umana	Pt	2.97E-02	-1.81E-01	4.22E-01	2.40E-02	1.04E-02	4.09E-03	-1.78E+00
Cambiamento climatico con danno alla salute umana	Pt	3.35E+00	-2.95E+00	7.93E-01	3.84E-01	1.43E-01	6.53E-02	-4.01E+00
Ecotossicità delle acque dolci	Pt	1.29E-04	-5.70E-04	1.24E-02	7.56E-05	3.16E-05	1.36E-01	-9.08E-02

Tabella 26 - Punteggio singolo: impatto delle diverse fasi del processo per lo scenario 2013, categorie di impatto midpoint

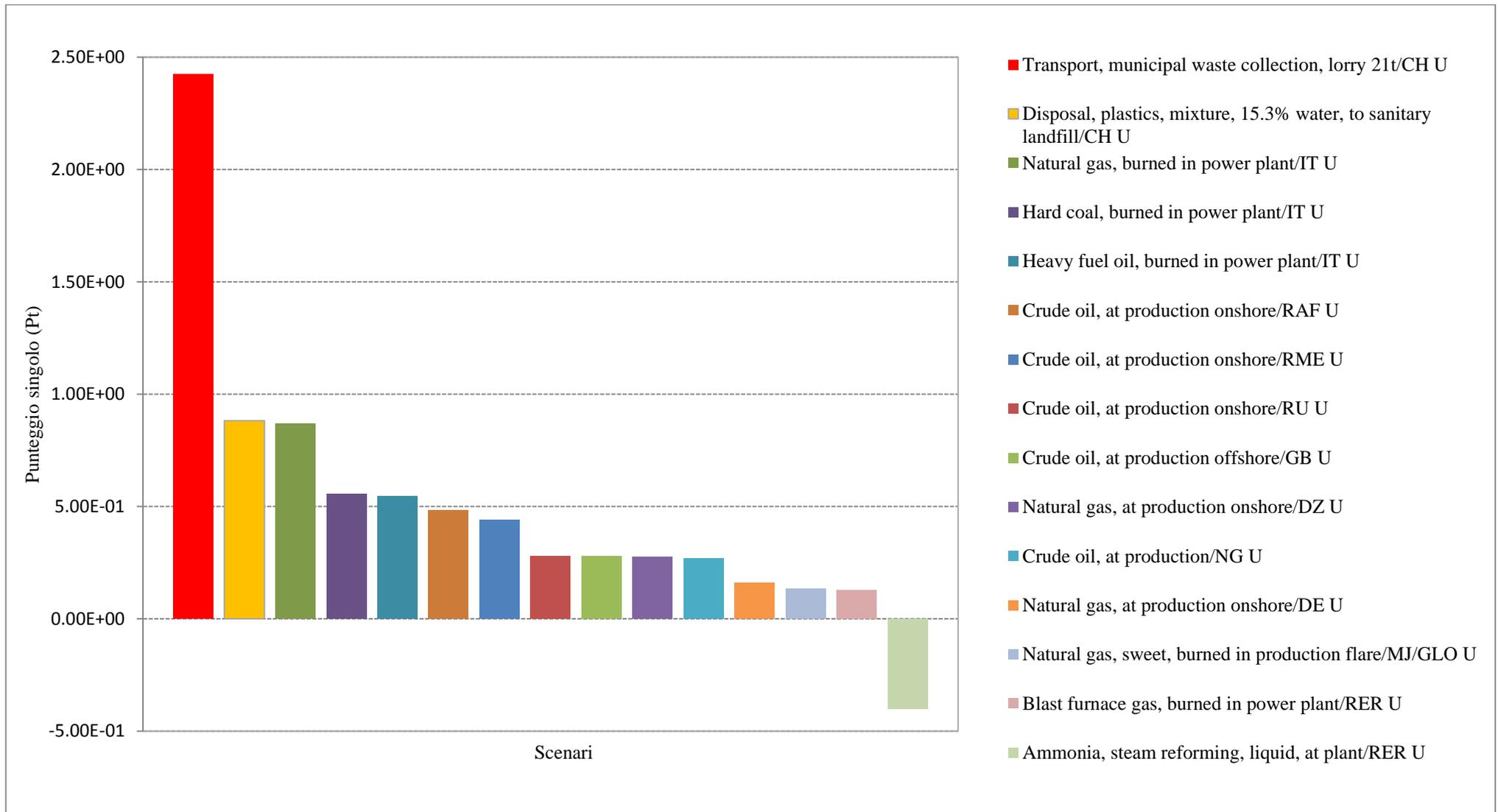


Figura 29 - Analisi di contributo per lo scenario 2007

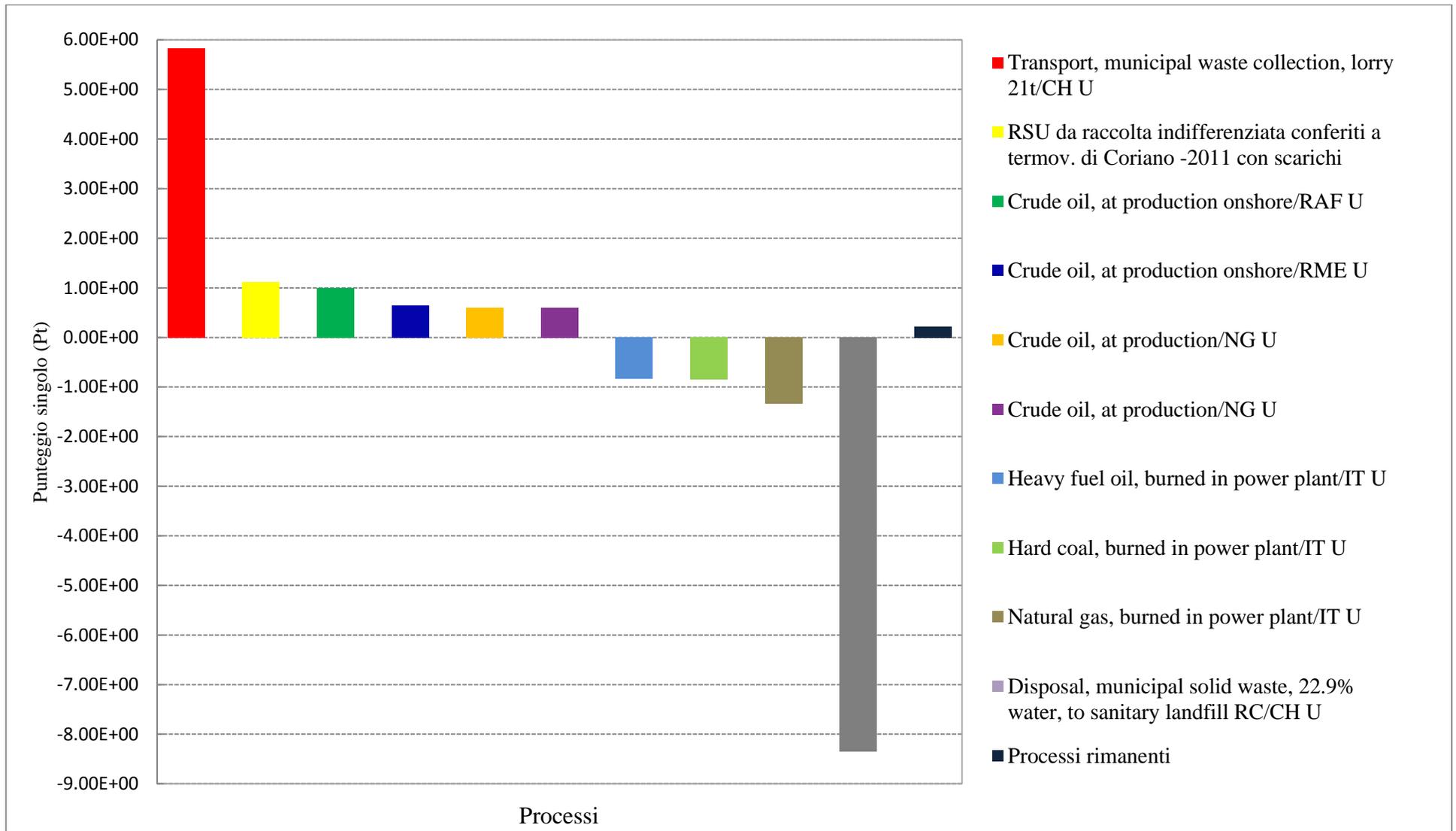


Figura 30 - Analisi di contributo per lo scenario 2013

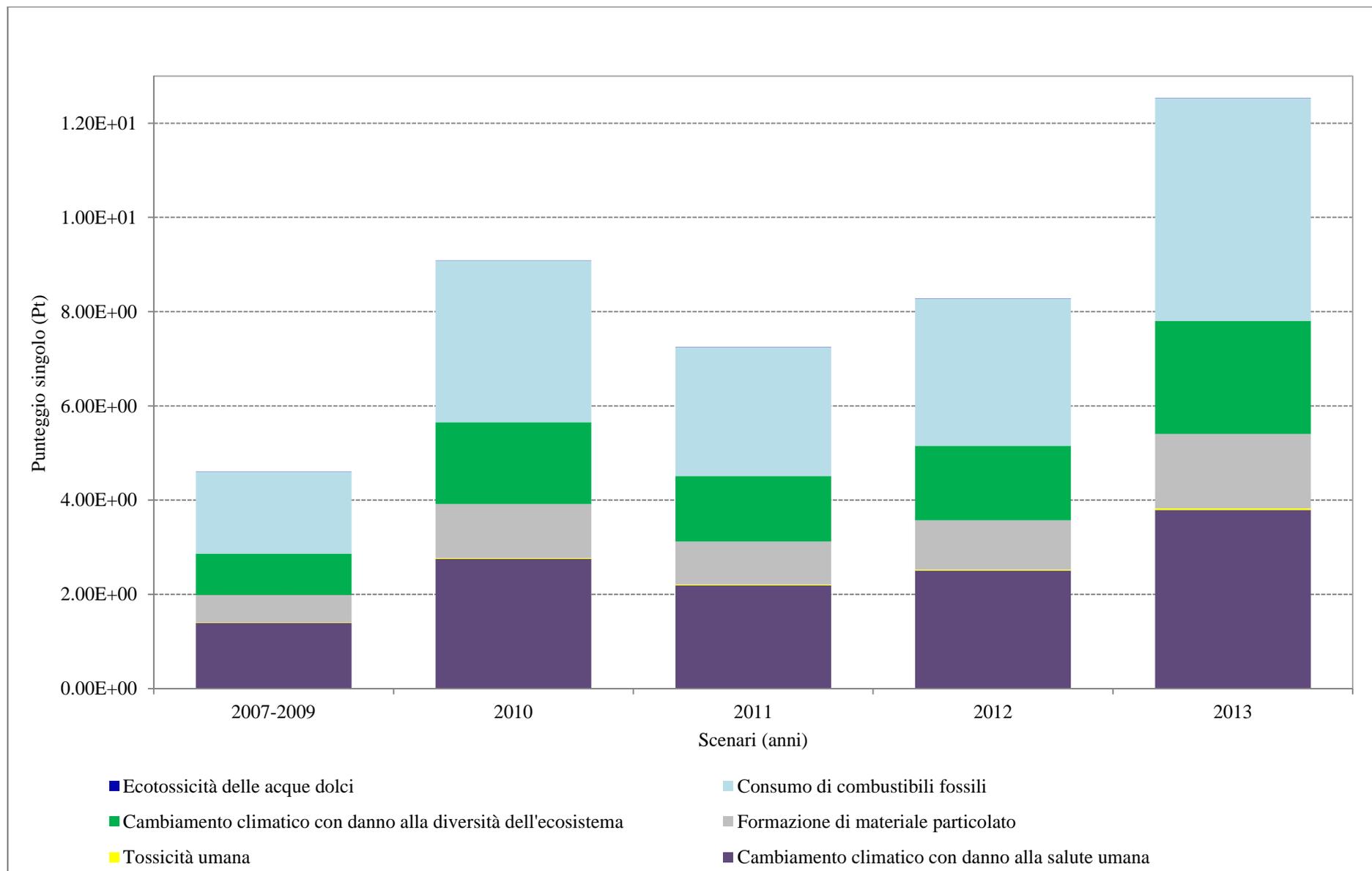


Figura 31 - Punteggio singolo: categorie d'impatto midpoint per il processo di trasporto rifiuti organici, scenari 2007-2013

Categoria d'impatto	Unità	Anni				
		2007-2009	2010	2011	2012	2013
Cambiamento climatico con danno alla salute umana	Pt	1.39E+00	2.75E+00	2.19E+00	2.51E+00	3.79E+00
Cambiamento climatico con danno alla diversità dell'ecosistema	Pt	8.81E-01	1.74E+00	1.39E+00	1.59E+00	2.40E+00
Tossicità umana	Pt	1.18E-02	2.33E-02	1.86E-02	2.13E-02	3.22E-02
Formazione di materiale particolato	Pt	5.79E-01	1.14E+00	9.12E-01	1.04E+00	1.58E+00
Consumo di combustibili fossili	Pt	1.74E+00	3.43E+00	2.73E+00	3.12E+00	4.73E+00
Ecotossicità delle acque dolci	Pt	5.15E-05	1.02E-04	8.11E-05	9.27E-05	1.40E-04

Tabella 26- Punteggio singolo: categorie d'impatto midpoint per il processo di trasporto rifiuti organici, scenari 2007-2013

## 12. INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI

In questa sezione verrà fornita, in maniera dettagliata, un'ampia descrizione dei risultati riportati nel capitolo precedente sotto forma di grafici e tabelle.

### 12.1 Valutazione del danno

Nella prima fase di valutazione degli impatti sono stati messi a confronto, in termini di punteggio singolo, i diversi anni di funzionamento dell'impianto Romagna Compost, dal 2007 al 2013. Per ogni scenario sono stati riportati gli impatti associati al trattamento di 1t di rifiuto organico, per ogni categoria di danno. Gli impatti delle categorie di ogni scenario sono state sommate al fine di ottenere barre di istogramma, che permettono di capire immediatamente quale scenario presenta maggior impatto in termini di punteggio (Pt). Il primo confronto si riferisce al processo, considerando, come confini del sistema, i flussi di materia e di energia dall'ingresso del rifiuto organico in impianto fino ai flussi di rifiuto finale; pertanto è escluso il trasporto del rifiuto organico dal luogo di raccolta allo stabilimento Romagna Compost. I risultati sono espressi sia in termini di categorie di impatto intermedie (*midpoint*) (fig.23) che in categorie di danno finale (*endpoint*) (fig. 24). In entrambi i grafici si osserva un notevole cambiamento degli impatti tra il 2009 e il 2010, anno in cui è stato eseguito l'ampliamento dell'impianto con l'installazione di undici fermentatori anaerobici dai quali è possibile produrre biogas e quindi recuperare, tramite combustione, energia elettrica e termica. Come spiegato nel capitolo 3, il processo di compostaggio tradizionale è un processo energivoro, in quanto richiede energia per il funzionamento dei ventilatori che insufflano aria all'interno delle corsie dove è posizionato il materiale organico da ossidare. A partire dal 2010, grazie alla realizzazione del processo integrato di fermentazione anaerobica e compostaggio, è stato possibile ottenere un bilancio energetico positivo dell'impianto, poiché l'energia elettrica prodotta dal recupero del biogas, è maggiore rispetto ai consumi totali dell'impianto. Inoltre, l'energia prodotta e ceduta alla rete ENEL consente di evitare la produzione di energia elettrica da fonti convenzionali. Tale risparmio si traduce essenzialmente in un impatto evitato in termini di cambiamento climatico con danni sia alla salute umana che all'ecosistema, consumo di combustibili fossili e trasformazione di territorio naturale. Gli impatti relativi alla formazione di materiale particolato e tossicità umana sono presenti in tutti gli scenari e sono attribuibili al processo di trasporto dei rifiuti e allo smaltimento del materiale non compostabile presso la discarica oppure all'inceneritore (a partire dal 2010), come mostrato in tab.28. Confrontando gli scenari del nuovo impianto, dal 2010 al 2013, gli impatti relativi al 2012 sono in controtendenza rispetto agli altri scenari. Questo risultato è dovuto al diverso peso in termini di impatto che il metodo Recipe 2014 attribuisce allo smaltimento in discarica o al termovalorizzatore. Infatti il destino del materiale non compostabile (CER 19 05 01) prodotto a valle del processo, nel 2012 è ripartito per il 79% al termovalorizzatore di Coriano (RN), mentre il restante 21% alla

discarica, causando maggiori impatti sul cambiamento climatico e sulla tossicità umana (fig.23), nonostante il recupero energetico prodotto dalla combustione del materiale. Nel 2010, 2011 e 2013, lo scenario di smaltimento per questo rifiuto è totalmente inverso; ciò dipende da logiche di mercato e dalla disponibilità degli impianti di trattamento, pertanto non è determinato dal processo o dalla gestione dell'impianto.

<b>Anni</b>	<b>CER 19 05 01 smaltito (t)</b>	<b>% smaltito presso Termovalorizzatore</b>	<b>% smaltito in discarica</b>
<b>2007</b>	1555	0	100
<b>2008</b>	1420	0	100
<b>2009</b>	1192	0	100
<b>2010</b>	1510	18	82
<b>2011</b>	4812	28	72
<b>2012</b>	6713	79	21
<b>2013</b>	7075	16	84

Tabella 27 - Quantità di materiale non compostabile prodotto (CER 19 05 01) e tipologia di smaltimento finale

Infine, lo scenario del 2010 sembra essere quello migliore dal punto di vista degli impatti del solo processo, associabile ad una minor produzione di materiale non compostabile rispetto agli anni successivi. Tale aumento può essere determinato dalla qualità del rifiuto organico in ingresso all'impianto e alle diverse lavorazioni svolte negli anni.

Nella seconda fase dello studio, sono stati ampliati i confini del sistema, considerando l'impatto evitato derivante dai rifiuti fuori regione trattati presso l'impianto Romagna Compost, che altrimenti sarebbero stati smaltiti in discarica per mancanza di impianti di recupero adeguati nelle aree di produzione e raccolta. Il confronto tra i vari scenari è stato eseguito sempre in termini di punteggio singolo per le categorie di impatto a livello di *midpoint* ed *endpoint* (fig.25 e fig.26). Le principali categorie d'impatto risultano essere la formazione di materiale particolato e consumo di combustibile fossile, imputabili alle maggiori distanze per il trasporto del rifiuto organico dal luogo di raccolta all'impianto di recupero (tab.18). D'altro canto il recupero dei rifiuti organici in un impianto con tecnologia adeguata, consente di recuperare sia materia che energia, diversamente da quanto succederebbe destinandolo alla discarica. Pertanto, si osserva un impatto evitato in termini di cambiamento climatico sia per quel che riguarda l'effetto sulla salute umana che sull'ecosistema, di tossicità umana ed ecotossicità dell'acque, quest'ultimo per via del percolato generato durante lo smaltimento in discarica.

Confrontando i risultati ottenuti negli anni 2012 e 2013, si osserva una notevole differenza attribuibile al diverso scenario di smaltimento del materiale non compostabile e alla maggior quantità di rifiuti provenienti da fuori regione (20% nel 2012, 29% nel 2013, sul totale di rifiuto in ingresso) e quindi sia maggiori distanze di trasporto ma anche maggior impatto evitato se si considera l'impianto

oggetto di studio come una valida alternativa al conferimento in discarica, non più consentito dalla normativa vigente.

In fig. 27 e fig. 28 è rappresentato il dettaglio delle categorie d'impatto, in termini di punteggio singolo, per le varie fasi che compongono il processo prima e dopo l'ampliamento dell'impianto prendendo come riferimento l'anno 2007 e 2013.

Nello scenario 2007, il processo era costituito da tre fasi principali: stoccaggio e pretrattamento del rifiuto organico, compostaggio e trattamento delle arie esauste (biofiltro). Nel grafico di fig. 27 si osserva che la fase di stoccaggio e pretrattamento è quella con maggiori impatti, seguita dalla biofiltrazione e compostaggio. Ciò è dovuto principalmente al consumo di combustibili fossili per il trasporto del rifiuto organico nella prima fase di processo e al consumo di energia elettrica (da fonti convenzionali) per l'aspirazione delle arie esauste convogliate al biofiltro per essere depurate (fig. 32).

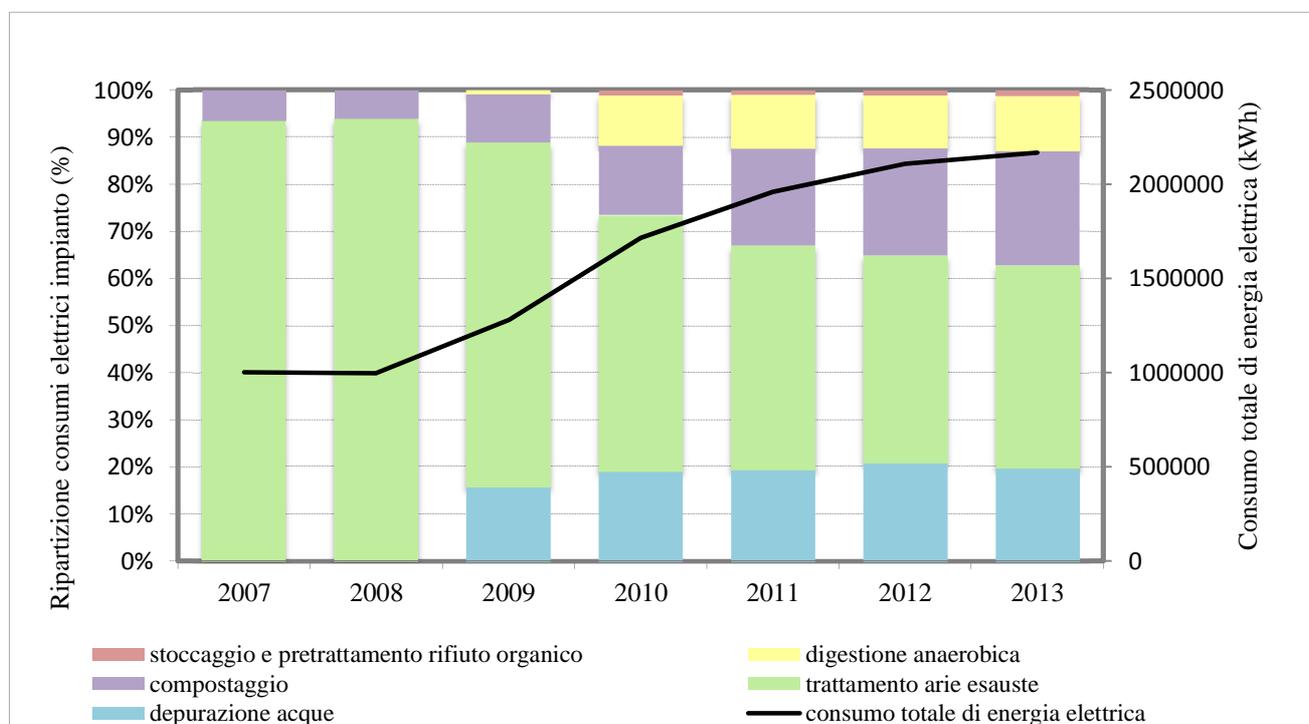


Figura 32 - Ripartizione dei consumi totali di energia elettrica

L'impatto associato alla tossicità umana è maggiore per la fase di compostaggio in quanto, al termine di questa fase, dalla vagliatura del materiale ossidato, si ottiene una frazione di materiale non compostabile, destinata ad altri impianti di smaltimento, come discarica o inceneritore. Sempre in questa fase, è possibile notare un impatto evitato per la trasformazione di territorio naturale, dovuto all'ammendante compostato misto prodotto, che è in grado di sostituire i fertilizzanti convenzionali in agricoltura a pieno campo o nel giardinaggio.

Lo scenario 2013 (fig. 28) rappresenta la configurazione attuale costituita da sette sotto processi. Dal confronto si osserva che la fase più impattante è quella di stoccaggio e pretrattamento del rifiuto organico in termini di cambiamento climatico e consumo di combustibili fossili, associabile al trasporto del rifiuto organico. La fermentazione anaerobica con la produzione di energia elettrica rinnovabile e i rifiuti trattati provenienti da fuori regione che altrimenti sarebbero stati smaltiti in discarica contribuiscono a ridurre gli impatti del processo globale.

Infine, per valutare quali tra i processi presenti all'interno del modello contribuiscono maggiormente agli impatti, è stata eseguita un'analisi di contributo sempre per i due scenari 2007 e 2013, rappresentativi delle due configurazioni (fig.29 e fig. 30). Per entrambi gli scenari, sebbene con punteggi singoli differenti, il processo che contribuisce maggiormente all'impatto dell'impianto è il *“Transport, municipal waste collection, lorry 21t CH/U”*, relativo al trasporto del rifiuto organico dal luogo di raccolta all'impianto di trattamento. Al secondo posto, è presente l'impatto associato allo smaltimento del materiale non compostabile presso la discarica *“Disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary landfill CH/U”* per lo scenario 2007 (Passarini et al, 2013). I processi successivi differiscono notevolmente per le due configurazioni.

Nel processo di compostaggio tradizionale contribuiscono all'impatto totale diversi processi per la produzione di energia elettrica da fonti non convenzionali (es. *“Natural gas, burned in power plant/IT U”*) e carburante. L'unico impatto evitato presente è dovuto alla produzione di ammendante compostato misto, che può sostituire alcuni fertilizzanti convenzionali, come l'urea (*“Ammonia, steam reforming, liquid at plant, RER U”*).

Nello scenario 2013, i rimanenti impatti sono associabili al consumo di carburante per autotrazione, mentre tra gli impatti evitati è possibile individuare alcuni processi per la produzione di energia elettrica da fonti non rinnovabili (sostituiti dalla produzione di energia elettrica da biogas) e il mancato conferimento dei rifiuti provenienti da fuori regione con il processo *“Disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to sanitary landfill CH/U”*. Considerata l'elevata importanza del processo di trasporto del rifiuto organico, è stato elaborato il grafico in fig. 31, per comprendere meglio come variano gli impatti all'aumentare delle distanze per il trasporto di una tonnellata di rifiuto organico. Mettendo in relazione il grafico con i dati di tab. 4, è possibile notare maggiori impatti negli anni 2010 e 2013, nei quali le distanze di trasporto sono rispettivamente di 79 tkm/t e 109 tkm/t. La diversa provenienza dei rifiuti organici può variare di anno in anno, in base a fattori logistici ed economici, indipendenti dalla gestione dell'impianto. Infatti, la logistica dei rifiuti organici e gli accordi commerciali con i vari produttori sono gestiti dalla società Herambiente, pertanto, in base alla scadenza o alla formulazione di contratti con nuovi fornitori, le distanze di trasporto possono cambiare notevolmente. Oltre alle differenti distanze, sempre per i motivi sopraelencati, possono

esservi differenze nei quantitativi dei rifiuti provenienti da fuori regione. Questi ultimi, qualora la quantità di rifiuto organico raccolto nella provincia di Forlì-Cesena e zone limitrofe non sia sufficiente, permettono di saturare la capacità produttiva dell'impianto e di consentirne il funzionamento a pieno regime.

## **12.2 Analisi di incertezza**

Come accennato nel capitolo 5 della parte generale, sulla base delle incertezze attribuite a ciascun dato si è valutato come queste influiscono sui risultati finali mediante l'Analisi Monte Carlo. Tale metodo, si avvale di un algoritmo in grado di produrre una serie di numeri per i quali si assume una distribuzione Lognormale, con un intervallo di confidenza del 95 %.

L'analisi consiste in una simulazione ripetuta iterativamente, nella quale i parametri di ciascun processo (ovvero i dati in input e in output al processo in esame, presenti nell'analisi di inventario) variano all'interno di un intervallo di valori prestabilito, corrispondente alla loro incertezza. Il numero di sequenze, è impostabile e variabile da software; nel nostro caso sono state eseguite 10000 iterazioni. L'incertezza rappresenta una stima della variabilità dei dati, considerando tutte le caratteristiche che possono influenzarla: metodi di acquisizione dei dati, indipendenza delle fonti, rappresentatività del dato, correlazioni temporali, geografiche e tecnologiche.

Tale operazione, permette di confrontare tra di loro due scenari alla volta, calcolando il numero di volte per cui un processo risulta avere impatto maggiore rispetto ad un altro, sia per le categorie di *midpoint* che di *endpoint* del metodo di analisi scelto. Infine, confrontando i risultati ottenuti dalla caratterizzazione con quelli dell'analisi Monte Carlo, è possibile controllare la robustezza dei dati, ovvero se il processo che risulta meno impattante dalla valutazione degli impatti, risulta quello favorito anche nell'analisi di incertezza.

Per le finalità dello studio, è stata effettuata una sola comparazione, tra gli scenari 2007 e 2013, anni rappresentativi delle due diverse configurazioni impiantistiche: compostaggio tradizionale e sistema integrato anaerobico-aerobico. I risultati di questa analisi sono mostrati nelle pagine successive sotto forma di grafici a barre, dove è rappresentata la percentuale di volte in cui lo scenario A ha un impatto maggiore dello scenario B (o viceversa) per ciascuna delle categorie di impatto considerate nella fase di caratterizzazione. Per semplicità lo scenario 2007 (compostaggio tradizionale) è stato identificato con la lettera A (barre di colore rosso), mentre lo scenario 2013 (sistema integrato anaerobico-aerobico) è indicato con la lettera B (barre di colore blu).

Il primo confronto, riportato in figura 33, mostra che, per la maggior parte delle categorie di *midpoint*, lo scenario relativo all'anno 2007 è più impattante del 2013. Solo per le categorie di impatto "formazione di particolato" e "trasformazione di territorio naturale" lo scenario moderno

risulta più sfavorito, per via delle maggior distanze di trasporto del rifiuto organico, dal quale ne consegue un maggior consumo di carburante, e per le maggior quantità di sovrappeso (CER 19 05 01) smaltito in discarica o all'inceneritore, causati dalla diversa composizione del rifiuto in ingresso. A livello di *endpoint* (figura 34), lo scenario 2007 è sempre quello più sfavorevole per tutte e tre le categorie di danno: danno alla salute umana, danno alla diversità dell'ecosistema e consumo risorse. In figura 35 è riportato il confronto in termini di punteggio singolo dell'impatto totale, nel quale si osserva che, per il 97.7% dell'iterazioni, lo scenario 2007 è la configurazione che ha maggiore impatto dal punto di vista ambientale, in quanto il compostaggio tradizionale è un processo energivoro, a differenza dello scenario 2013 da cui grazie alla fase di fermentazione anaerobica è possibile produrre energia rinnovabile che può essere utilizzata al posto di fonti energetiche convenzionali. Gli stessi dati sono riproposti in un grafico ad istogrammi (fig. 36), nel quale è possibile osservare la curva gaussiana delle probabilità in cui il processo A è più impattante del processo B. La maggior probabilità si ottiene per il punteggio singolo di 11.5, corrispondente alla media statistica del modello. Tale valore è pari alla differenza degli impatti totali in termini di punteggio singolo tra lo scenario 2007 e 2013 (tab.24). Infine, per convalidare i risultati ottenuti dall'analisi di incertezza è stato eseguito un confronto con i dati derivanti dalla valutazione del danno. In tabella 32, è possibile notare che entrambe le analisi hanno fornito gli stessi risultati, e questo rafforza la validità e la coerenza dei dati utilizzati nell'analisi LCA oggetto di studio.

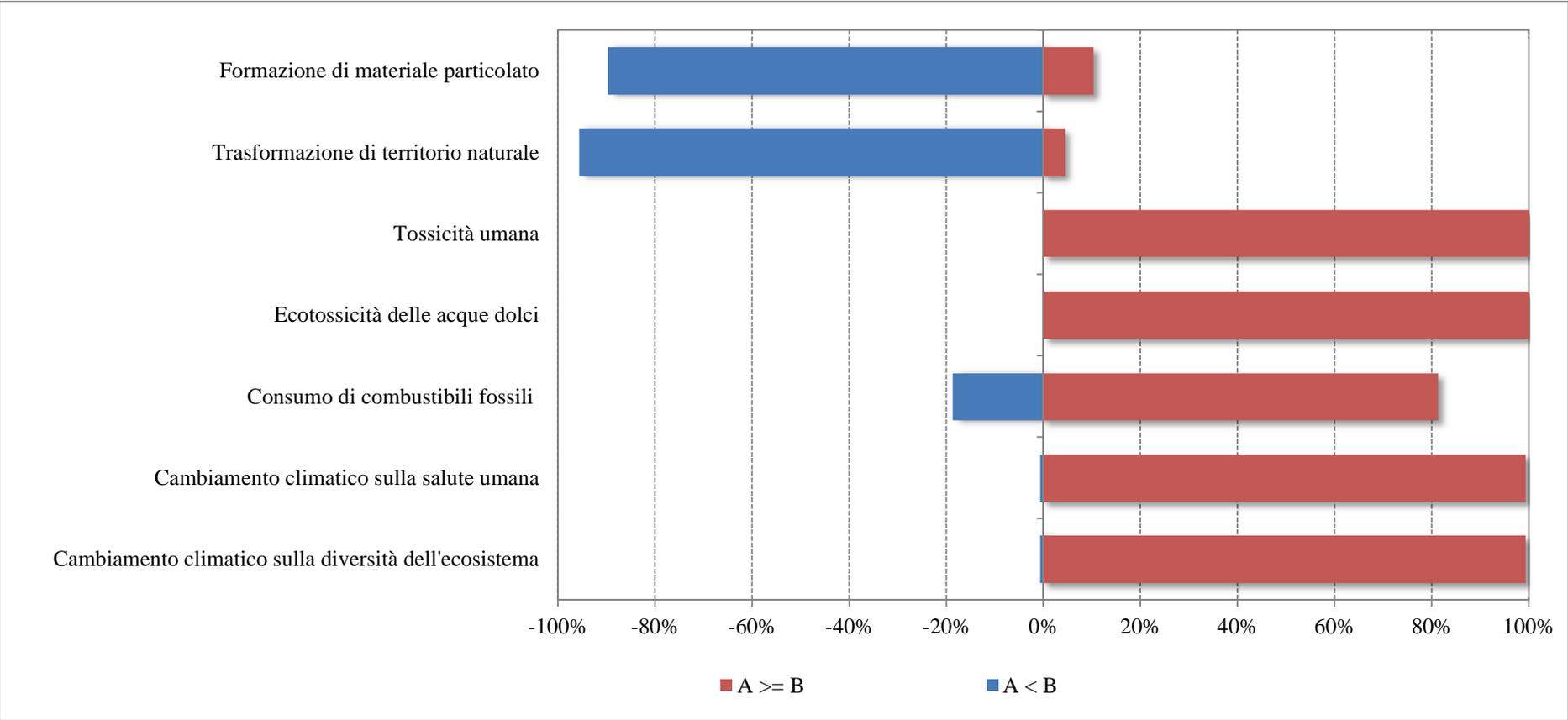


Figura 33 - Analisi Monte Carlo: processo 2007 (A) vs processo 2013 (B), caratterizzazione midpoint

<b>Categoria d'impatto</b>	<b>A &gt;= B</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>SD</b>	<b>CV (Coeff. di Variazione)</b>	<b>2,5%</b>	<b>97,5%</b>	<b>Err. std. di media</b>
Formazione di materiale particolato	10.30%	-3.17E-05	-2.84E-05	2.85E-05	-89.90%	-9.68E-05	1.56E-05	-8.99E-03
Trasformazione di territorio naturale	4.37%	-2.33E-08	-2.24E-08	1.50E-08	-64.50%	-5.59E-08	4.14E-09	-6.45E-03
Tossicità umana	99.90%	1.03E-04	9.13E-05	5.29E-05	51.40%	4.00E-05	2.37E-04	5.14E-03
Ecotossicità delle acque dolci	99.90%	4.05E-08	3.15E-08	3.28E-08	81.10%	8.33E-09	1.26E-07	8.11E-03
Consumo di combustibili fossili	81.30%	2.28E+00	2.51E+00	2.82E+00	124.00%	-3.88E+00	7.30E+00	1.24E-02
Cambiamento climatico con danno sulla salute umana	99.30%	2.63E-04	2.57E-04	1.09E-04	41.60%	6.32E-05	4.98E-04	4.16E-03
Cambiamento climatico con danno sulla diversità dell'ecosistema	99.30%	1.48E-06	1.45E-06	6.18E-07	41.60%	3.56E-07	2.81E-06	4.16E-03

Tabella 28- Risultati analisi Monte Carlo: processo 2007 (A) vs processo 2013 (B), caratterizzazione midpoint

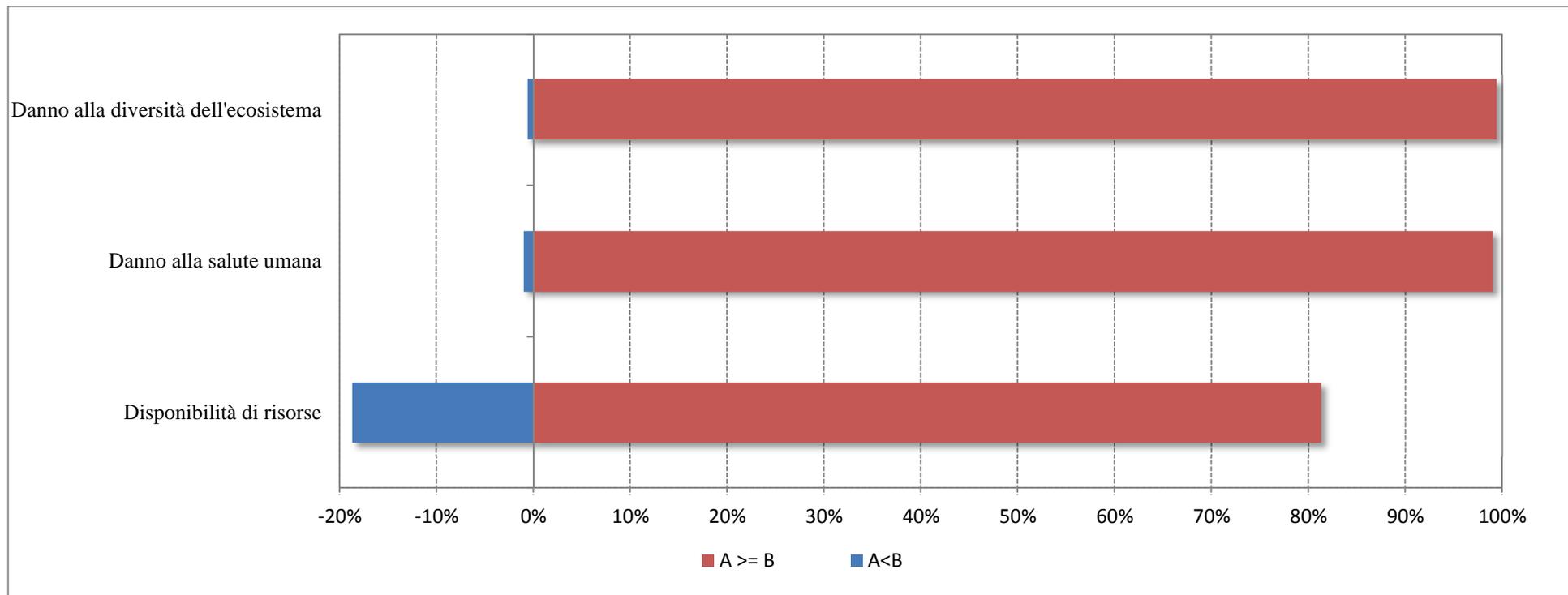


Figura 34 - Analisi Monte Carlo: processo 2007 (A) vs processo 2013 (B), caratterizzazione endpoint

<b>Categoria di danno</b>	<b>A &gt;= B</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>SD</b>	<b>CV (Coeff. di Variazione)</b>	<b>2,5%</b>	<b>97,5%</b>	<b>Err. std. di media</b>
Disponibilità di risorse	81.30%	2.28E+00	2.50E+00	2.82E+00	124%	-3.88E+00	7.30E+00	1.24E-02
Danno alla salute umana	99.00%	3.34E-04	3.31E-04	1.41E-04	42,1%	6.72E-05	6.20E-04	4.21E-03
Danno alla diversità dell'ecosistema	99.40%	1.54E-06	1.50E-06	6.22E-07	40,4%	4.01E-07	2.86E-06	4.04E-03

Tabella 30- Risultati analisi Monte Carlo: processo 2007 (A) vs processo 2013 (B), caratterizzazione endpoint

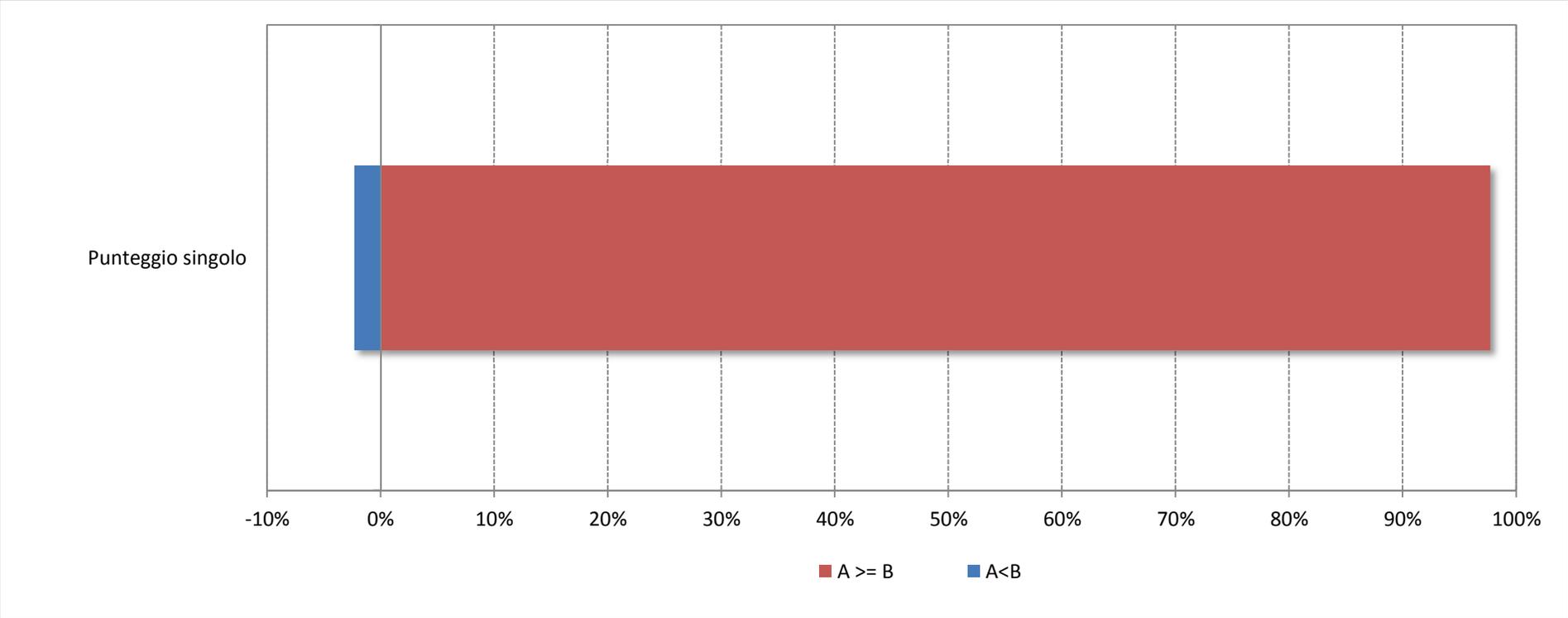


Figura 35 - Analisi Monte Carlo: processo 2007 (A) vs processo 2013 (B), punteggio singolo

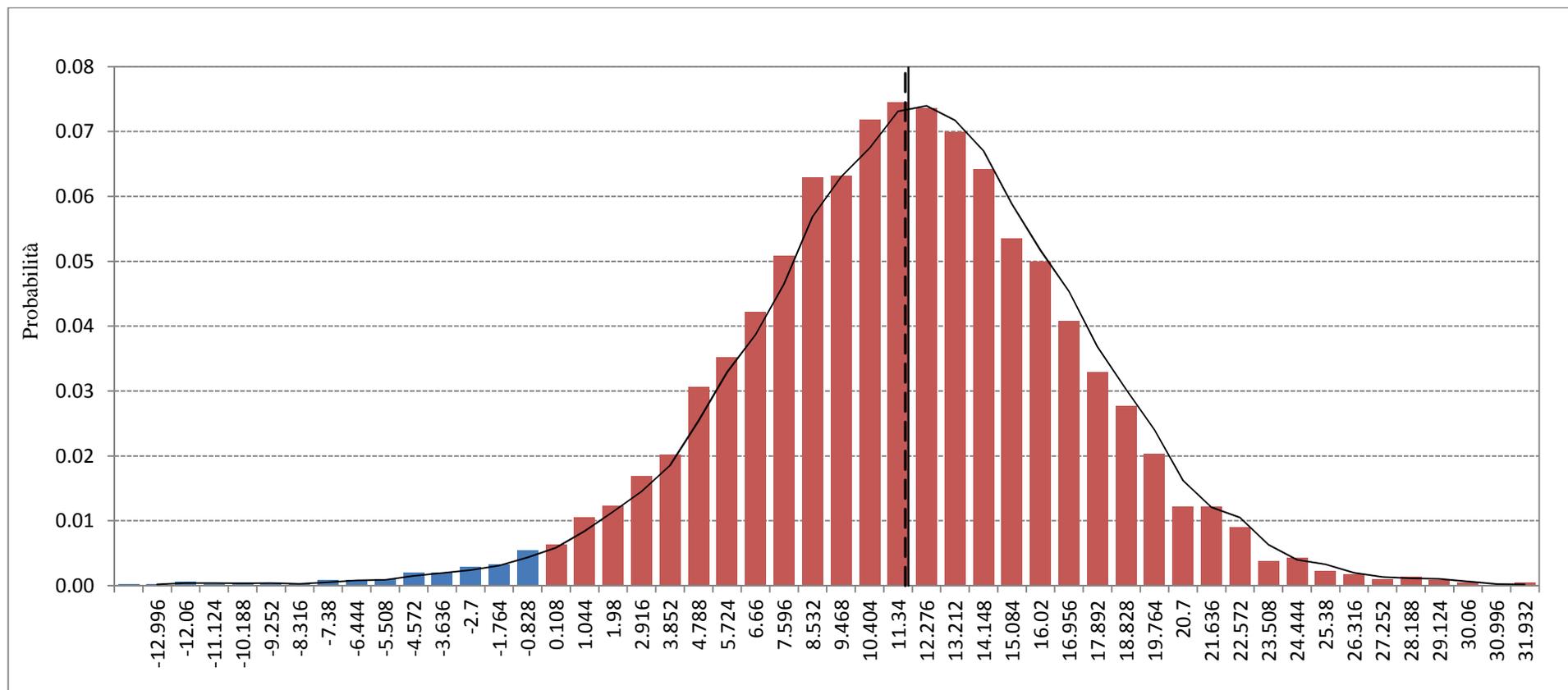


Figura 36 – Analisi Monte Carlo: processo 2007 (A) vs processo 2013 (B), punteggio singolo

<b>Categoria di danno</b>	<b>A &gt;= B</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>SD</b>	<b>CV (Coeff. di Variazione)</b>	<b>2,5%</b>	<b>97,5%</b>	<b>Err. std. di media</b>
Punteggio singolo	97.70%	1.15E+01	1.16E+01	5.53E+00	48.10%	2.99E-01	2.21E+01	4.81E-03

Tabella 31 – Risultati analisi Monte Carlo: processo 2007 (A) vs processo 2013 (B), punteggio singolo

<b>Analisi di caratterizzazione</b>		<b>Analisi Monte Carlo</b>		
<i>Processo 2007</i>	<i>Processo 2013</i>	<b>Categorie di impatto</b>	<i>Processo 2007</i>	<i>Processo 2013</i>
<b>x</b>		Cambiamento climatico con danno sulla salute umana	<b>x</b>	
<b>x</b>		Cambiamento climatico con danno sulla diversità dell'ecosistema	<b>x</b>	
	<b>x</b>	Formazione di materiale particolato		<b>x</b>
<b>x</b>		Tossicità umana	<b>x</b>	
<b>x</b>		Consumo di combustibili fossili	<b>x</b>	
	<b>x</b>	Trasformazione di territorio naturale		<b>x</b>
<b>x</b>		Ecotossicità delle acque dolci	<b>x</b>	

Tabella 29- Confronto analisi di caratterizzazione vs analisi Monte Carlo per processo 2007 vs processo 2013

### 13. CONCLUSIONI

La gestione degli scarti organici deve seguire determinate politiche basate sul concetto delle “3R”, ovvero riduzione, riuso e riciclo (Direttiva 2008/98/CE). La prevenzione/riduzione nella produzione di rifiuti alimentari è l’aspetto prioritario, ma spesso non è economicamente o tecnologicamente possibile. Per questo motivo, gli scarti alimentari devono essere valorizzati il più possibile come risorsa per molti altri processi, ad esempio mangimi o per la produzione di energia. Inoltre, considerando gli obiettivi europei che tendono a ridurre l’uso di combustibile fossile e le emissioni di gas serra, la produzione di energia da risorse rinnovabili è fondamentale e l’interesse verso processi agroenergetici è in continua crescita (inclusa la produzione di biogas).

Gli scarti organici raccolti in modo differenziato possono essere inviati ad impianti di compostaggio (o di digestione anaerobica e post-compostaggio) da cui è possibile produrre energia elettrica rinnovabile e recuperare un ammendante compostato misto, che può essere utilizzato in agricoltura come fertilizzante.

Una valutazione complessiva dell’effettivo impatto sull’ambiente e sulla salute umana di un impianto di trattamento per la frazione organica può essere effettuato adottando l’approccio del ciclo di vita, il quale permette di considerare il contributo di diversi parametri e variabili, come le emissioni in aria, in acqua e nel suolo, i consumi di combustibili fossili ed additivi e il trasporto dei flussi di rifiuti fino ai processi di smaltimento finale.

In questo studio, la metodologia LCA è stata applicata per valutare come sono variati nel tempo (dal 2007 al 2013) gli impatti di un impianto di trattamento per la frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU), gestito dalla società Romagna Compost, situata nelle prime colline di Cesena (FC). Negli anni 2008 e 2009 l’impianto è stato sottoposto ad un progetto di ampliamento e miglioramento, nel quale il processo di compostaggio tradizionale è stato convertito ad un sistema integrato anaerobico-aerobico; tra i principali obiettivi vi era l’aumento della potenzialità dell’impianto (da 15000 t/anno a 40000 t/anno), la riduzione delle emissioni odorigene provenienti dal processo di compostaggio e la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili.

Complessivamente, dall’analisi LCA si è riscontrato un notevole miglioramento degli impatti ambientali negli anni successivi al 2009, grazie al recupero energetico tramite cogenerazione del biogas prodotto nella fase di fermentazione anaerobica, che ha permesso di evitare gli impatti derivanti dalla produzione di energia elettrica mediante il tradizionale mix energetico italiano, basato in buona parte su fonti termiche. In particolare, quest’ultimo aspetto consente una diminuzione dell’impatto per le categorie “*consumo di combustibili fossili*”, “*cambiamento climatico con danno alla salute umana*”, “*cambiamento climatico con danno alla diversità dell’ecosistema*”.

Le categorie “*tossicità umana*” e “*formazione di materiale particolato*” sono correlate al trasporto dei rifiuti e al processo di smaltimento del materiale non compostabile (CER 19 05 01), un rifiuto composto principalmente da plastiche e inerti, che può essere smaltito in discarica o in impianti di incenerimento. La diversa destinazione non dipende dalla gestione dell’impianto ma da logiche di mercato e dalla disponibilità degli impianti di smaltimento gestiti da HERAmbiente. Il processo di trasporto dei rifiuti organici ricopre un ruolo fondamentale nella valutazione degli impatti, specialmente negli anni successivi all’ampliamento. La maggior capacità dell’impianto, infatti, ha permesso di trattare, oltre ai rifiuti della provincia di Forlì-Cesena, anche i rifiuti provenienti da extra-regione. Tale quota proveniente specialmente da Marche, Abruzzo e Campania, può variare di anno in anno, in base a fattori logistici ed economici che vanno oltre la gestione del processo.

Pertanto, dopo aver valutato i dati strettamente correlati all’impianto, si è ritenuto opportuno estendere i confini del sistema fino al trasporto del rifiuto organico, dal luogo di raccolta all’impianto Romagna Compost, includendo l’impatto evitato dallo smaltimento di questi rifiuti in discarica, per mancanza di impianti di recupero adeguati nelle zone di raccolta. Anche il rapporto sui rifiuti urbani (ISPRA, 2014) sottolinea la mancanza di impianti di digestione anaerobica nel centro Italia; infatti nell’anno 2013, su un totale di 50 impianti censiti, l’86% è localizzato nelle regioni del Nord, il 2.3% nel Centro e l’11.6% al Sud. A tal riguardo, l’art. 182 del d.lgs. n. 152/2006 stabilisce il principio di autosufficienza per lo smaltimento dei rifiuti urbani non pericolosi e per i rifiuti derivanti dal loro trattamento a livello di ambito territoriale ottimale, ad esclusione delle frazioni di rifiuto urbano destinate al recupero, per le quali è sempre permessa la libera circolazione sul territorio nazionale al fine di favorire quanto più possibile il recupero, privilegiando il concetto di prossimità di tali impianti. Pertanto, al fine del D.lgs 36/2003 e del D.lgs 152/2006, è stato opportuno effettuare l’analisi per capire se l’evitato ricorso alla discarica, giustificava il trasporto dei rifiuti organici per il recupero nel Nord Italia. Il confronto di questi ultimi scenari evidenzia un maggior impatto per le categorie di “*formazione di materiale particolato*” e “*consumo di combustibili fossili*”, a causa delle lunghe distanze di trasporto; d’altro canto si riscontra un maggior impatto evitato per la categoria “*tossicità umana*”, grazie agli impatti evitati per lo smaltimento in discarica.

L’analisi Monte Carlo, ottenuta dal confronto degli scenari 2007 e 2013, ha confermato i risultati ottenuti dalla valutazione del danno, ovvero per il 97.7% delle prove l’impianto di compostaggio tradizionale risulta più impattante del nuovo impianto con sistema integrato anaerobico-aerobico. Si ritiene che gli scenari creati rappresentino una buona simulazione dei processi reali, benché in uno studio LCA l’incertezza sia influenzata direttamente dai dati utilizzati per la costruzione del modello. Nell’analisi sono stati utilizzati principalmente dati primari sito-specifici derivanti da report di conduzione dell’impianto e relazioni tecniche inviate ad Enti istituzionali. Ci si attende che variazioni

future circa la composizione dei rifiuti in ingresso, derivanti da un incremento della raccolta differenziata o porta a porta, influiscano positivamente sui risultati relativi alle categorie di danno. Dal punto di vista teorico, il metodo più semplice per ridurre gli impatti sarebbe quello di rendere ancora più efficiente la raccolta differenziata, attraverso la sensibilizzazione e la formazione dei cittadini. Una miglior qualità del rifiuto organico, infatti, implica una riduzione del flusso di materiale non compostabile (CER 19 05 01) verso altri impianti di smaltimento e quindi una riduzione degli impatti ambientali. La presenza di impianti di recupero adeguati negli ambiti territoriali di riferimento, inoltre, ridurrebbe notevolmente le distanze di trasporto con minor consumo di carburante e una riduzione delle emissioni derivanti da tale operazione.

In conclusione, è possibile affermare che studi di valutazione del ciclo di vita, permettono di prevedere, con buona probabilità, quali siano gli aspetti più critici nella fase produttiva, sottolineando i processi più impattanti, in modo da apportare miglioramenti ambientali che a volte si traducono in guadagni economici e di immagine aziendale. A conferma di ciò gli studi di analisi del ciclo di vita stanno aumentando nel settore industriale, assumendo importanza sempre maggiore sia in ambito preventivo che come strumento di innovazione e miglioramento continuo, sempre più rivolto alla sostenibilità ambientale e alla salvaguardia dell'uomo e dell'ambiente.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1386/2013/UE] Decisione n. 1386/2013/UE del parlamento Europeo e del Consiglio del 20/11/2013, Settimo programma di azione per l'ambiente, Gazzetta ufficiale Unione Europea, 2013
- [2008/98/CE] Direttiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19/11/2008, "Direttiva quadro sui rifiuti", Gazzetta ufficiale Unione Europea, 2008
- [2008/01/CE] Direttiva 2008/01/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 15/01/2008, "Direttiva comunitaria sulla prevenzione e la riduzione integrate dell'inquinamento", Gazzetta ufficiale Unione Europea, 2008.
- [APAT, 2005] Agenzia per la protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, Digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti solidi, Manuali e linee guida 13/2005, 2005
- [ARPA, Emilia-Romagna, 2013] ARPA Emilia-Romagna, La gestione dei rifiuti in Emilia-Romagna, Report 2013, 2013
- [Bacenetti et.al, 2013] Bacenetti J., Negri M., Fiala M., González-García S., "Anaerobic digestion of different feedstocks: Impact on energetic and environmental balances of biogas process", Science of The Total Environment, 2013.
- [Boldrin et.al, 2009] Boldrin A., Andersen J., Møller J., Christensen TH., Favoino E., "Composting and compost utilization: accounting of greenhouse gases and global warming contributions", Waste Management & Research, 2009.
- [Burgess et. a, 2001] Burgess A. A., Brennan D. J., Chemical Engineering Science, 2001
- [Cherubini et.al, 2008] Cherubini F., Bargigli S., Ulgiati S., "Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration", Energy, 2008.
- [De Meester et.al., 2012] De Meester S., Demeyer J., Velghe F., Peene A., Van Langenhove H., Dewulf D., "The environmental sustainability of anaerobic digestion as a biomass valorization technology", Bioresource Technology, 2012.
- [DGP 101564/2007] Delibera di giunta provinciale n° 101564 del 27/11/2007, "Autorizzazione impianto Romagna Compost", Provincia di Forlì-Cesena, 2007.
- [DGR 2006/1996] Delibera di giunta regionale n° 1996 del 29/12/2006, "Regolamentazione dell'utilizzo del biostabilizzato ottenuto dalla stabilizzazione aerobica delle matrici organiche dei rifiuti", bollettino ufficiale delle regione Emilia Romagna, 2006.
- [D.lgs 36/2003] Decreto legislativo n° 36 del 13/01/2003, "Attuazione della direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti", Gazzetta ufficiale della Repubblica italiana, 2003.
- [D.lgs 387/2003] Decreto legislativo n° 387 del 29/12/2003, "Attuazione della direttiva 2001/77/CE relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità", Gazzetta ufficiale della Repubblica Italiana, 2003.

[D.lgs. 152/2006] Decreto legislativo n° 152 del 03/04/2006, "Norme in materia ambientale", Gazzetta Ufficiale della Repubblica italiana, 2006.

[D.lgs 128/2010] Decreto legislativo n° 128 del 29/06/2010, "Modifiche ed integrazioni al decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, recante norme in materia ambientale", Gazzetta Ufficiale della Repubblica italiana, 2010.

[D.lgs 205/2010] Decreto legislative n° 205 del 03/12/2010 "Disposizioni di attuazione della direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive", Gazzetta ufficiale della Repubblica italiana, 2010.

[D.lgs. 75/2010] Decreto legislativo n° 75 del 29/04/2010, "Riordino e revisione della disciplina in materia di fertilizzanti", Gazzetta Ufficiale della Repubblica italiana, 2010.

[D.lgs 28/2011] Decreto legislativo n° 28 del 03/03/2011, "Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE", Gazzetta Ufficiale della Repubblica italiana, 2011.

[D.lgs 46/2014] Decreto legislativo n° 46 del 04/03/2014, "Attuazione della direttiva 2010/75/UE relativa alle emissioni industriali (prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento)", Gazzetta ufficiale della Repubblica Italiana, 2014.

[D.M. 29/01/07] Decreto Ministeriale del 29/01/2010, "Emanazione di linee guida per l'individuazione e l'utilizzazione delle migliori tecniche disponibili in materia di gestione dei rifiuti, per le attività elencate nell'allegato I del D.lgs 59/2005", Gazzetta ufficiale della Repubblica Italiana, 2007.

[Evangelisti et.al, 2013] Evangelisti S., Lettieri P., Borello D., Clift R., Life Cycle assessment of energy from waste via anaerobic digestion: a UK case study, Waste Management, 2013.

[Finnveden, 1997] Finnveden G., "Valuation methods within LCA", International Journal of LCA, 1997.

[Franchetti M., 2013] Franchetti M., "Economic and environmental analysis of four different configurations of anaerobic digestion for food waste to energy conversion using LCA for a food service provider case study", Journal of Environmental Management, 2013.

[Guinée. et.al., 2002] Guinée J.B., "Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards", Kluwer Academic Publishers, 2002.

[Goedkoop et.al, 2012] Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts H., De Schryver A., Struijs J., van Zelm R., "ReCiPe 2008", 2012.

[Goedkoop et. al, 1999] Goedkoop MJ, Hofstetter P, Müller-Wenk R, Spriensma R. , "The ECO-indicator 98 explained", The International Journal of Life Cycle Assessment, 1999.

- [Gustavsson et. al. 2011] Gustavsson J., Cederberg C. Sonesson U., Otterdijk R., Meybeck A., Global food losses and food waste, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO),2011
- [Hofstetter, 1998] Hofstetter P., "Perspectives in Life Cycle Impact Assessment: A Structured Approach to combined models of the Technosphere, Ecosphere and Valuesphere", Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [ISPRA, 2014] Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Rapporto rifiuti urbani, Dati di sintesi, 2014.
- [Khoo et.al, 2010] Khoo H., Lim T., Tan R., "Food waste conversion option in Singapore: Enviromental impacts based on an LCA perspective", Science of The Total Environment, 2010.
- [Møller et.a, 2009] Møller J., Boldrin A., Christensen Th., "Anaerobic digestion and digestate use: accounting of greenhouse gases and global warming contribution", Waste Management & Research, 2009.
- [Müller-Wenk, 1998] Müller-Wenk R., "Depletion of abiotic resources weighted on base of virtual impacts of lower grade deposits used in future", IWÖ Schriftenreihe, 1998.
- [Passarini et. al, 2013] Passarini F., Nicoletti M., Ciacci L., Vassura I., Morselli L., "Environmental impact assessment of a WtE plant after structural upgrade measures", Waste Management, 2013.
- [PRé Consultants, 2008] Goedkoop M., De Schryver A., Oele M., Introduction to LCA with SimaPro 7, Prè Consultant, 2008.
- [Righi S. et al, 2014] Righi S., De Maglie F., "Life Cycle Assessment di un impianto integrato di trattamento della frazione organica dei rifiuti. Il caso di Voltana di Lugo (RA)", Tesi di laurea magistrale in Analisi e gestione dell'ambiente, Scuola di Scienza, Università di Bologna, 2013.
- [Roels and Van Gijsegheem, 2011] Roels K., Van Gijsegheem D., Loss and waste in the food chain, Department of Agriculture and Fisheries, Division for Agricultural Policy Analysis, Brussels, 2011.
- [Thompson M. et.al ,1990] Thompson, M., Ellis, R., Wildavsky, A. Cultural Theory, 1990.
- [UNI EN ISO 14040:2006] "Gestione ambientale, valutazione del ciclo di vita, principi e quadro di riferimento", Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), 2006.
- [UNI EN ISO 14044:2006] "Gestione ambientale, valutazione del ciclo di vita, requisiti e linee guida, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), 2006.
- [Vandermeersch et.al,2014] Vandermeersch T., Alvarenga R.A.F., Ragaert P., Dewulf J., "Enviromental sustainability assessment of food waste valorization options", Resources, Conservation and Recycling, 2014.
- [Weidema et. al., 1996] Weidema B. P., Wesnæs M. S., "Dataquality management for life cycle inventories- an example of using data quality indicators" - Volume 4, J. Cleaner Prod.,1996.