

MIGLIORAMENTO DEL PROFILO AMBIENTALE DI UN'AZIENDA DI GESTIONE DI RIFIUTI ATTRAVERSO LA LIFE CYCLE ASSESSMENT

Pietro A. Renzulli^{1,*}, Bruno Notarnicola¹, Giuseppe Tassielli¹, Gabriella Fedele²

¹ Dipartimento Jonico, Università degli Studi di Bari "Aldo Moro", Taranto.

² CISA S.p.A., Contrada Forcellara S. Sergio, 74016 Massafra (TA).

Sommario – Il presente studio illustra l'applicazione della LCA per valutare il profilo ambientale di un'impresa operante nel settore di gestione dei rifiuti nel Comune di Massafra (TA). L'obiettivo specifico è di valutare il profilo ambientale dell'intera organizzazione con un approccio tipo Organisation Environmental Footprint, individuando le fasi del ciclo di vita con le maggiori criticità ambientali, permettendo così di intervenire su tali fasi per ridurre l'impatto ambientale del sistema analizzato. La fase più critica del sistema risulta essere il conferimento in discarica del rifiuto biostabilizzato o del rifiuto speciale non pericoloso, seguita dal trasporto dei rifiuti da terzi. L'analisi ha mostrato che la principale categoria d'impatto interessata dal sistema di trattamento dei rifiuti all'interno degli stabilimenti oggetto di studio è il Cambiamento climatico seguito dalla Formazione di smog fotochimico, Domanda di energia cumulativa, Tossicità umana e Eco-tossicità dell'acqua dolce. Lo studio ha messo in evidenza che l'azienda ha finora già eseguito tutta una serie di attività volte al monitoraggio e al contenimento degli impatti ambientali derivanti dalla propria operatività. Tuttavia è emerso che vi sono comunque ancora aree di possibile miglioramento, come ad esempio lo svolgimento di campagne integrative di monitoraggio delle emissioni dalla discarica tramite la termografia ad infrarosso e l'introduzione di nuove tecnologie nel processo di bio-stabilizzazione.

Parole chiave: trattamento rifiuti, smaltimento rifiuti, LCA, life cycle thinking, biostabilizzazione.

IMPROVING THE ENVIRONMENTAL PROFILE OF A WASTE TREATMENT SYSTEM VIA LIFE CYCLE ASSESSMENT

Abstract – The study entails the application of an LCA to a waste treatment facility located in Massafra in the Apulia region in southern Italy. The objective is that of evaluating the environmental profile of the whole system of the waste treatment company via an Organisation Environmental Footprint approach, with the intent of identifying the most impacting lifecycle phases and of proposing improvement options. The most critical phases are landfilling and transport operations. Such activities impact particularly on the Climate Change, Photochemical Ozone Creation Potential, Cumulative Energy Demand, Human Toxicity and Freshwater Ecotoxicity impact categories. The study has highlighted that there are potential improvement opportunities re-

garding the use of thermographic image processing to identify bio-gas leaks from the landfill and the introduction of novel methods for the bio-stabilisation of the landfilled waste.

Keywords: waste treatment, waste management, LCA, life cycle thinking, bio-stabilisation.

Ricevuto il 16-3-2017. Modifiche sostanziali richieste il 26-4-2017. Correzioni richieste il 14-6-2017. Accettazione il 20-6-2017.

1. INTRODUZIONE

In Europa ogni anno ciascun abitante utilizza circa 16 tonnellate di materia, di cui 6 tonnellate diventano rifiuti (EC 2017). Tale utilizzo di materia è dovuto alla produzione di merci in entrata ai sistemi economici. I sistemi di produzione di queste merci richiedono l'approvvigionamento di risorse naturali dall'ambiente, mentre, l'utilizzo delle merci inevitabilmente produce delle "merci usate" (Nebbia, 2001), di qualità inferiori alle merci iniziali, che spesso devono essere trattate e smaltite nell'ambiente naturale con effetti negativi su di esso.

Sin dal Decreto Ronchi (D.Lgs 22/97) l'approccio del ciclo di vita è stato considerato indispensabile per la valutazione della sostenibilità dei sistemi di gestione integrata dei rifiuti. Il principale strumento che utilizza un approccio integrato di ciclo di vita è la *Life Cycle Assessment* (LCA), che da oltre venti anni, è utilizzata sia dal mondo accademico che da quello delle pubbliche amministrazioni per valutare la sostenibilità dei sistemi di gestione dei rifiuti (McDougall, 2001).

La LCA è anche lo strumento fondamentale per due emergenti metodologie comuni finalizzate alla misura dell'impronta ambientale di prodotti (in inglese *Product Environmental Footprint* PEF) e organizzazioni (in inglese *Organisation Environmental Footprint* OEF) nella prospettiva del ciclo di vita. Queste due metodologie nascono con la Raccomandazione 2013/179/UE. L'obiettivo è quello di ridurre la molteplicità di metodi presenti nei paesi UE nell'interesse degli utilizzatori delle

* Per contatti: via Lago Maggiore angolo via Ancona, 74121 Taranto. Tel. 099.7723011; e-mail: pietro.renzulli@luniba.it.

informazioni in materia di prestazioni ambientali di prodotti e organizzazioni (EC, 2013). L'OEF misura le prestazioni ambientali di organizzazioni che forniscono prodotti o servizi, come ad esempio quelle che trattano e smaltiscono rifiuti, basandosi sul concetto del ciclo di vita che comprende le fasi consecutive e interconnesse di un sistema produttivo.

Il presente studio illustra l'applicazione della LCA per valutare il profilo ambientale dei sistemi di trattamento di rifiuti di un'impresa (CISA SpA, 2017) operante del settore di gestione dei rifiuti nel Comune di Massafra (TA). I sistemi oggetto di studio sono tre e trattano rifiuti di diversa natura con destinazioni differenti.

L'obiettivo specifico del presente lavoro è di valutare i profili ambientali dei tre succitati impianti, sia singolarmente, sia in termini di sistema complessivo (valutando l'intera organizzazione con un approccio tipo OEF). La finalità è di individuare le fasi del ciclo di vita con le maggiori criticità ambientali, permettendo così, in un secondo momento, di intervenire sulle fasi più impattanti per ridurre l'impatto ambientale dei sistemi di trattamento rifiuti analizzati. Inoltre, lo studio è strutturato per la realizzazione di un modello LCA facilmente aggiornabile con dati d'inventario raccolti sul sito di anno in anno per permettere una semplice revisione e rispettiva rivalutazione dei risultati della LCA in futuro.

Il paragrafo 2 presenta il sistema analizzato e le ipotesi alla base degli studi di LCA. Il paragrafo 3 illustra brevemente la fase d'inventario mentre il paragrafo 4 descrive la valutazione degli impatti associati alle fasi del ciclo di vita dei sistemi analizzati. Nell'ultima parte del lavoro si discutono i risultati e si propongono le ipotesi per il miglioramento del trattamento dei rifiuti da parte dell'azienda.

2. CAMPO DI APPLICAZIONE E IPOTESI

Nei tre succitati impianti localizzati nelle contrade Console e San Sergio del Comune di Massafra (TA) e contrada Gravinola del Comune di Statte (TA) sono gestite tonnellate di circa 542.000 tonnellate di rifiuto nel 2015.

2.1. Funzioni dei tre impianti e l'unità funzionale

I tre impianti oggetto di studio hanno tutti la funzione di trattare rifiuti (intesa come trattamento e/o smaltimento). La natura e la destinazione finale dei rifiuti varia in quanto:

- nell'impianto di contrada Console avviene il trattamento di Rifiuti Solidi Urbani (RSU) e rifiuti solidi assimilabili agli urbani (oltre 227.000 t/anno di rifiuti gestiti) che dopo trattamento sono conferiti nella discarica di servizio con annessi impianti di produzione di energia elettrica per il recupero del biogas di discarica;
- nell'impianto di contrada San Sergio avviene la produzione di Combustibile Solido Secondario (CSS) o di Frazione Secca Combustibile (FSC) mediante attività di recupero di rifiuti speciali non pericolosi (circa 96.000 t/anno di rifiuti gestiti);
- nell'impianto di contrada Gravinola sono inerti e smaltiti, mediante avvio in discarica, rifiuti speciali non pericolosi (RSNP) (oltre 219.000 t/anno di rifiuti gestiti).

Pertanto, l'unità funzionale utilizzata per le LCA dei tre impianti è definita come il trattamento di una tonnellata di rifiuto in ingresso al singolo impianto.

2.2. Il sistema analizzato

Il sistema oggetto di studio è illustrato nella Figura 1 che lo suddivide in processi *upstream* che av-

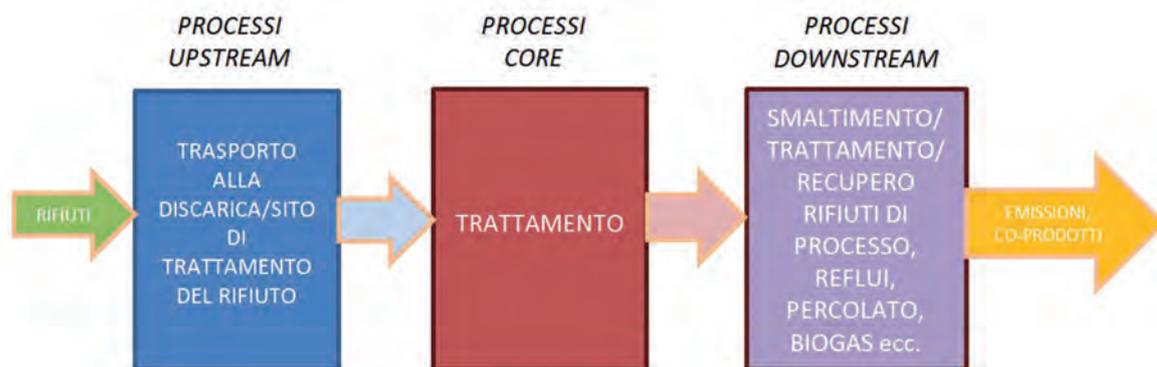


Figura 1 – Suddivisione del sistema analizzato in processi principali

vengono fuori dai siti dell'azienda, in processi *core* che avvengono negli impianti sopra descritti per trattare i rifiuti ed in processi *downstream* che rappresentano le operazioni necessarie dopo il trattamento dei rifiuti.

Quindi, le fasi dei sistemi considerati includono il trasporto del rifiuto dal produttore sino agli impian-

ti, il suo trattamento e/o smaltimento, la manutenzione degli impianti, lo smaltimento/trattamento/recupero dei rifiuti di processo e nel caso delle discariche di C.da Console e C.da Gravinola le operazioni necessarie per la post gestione delle discariche.

La Figura 2, la Figura 3 e la Figura 4 illustrano i confini dei tre differenti sistemi analizzati e i rela-

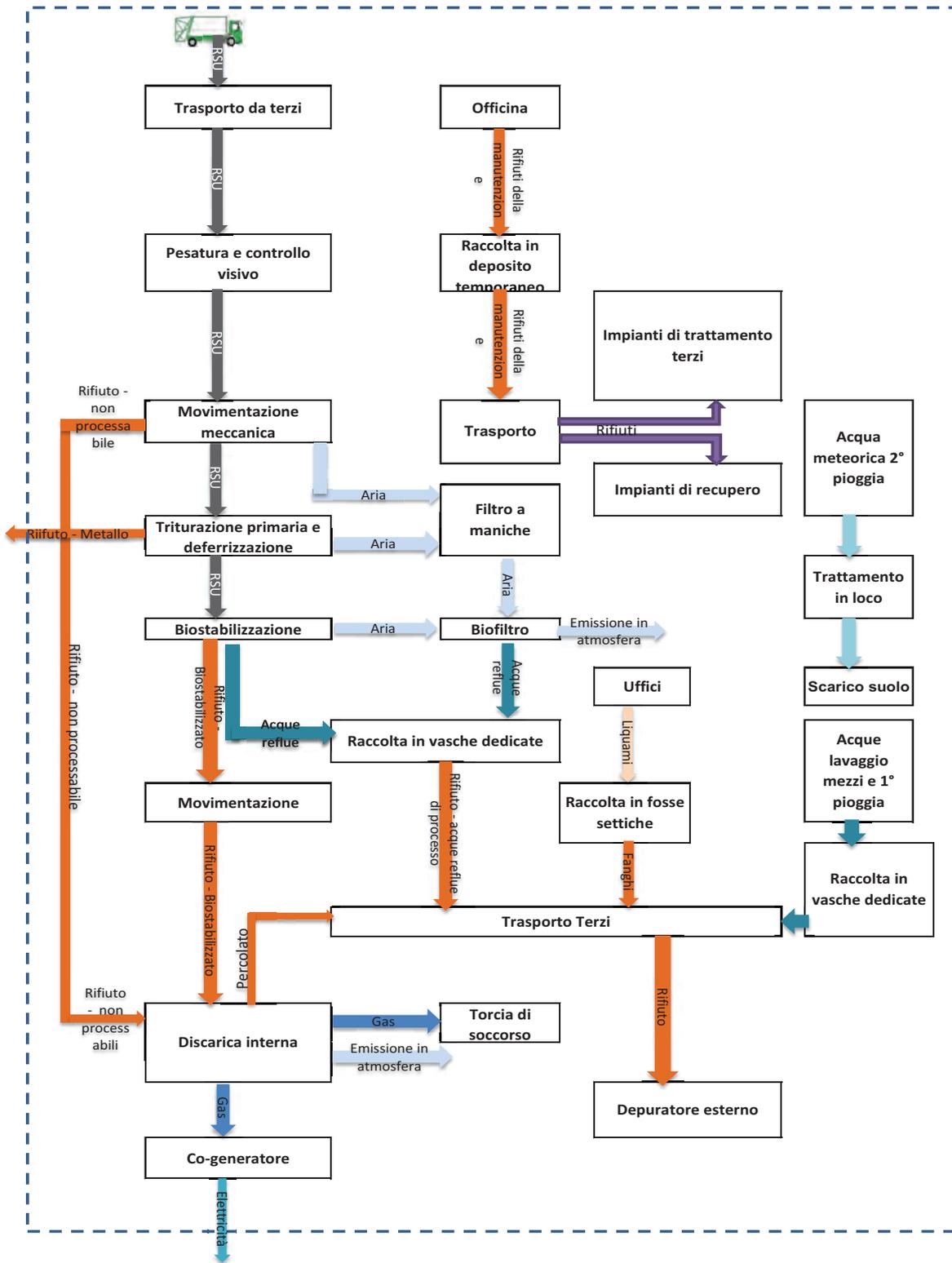


Figura 2 – Confine del sistema di contrada Console (trattamento RSU)

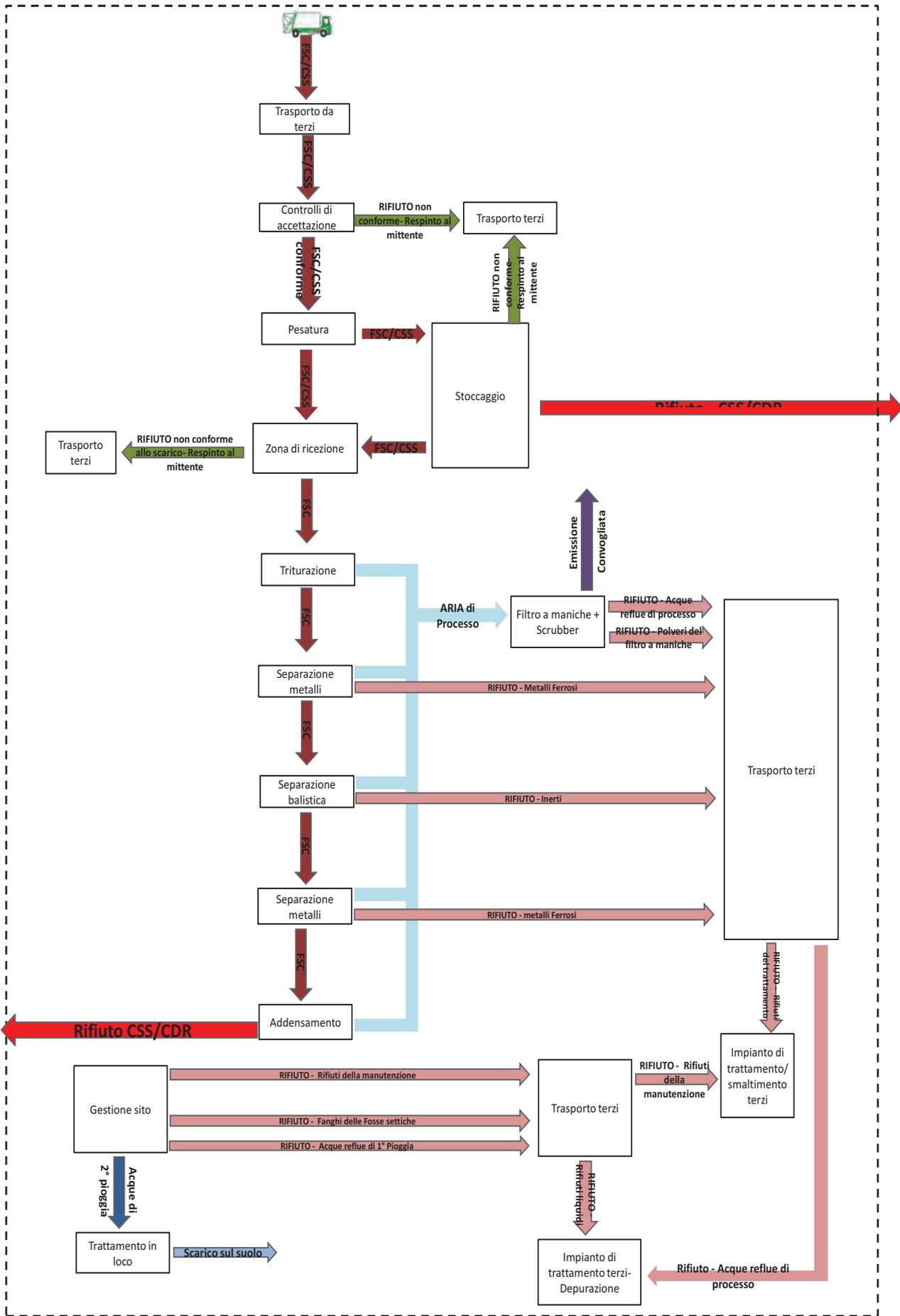


Figura 4 – Confine del sistema di contrada San Sergio (produzione CSS)

2.3. Regole di allocazione

Gli impianti di trattamento dei rifiuti si possono considerare come dei sistemi di servizio in quanto non sono indirizzati alla produzione di un prodotto ma allo svolgimento di un servizio. In alcuni casi (come ad esempio nel caso di C.da San Sergio e C.da Console) vi possono essere dei co-prodotti che escono dal sistema di servizio analizzato (e.s. energia elettrica o CSS). Pertanto, nel caso di allocazione degli impatti tra il servizio svolto dal sistema e i co-prodotti, a volte è solo possibile compiere tale ripartizione in termini economici e non di massa.

Nello specifico, nel presente studio si sono valutati i risultati della LCA applicando i seguenti due approcci inerenti all'allocazione degli impatti ambientali, generando così due scenari di studio:

- 1) nel primo scenario tutti gli impatti sono stati allocati al servizio svolto dal sistema (trattamento dei rifiuti);
- 2) per generare uno scenario di confronto il sistema analizzato è stato poi espanso per tenere conto delle coproduzioni e dei loro crediti/debiti in termini di impatto ambientale. Tali debiti e/o crediti ambientali derivano dalla produzione di energia elettrica da biogas/fonti rinnovabili o di combustibile solido secondario, in alternativa alla produzione di energia elettrica dalla rete nazionale o di combustibili fossili convenzionali (si veda il paragrafo 2.6.3).

Per tutti i rifiuti recuperati (es. metallo, batterie esauste, ecc.), che escono dai sistemi e che devono essere trattati prima del loro riutilizzo in altri ambiti, gli impatti ambientali derivanti da tale trattamento e riutilizzo non vengono considerati, così come suggerito dalle Product Category Rules (PCR) della EPD® per i sistemi di gestione dei rifiuti (EPD, 2008). Sono invece considerati i trasporti di tali rifiuti dagli impianti al sito di trattamento e recupero. Sempre in accordo con le succitate PCR, sono stati considerati gli impatti dovuti al trattamento da parte di terzi del percolato da discarica escludendo gli impatti associati al trattamento dei derivanti fanghi.

2.4. Fonti dei dati

I dati raccolti per ciascuna unità di processo indicata in precedenza riguardano il consumo energetico in varie forme, il consumo di materie prime e di materiali ausiliari, l'emissione di sostanze inquinanti in atmosfera, acqua e suolo.

I dati di foreground sono stati forniti direttamente dall'impresa committente, sono riferiti all'anno

2015 e sono stati comparati con quelli di letteratura. Laddove non si è potuto disporre di dati primari, sono stati utilizzati dati provenienti da banche dati LCA (e.s. Ecoinvent v.2) o da altre fonti bibliografiche che sono illustrate nei paragrafi riguardanti l'inventario specifico di ciascun impianto. I dati di background sono stati presi dalle succitate banche dati di LCA. È stata inoltre eseguita un'analisi di qualità dei dati e un'analisi di coerenza dei dati. La copertura temporale dei dati non forniti direttamente dall'impresa committente è di dieci anni.

I dati d'inventario di ogni processo che singolarmente rappresentavano meno dell'1% del corrispettivo valore complessivo di un input/output del sistema analizzato, sono stati esclusi dallo studio (cut-off). Tale valore deriva dalle indicazioni delle PCR dei sistemi di gestione dei rifiuti (EPD, 2008). Un'analisi di sensibilità è stata svolta per valutare l'attendibilità dei dati per i quali è associato un possibile range di valori (es. percentuale di captazione del biogas). Inoltre è stata svolta un'analisi d'incertezza per verificare l'attendibilità dei risultati finali.

2.5. Valutazione degli impatti

Il metodo di valutazione degli impatti implementato è quello proposto dalle linee guida dell'International Reference Life Cycle Data System (JRC, 2010) – ILCD 2011 Midpoint+. Tra i molteplici impatti ambientali proposti dal metodo, sono stati considerati nel presente studio quelli maggiormente rilevanti, ovvero:

- Cambiamento climatico – *Climate Change* (CC).
- Acidificazione – *Acidification potential* (A).
- Riduzione dello strato di ozono – *Ozone Depletion* (OD).
- Formazione di smog fotochimico – *Photochemical Ozone Formation* (POF).
- Effetti non cancerogeni sulla salute umana – *Human Toxicity non Cancer Effects* (HTNC).
- Effetti cancerogeni sulla salute umana – *Human Toxicity Cancer Effects* (HTC).
- Eco-tossicità dell'acqua dolce – *Freshwater Ecotoxicity* (FEC).
- Eutrofizzazione in acqua dolce – *Freshwater Eutrophication* (FEU).

Tali categorie sono state integrate dalla *Cumulative Energy Demand* (CED – Domanda di energia cumulativa) che rappresenta un indicatore di immediata comprensione del consumo di energia primaria derivante dal sistema oggetto di studio (Hischer et al., 2010).

La normalizzazione è stata calcolata su base europea, mentre la pesatura è stata svolta con un set di pesi uguali. Il set di normalizzazione per le categorie del metodo ILCD è quello sviluppato sempre in sede europea per il supporto alle *Environmental Footprints* (Benini et al., 2014). Per la quantificazione del fattore di normalizzazione della CED si è impiegato il dato di consumo di energia primaria in EU-28 nel 2014 pari a 1.605,9 Mtep (EUROSTAT, 2016).

2.6. Ipotesi e assunzioni

2.6.1. Copertura temporale

Gli impatti ambientali associabili al ciclo di vita di un sistema di gestione di rifiuti possono teoricamente avvenire a lungo termine (long-term) in quanto nella discarica può verificarsi un rilascio di inquinanti (seppur ridotto) anche dopo centinaia di anni dalla chiusura. Il presente studio è strutturato come una short-term LCA così come anche suggerito dalle Product Category Rules (PCR) della EPD® per i sistemi di gestione dei rifiuti (EPD, 2008), e quindi considera solo gli effetti del sistema sull'ambiente durante il suo funzionamento e sino a 30 anni dopo la chiusura della discarica (post-gestione).

2.6.2. Mix elettrico e trasporti

Per la modellazione dell'inventario dell'energia elettrica consumata è stato usato come riferimento il mix elettrico italiano del 2015 (MISE, 2015). Per tutti i trasporti e le movimentazioni dei rifiuti, che avvengono sia all'interno che all'esterno degli impianti, i dati d'inventario pertinenti (utilizzo di carburante da parte degli automezzi ed emissioni) sono quelli dei database LCA Ecoinvent. Per ciascun trasporto è utilizzata una scheda dati pertinente al mezzo utilizzato per tale trasporto (es. autocarro, autocompattatore, pala meccanica ecc.). Nel caso dell'impianto di contrada Console si è ipotizzato un trasporto del rifiuto al sito di trattamento tramite au-

tocompattatori. Nel caso degli impianti delle c.de Gravinola e San Sergio si è ipotizzato un trasporto del rifiuto al sito di trattamento tramite autocarro con capacità di oltre 32 tonnellate.

2.6.3. Crediti e debiti ambientali derivanti dalla produzione di energia elettrica o di combustibile solido secondario

Come accennato nel paragrafo 2.3 il presente studio ha anche valutato uno scenario in cui si è espanso il sistema analizzato per tenere conto dei crediti e/o debiti in termini ambientali derivanti dalla produzione di energia elettrica o di combustibile solido secondario. La metodologia per tale valutazione è quella descritta nella ISO 14044 riguardante l'espansione dei confini del sistema. L'utilizzo del biogas per la produzione di energia elettrica genera un credito ambientale proveniente dall'energia elettrica evitata in seguito alla captazione del biogas, ossia l'impatto che si sarebbe verificato se l'energia elettrica fosse stata prodotta non dal biogas ma in accordo con il mix elettrico italiano (MISE, 2015).

La produzione di CSS genera un debito ambientale poiché si deve tenere conto del trattamento del rifiuto (che avviene in impianti terzi) necessario alla produzione della frazione secca combustibile in ingresso al sito di contrada San Sergio. In maniera analoga la produzione di CSS genera un credito ambientale proveniente dalla produzione evitata di combustibili convenzionali sostituiti dal CSS stesso. Per la stima del debito della produzione di CSS proveniente da impianti terzi si è considerato un ciclo produttivo simile a quello svolto in C.da Console per la produzione di biostabilizzato, integrato con i consumi del processo di produzione del CSS. Per la stima dell'impatto evitato, invece, è stata calcolata la quantità evitata di combustibili convenzionali in sostituzione di 1 kg di CSS dal potere calorifico inferiore di 16,1 MJ/kg utilizzato per la produzione di energia elettrica, come evidenziato in Tabella 1.

Tabella 1 – Calcolo della quantità evitata di combustibili convenzionali in sostituzione di 1 kg di CSS dal PCI di 16,1 MJ/kg

Combustibili	Contributo nel mix elettrico nazionale per la produzione termoelettrica	Contributo nel mix elettrico nazionale per la produzione termoelettrica	Suddivisione del PCI di 1kg di CSS	PCI dei combustibili	Quantità equivalente evitata di combustibili
	Mtep	%	MJ	MJ/kg	kg
Gas naturale	17,111	57%	9,20	50	0,18
Carbone	10,608	35%	5,70	30	0,19
Olio combustibile	2,233	8%	1,20	41,9	0,03
Totale	29,952	100%	16,1		

I dati sono stati ricavati dal bilancio energetico nazionale riferito al 2015 (MISE, 2015).

2.6.4. Bilancio del carbonio e produzione del biogas di discarica

Al fine di poter valutare la sostenibilità ambientale dei sistemi oggetto del presente studio di LCA in maniera completa, è necessario redigere il bilancio di carbonio associato ai tre impianti. Per far ciò si pongono due problemi da risolvere:

- 1) individuare le quantità e l'origine del carbonio in entrata, contenuto nel rifiuto;
- 2) stimare quantità e forma del carbonio in uscita dai confini dei sistemi.

Quest'aspetto è particolarmente rilevante per i sistemi delle c.de Console e Gravinola dove avviene la formazione di biogas nelle discariche.

2.6.5. Stima del carbonio in entrata

Come punto di partenza è stato calcolato il contenuto del carbonio nei rifiuti conferiti agli impianti. Per effettuare tale stima per ogni frazione merceologica di rifiuto in ingresso agli impianti, è stata valutata la percentuale (in termini di massa) di contenuto di carbonio; i valori usati rientrano nei range consigliati nelle linee guida Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006) sui rifiuti solidi urbani e nei documenti della Environmental Protection Agency degli Stati Uniti d'America (EPA, 2010) sui rifiuti industriali. Tali valori sono anche stati paragonati con quelli di altre fonti trovate in letteratura (Lamlom e Savidge, 2003). Con la stessa metodologia è stata stimata anche la quota di carbonio biogenico del carbonio totale, che sarà utile per la stima delle emissioni.

2.6.5.1. Formazione del biogas dal trattamento rifiuti e dalla discarica

Il carbonio (e altri elementi) contenuto nei rifiuti, durante il trattamento (es. biostabilizzazione del RSU) e soprattutto dopo il conferimento in discarica del rifiuto, viene parzialmente emesso sotto forma di biogas. Secondo le succitate linee guida IPCC ed EPA, il carbonio che potenzialmente può essere biodegradato (Degradable Organic Carbon – DOC) esclude il carbonio non biogenico contenuto nella plastica, nei tessili, negli inerti e nei metalli. Pertanto, per i calcoli della trasformazione del carbonio in biogas sono state considerate solo le quantità di carbonio biogenico.

Una prima quota di carbonio viene persa durante la fase di biostabilizzazione (C.da Console); per il

calcolo della parte del carbonio in uscita sotto forma di gas, si è tenuto conto delle stime del database LCA ANPA (ANPA, 2000), che indicano che per ogni tonnellata di rifiuto biostabilizzato prodotto corrisponde un rilascio di 59kg di CO₂ (prodotto attraverso una prima digestione aerobica del rifiuto, che avviene nelle celle della biostabilizzazione).

La formazione di biogas nella discarica avviene principalmente attraverso i processi di fermentazione anaerobica del rifiuto conferito. Il processo che si sviluppa in tre principali passaggi (idrolisi, acidificazione e metanizzazione) dà origine principalmente a CH₄ e CO₂ oltre che a piccole quantità di O₂, NH₃, H₂S e altri gas. Il complesso processo di digestione avviene su un periodo che dura più anni (tipicamente non meno di 30 anni) ed è fortemente dipendente dalla composizione dei rifiuti presente in discarica. Da un punto di vista di ciclo di vita del rifiuto è pertanto necessario quantificare tutto il biogas emesso attraverso la digestione anaerobica del rifiuto durante questo periodo.

Per la stima del biogas di discarica si è proceduto con la seguente metodologia e con le seguenti assunzioni:

- Gli studi della Environmental Protection Agency degli USA (EPA, 2005) e dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006), indicano un valore di circa il 50% per la DOCF (Fraction of Degradable Organic Carbon), ovvero la quantità di carbonio organico biogenico che effettivamente subirà dei processi di biodegradazione.
- Quindi, per il presente studio, si è assunto che il 50% del carbonio biogenico subirà biodegradazione nel ciclo di vita esaminato (30 anni). Per calcolare la quota di carbonio disponibile per la trasformazione in biogas, alla quantità totale di carbonio biodegradato (50% del totale) andrà sottratta la quantità persa durante la biostabilizzazione. Tale correzione è valida per il sito di C.da Console mentre non sarà effettuata per il sito di contrada Gravinola dove non avviene la biostabilizzazione del rifiuto.
- In merito alla composizione del biogas, si è assunto che mediamente (nel lungo periodo), il 50% del carbonio darà luogo a metano, mentre il restante 50% formerà anidride carbonica (EPA, 2016).
- Poiché dalle analisi della composizione del biogas fornite dall'impresa committente risultano presenti (in determinate proporzioni) anche so-

stanze quali acido solfidrico, ammoniaca, idrogeno, composti organici volatili e altro, si è ipotizzato che oltre al metano e anidride carbonica, dalla discarica verranno emesse altre sostanze in forma gassosa in quantità pari al:

- 10% del volume totale di biogas emesso dalla discarica di C.da Console;
- 20% del volume totale di biogas emesso per la discarica di C.da Gravinola.
- Per quanto concerne la captazione del biogas di discarica, dai dati primari forniti, risulta una stima della percentuale di captazione pari mediamente a circa il 50% del biogas totale prodotto. La parte captata sarà bruciata mentre la restante parte sarà emessa in atmosfera direttamente.
- Il biogas captato nella discarica di C.da Gravinola è bruciato tutto in una torcia dando luogo prevalentemente alla formazione di CO₂ e H₂O oltre che a quantità modeste di altri gas.
- Il biogas captato nella discarica di C.da Console, verrà principalmente bruciato in un cogeneratore (per produrre energia elettrica) oppure sarà bruciato tramite una torcia quando le caratteristiche chimiche (e.s. contenuto di CH₄, solfuro di idrogeno e potere calorifico inferiore) del gas sono inferiori alle soglie dettate dalla normativa vigente. Il presente studio ipotizza (anche alla luce del fatto che la produzione predominante di gas avviene nei primi 10 anni dopo il conferimento del rifiuto, (ATSDR, 2008)) che circa l'80% del gas captato sarà bruciato nel cogeneratore e il 20% sarà bruciato nella torcia. Tali combustioni (si ipotizza di tipo completo) daranno principalmente luogo alla formazione di CO₂ e H₂O oltre che a quantità modeste di altri gas.
- La CO₂ emessa in fase di biostabilizzazione, dalla discarica (CO₂ non captata) e dalla combustione (alla torcia e al cogeneratore) del biogas, proviene dall'ossidazione del carbonio biogenico. Si tratta quindi di CO₂ biogenica a cui è stata attribuito un fattore di caratterizzazione nullo per la categoria cambiamento climatico.
- Per il metano biogenico si utilizzerà un fattore di caratterizzazione inferiore a quello del metano di origine fossile per tenere conto della CO₂ assorbita durante il processo di fotosintesi. Nello specifico, il fattore di caratterizzazione del CH₄ biogenico è pari a 27,75 kgCO₂eq/kg per un orizzonte temporale di 100 anni (IPCC, 2013).

2.6.5.2. Verifica della formazione di biogas da discarica

Nella letteratura scientifica sono descritti svariati modelli numerici per la stima delle emissioni di

biogas dalle discariche come ad esempio quello sviluppato dall'IPCC (IPCC, 2006) e quello dell'EPA "LandGEM" (EPA, 2005). Tali modelli sono complessi e si basano su assunzioni che non sempre rispecchiano le condizioni operative di una specifica discarica. Per di più, presentano un gran numero di parametri da fissare per la modellizzazione delle emissioni di biogas. Al fine di fornire al committente del presente studio uno strumento semplice ma efficace per la stima (aggiornabile nel tempo con i dati d'impianto) dell'impatto ambientale del proprio sistema di prodotto, si è scelto di usare il modello dell'EPA solo come strumento di verifica del modello semplificato illustrato nei precedenti paragrafi.

2.6.6. Produzione del percolato di discarica

La formazione e raccolta del percolato dipende dalla geomorfologia della discarica, dalle precipitazioni atmosferiche e dalla composizione del rifiuto conferito. La modellazione della raccolta e gestione del percolato nel tempo (inclusa la post gestione della discarica) è pertanto complessa (Astrup et al., 2006). Dall'analisi dei dati inerenti al percolato si è osservato quanto segue. Le due discariche in post gestione in C.da Console, adiacenti a quella in servizio oggetto di studio, rilasciano annualmente quantitativi di percolato estratto di almeno un ordine di grandezza inferiore a quelli prodotti ed estratti nello stesso periodo dalla discarica in attività. Inoltre, dall'analisi della produzione di percolato captato dalla discarica in attività non si è notato un incremento della produzione di percolato negli anni, anzi, con maggiori quantitativi conferiti in alcuni anni il percolato prodotto è stato meno che quello degli anni precedenti.

Nel presente studio, al fine di semplificare la stima della produzione del percolato estratto, considerato quanto sopra esposto, si è ipotizzato quanto segue:

- Il percolato raccolto nel 2015 rappresenta la quantità prodotta durante tutto il periodo di gestione/servizio della discarica, attribuibile al rifiuto conferito nel 2015. Nella realtà tale quantitativo include anche i piccoli quantitativi derivanti dal conferimento di rifiuti avvenuto in precedenza ed esclude le quantità che saranno emesse dal rifiuto del 2015 negli anni successivi. L'ipotesi semplificativa, quindi, controbilancia questi due effetti.
- Il percolato prodotto durante il periodo di post gestione (30 anni dalla chiusura della discarica),

attribuibile al rifiuto conferito nel 2015, sarà uguale al succitato quantitativo prodotto durante il periodo in cui la discarica è in servizio.

- Si è ipotizzata una captazione del 100% del percolato prodotto nel tempo (sino al 30° anno di post-gestione).
- Il percolato raccolto è trattato in un sito specifico che abbatte i livelli dei contaminanti del 98% (valore ipotetico). Tale sistema di trattamento dei reflui è stato utilizzato anche per tutte le acque di scarico di processo (es. acqua lavaggio mezzi, acqua di prima pioggia, ecc.). Per il calcolo degli impatti ambientali, associati a questo sistema di abbattimento, dovuti all'uso di energia e risorse, è stato utilizzato un modello precedentemente usato nello studio di Notarnicola et al. (2007).
- Ai fanghi ottenuti dai processi di trattamento delle acque di percolato non è stato attribuito nessun carico ambientale, come suggerito dalle PCR del trattamento dei rifiuti (EPD, 2008).

3. L'INVENTARIO

In questa fase sono eseguite tutte attività di classificazione e registrazione ordinata e particolareggiata di tutti i flussi di materia e di energia che fanno parte del sistema considerato, che comprende l'estrazione e la lavorazione delle materie prime, il trasporto e la distribuzione, il trattamento dei rifiuti e lo smaltimento finale.

Per brevità nella Tabella 2 sono illustrati solo i principali dati d'inventario associati ai tre siti oggetto di studio. Questi dati sono attribuibili al rifiuto conferito in ciascun sito nell'anno 2015.

Per quanto concerne le quantità indicate di biogas, percolato ed energia elettrica prodotta da biogas, esse rappresentano il totale nel tempo sino ai 30 anni successivi alla chiusura delle rispettive discariche.

4. LA VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI

La successiva fase del *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) comporta il calcolo degli impatti ambientali, riferiti all'intero ciclo di vita, derivanti dall'uso di risorse e energia oltre che alle emissioni in aria, acqua e suolo dei sistemi di trattamento dei rifiuti sopra illustrati.

La Figura 5 mostra il confronto fra gli eco-indicatori riferiti a 1 t di rifiuto conferito rispettivamente nei tre siti. Si tratta naturalmente di rifiuti differenti:

- RSU nel sito di C.da Console;
- RSNP nel sito di C.da Gravinola;

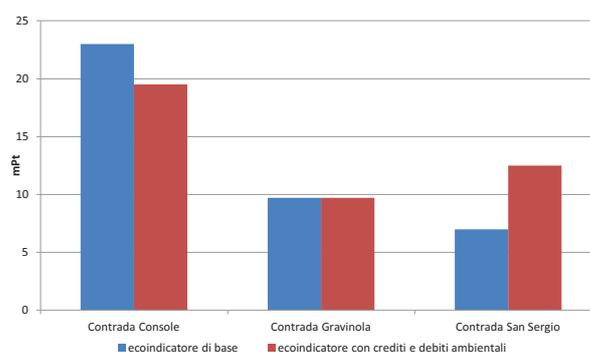


Figura 5 – Eco-indicatore riferito a 1 t di rifiuto conferito rispettivamente nei tre siti e confronto con la situazione che include i debiti-crediti ambientali

Tabella 2 – Principali dati d'inventario associati ai tre siti oggetto di studio (dati attribuibili al rifiuto conferito nel 2015)

	Sito di contrada Console	Sito di contrada Gravinola	Sito di contrada San Sergio
Rifiuto in entrata (t)	227.098	219.252	95.627
Tonnellate-chilometro (t.km) associate al rifiuto in entrata (trasporto da parte di terzi)	11.753.347	24.099.025	4.360.573
Biostabilizzato prodotto (t)	201.272	-	-
Consumo di gasolio all'interno del sito (litri)	505.663	296.948	54.726
Consumo di energia elettrica del sito (kWh)	3.867.281	273.539	4.243.092
Biogas prodotto (mc)	36.988.306	15.068.813	-
Biogas captato (50% di captazione) (mc)	18.494.153	7.5344.07	-
Percolato prodotto (t)	12.076	33.962	-
CSS prodotto (t)	-	-	71.892
Energia elettrica prodotta tramite biogas (kWh)	16.866.668	-	-

Tabella 3 – Risultati di caratterizzazione ed eco-indicatore della OEF dell'azienda per il totale di rifiuti conferiti nel 2015

	Caratterizzazione		Ecoindicatore	
	Unità	Risultati di caratterizzazione	Unità	Ecoindicatore
Domanda di energia cumulativa	MJ eq	4,43E+08	kPt	1,089
Cambiamento climatico	t CO ₂ eq	2,52E+05	kPt	3,054
Acidificazione	molc H ⁺ eq	194338,9	kPt	0,451
Riduzione dello strato di ozono	kg CFC-11 eq	3,473082	kPt	0,018
Formazione di smog fotochimico	kg NMVOC eq	351088,5	kPt	1,217
Effetti non cancerogeni sulla salute umana	CTUh	2,184632	kPt	0,451
Effetti cancerogeni sulla salute umana	CTUh	0,309603	kPt	0,923
Eco-tossicità dell'acqua dolce	CTUe	53536745	kPt	0,671
Eutrofizzazione in acqua dolce	kg P eq	753,3618	kPt	0,056
Totale			kPt	7,930

• CSS e/o frazione secca combustibile da stoccare e rilavorare nel sito di C.da San Sergio. Pertanto anche i risultati sono molto differenti fra loro. Il primo istogramma riferito ai tre siti mostra che smaltire 1 t di RSU nel sito di C.da Console provoca un impatto ambientale superiore rispetto allo smaltimento di 1 t di RSNP o al trattamento di 1 t di CSS. Il secondo istogramma considera anche i crediti ambientali per la produzione di energia elettrica, per il sito di C.da Console, e i debiti e crediti ambientali per la produzione di CSS riferiti al sito di San Sergio. Nel sito di Gravinola non sono previsti recuperi energetici e quindi non vi è alcun credito ambientale. Si evince che lo smaltimento di 1 t di RSU resta più impattante rispetto agli altri due casi sebbene se ne riduca l'impatto complessivo. Il profilo ambientale di San Sergio, invece, peggiora in quanto il trattamento di RSU per la produzione di CSS produce un impatto ambientale maggiore del credito generato dall'aver prodotto un combustibile alternativo. Ciò è dovuto al fatto che anche nella produzione di CSS una quota consistente di rifiuto viene conferita in discarica con tutti gli impatti connessi alla stessa. Considerando l'intero ciclo di vita dei diversi trattamenti, comunque, il trattamento di RSU per la produzione di CSS produce un impatto inferiore a quello dell'avvio in discarica del biostabilizzato e recupero di maggiori quantità di biogas per usi energetici. Partendo da tali dati è possibile ottenere l'Organization Environmental Footprint dell'impresa oggetto di studio. Moltiplicando l'impatto di una singola tonnellata conferita ai rispettivi siti per il totale delle tonnellate conferite, si ottiene il profilo ambientale complessivo dell'organizzazione. Tale profilo è rappresentato in Tabella 3 ed è riferito al

conferimento complessivo di 541.977 t di rifiuti diversi ai 3 siti (227.098 t di RSU, 219.252 t di RSNP, 95.627 t di CSS) nel 2015. La tabella riporta sia i risultati di caratterizzazione sia quelli di valutazione degli impatti con l'eco-indicatore finale che non include i crediti-debiti ambientali. A titolo esemplificativo, l'intera organizzazione per il trattamento delle 541.977 t di rifiuti conferiti nel 2015 è responsabile dell'emissione di 252.000 t di CO₂eq. lungo l'intero ciclo di vita di tali rifiuti (tali emissioni non avvengono quindi nel solo 2015 ma fino a 30 anni dopo la chiusura degli impianti). La Figura 6 suddivide l'OEF della impresa/organizzazione nei contributi dei tre siti. I dati per semplicità sono riferiti non alle 541.977 t conferite nel 2015 ma a 1 t di rifiuto in ingresso all'impresa. Si evince chiaramente il maggior contributo all'impatto dell'azienda generato dal sito di Contrada Console su tutte le categorie, con range variabili dal 51% (HTC) al 75% dell'OD, ad eccezione del FEC dove è maggiore l'impatto del sito di Gravinola (42% contro 36% del sito di Contrada Console). I maggiori impatti del sito di Contrada Console sono dovuti ai maggiori volumi di rifiuti smaltiti in discarica e alla loro composizione che provoca l'emissione di una quantità superiore di biogas oltre che ai relativi trasporti dei rifiuti da terzi. Il sito di San Sergio risulta essere il sito con il minore contributo a tutte le categorie di impatto a causa dell'assenza della discarica e dei relativi impatti oltre che per il fatto che tratta un minor quantitativo di rifiuti. Il profilo normalizzato dei tre siti, riportato in Figura 7, mostra come le categorie di impatto maggiormente rilevanti per il sistema siano il CC, se-

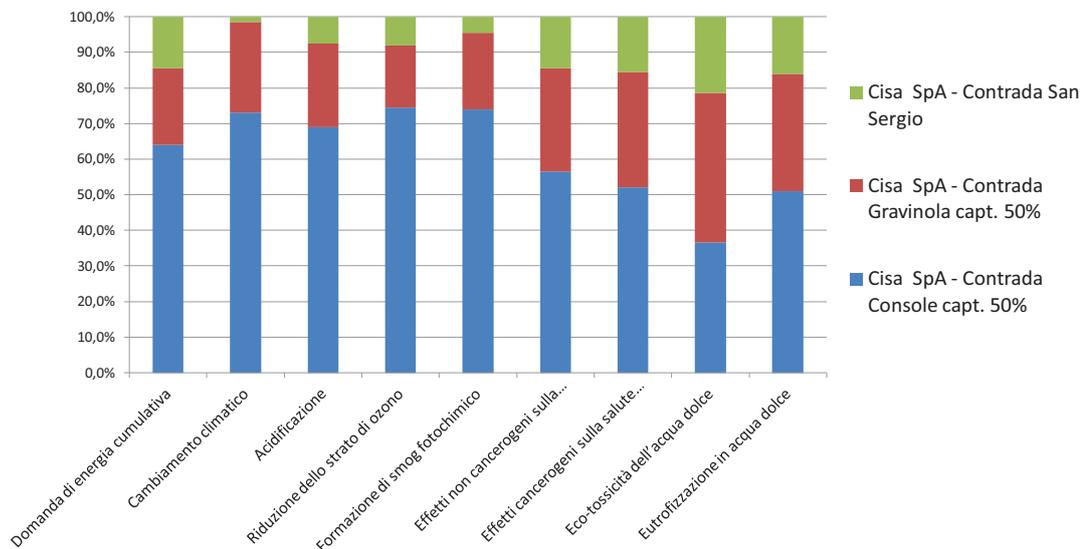


Figura 6 – Contributo dei tre siti all'OEF in termini di caratterizzazione

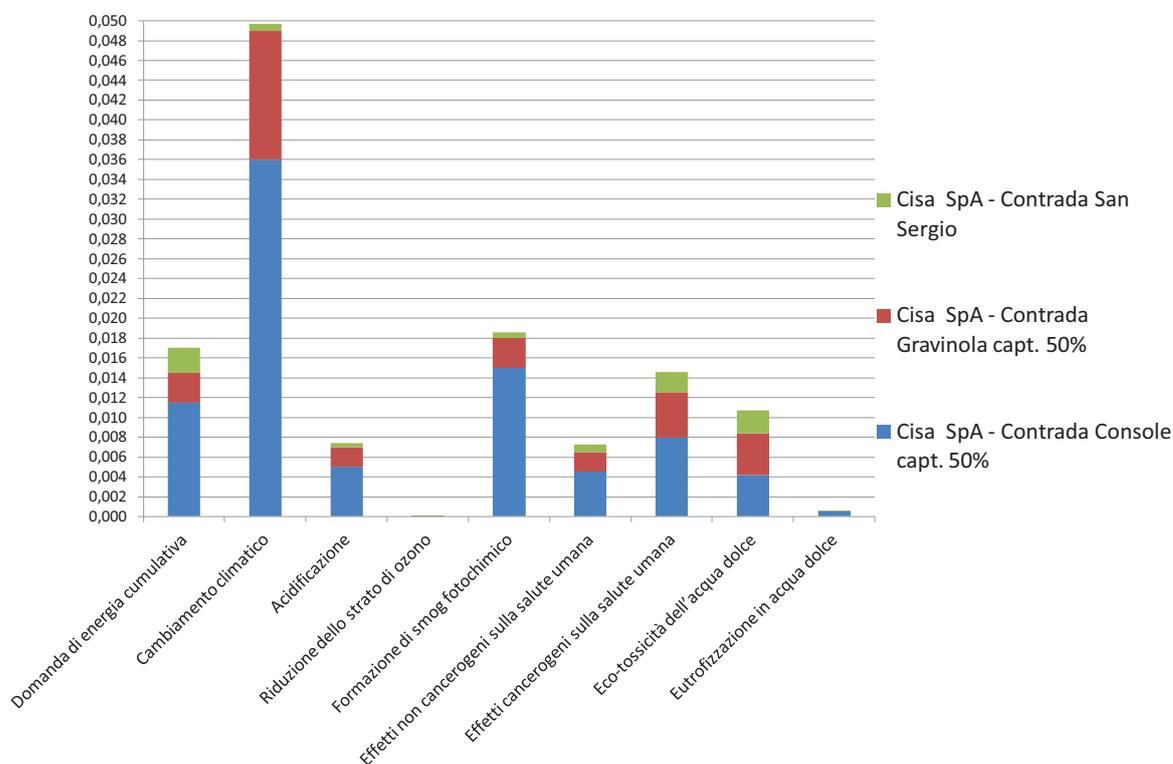


Figura 7 – Profilo normalizzato dei tre siti

guito da POF, CED e HTC, come succede nel singolo caso di Contrada Console.

Nella Figura 8 gli indicatori sono stati riportati in ordine di macro processo. Si evince chiaramente che i macro processi maggiormente impattanti sono la gestione della discarica e il trasporto da terzi relativi al sito di Contrada Console (dovuti ai maggiori volumi di rifiuti smaltiti in discarica e alla loro composizione che provoca l'emissione di una quantità superiore di biogas) seguiti dalla gestione della discarica e dal trasporto da terzi di Gravinola.

In Figura 9 gli indicatori sono stati aggregati tra i siti e divisi tra i macro processi. Risulta evidente che le discariche dei due siti su tre hanno il maggior impatto, in particolar modo sul CC, seguiti dai trasporti e poi, con un notevole divario dai processi produttivi e dalle attività di supporto. A differenza delle discariche dove il CC impatta per oltre il 75% sull'indicatore totale, nei trasporti le categorie più impattanti sono CED, POF, HTC, FEC. La Figura 10 riporta il profilo complessivo in termini di eco-indicatori dei tre siti, e quindi la OEF

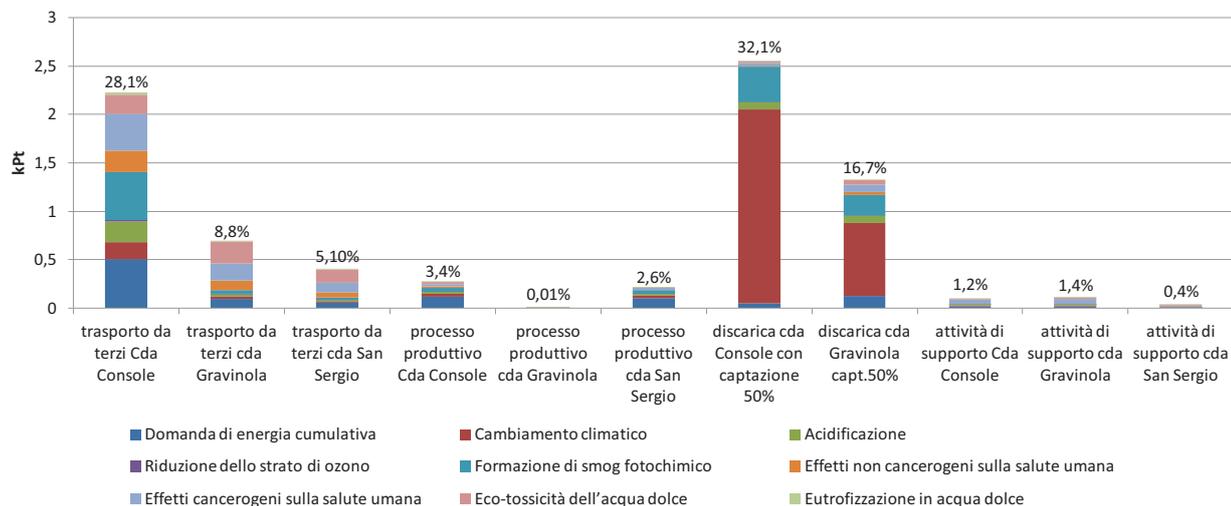


Figura 8 – Suddivisione degli indicatori per ciascun macro processo di ciascun impianto

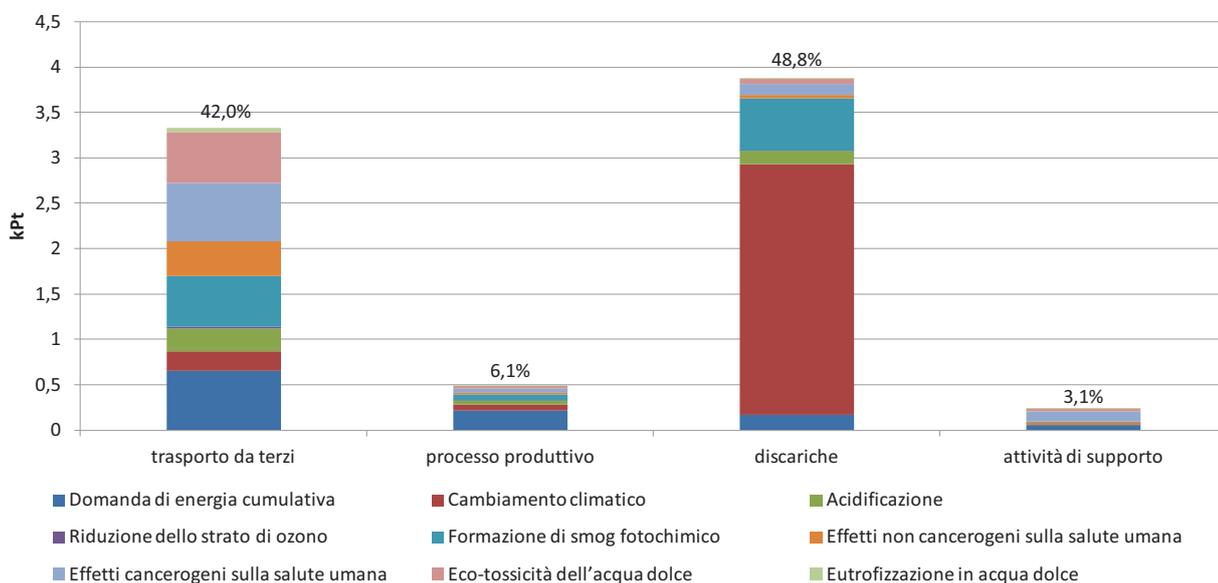


Figura 9 – Suddivisione degli indicatori per ciascun gruppo di macro processi per l'insieme degli impianti

dell'azienda, integrati dai debiti e crediti ambientali derivanti dalla produzione di energia elettrica e CSS. La produzione di energia elettrica avviene sia dal biogas che da un impianto fotovoltaico installato presso il sito di San Sergio. Com'è possibile notare dalla figura il maggior credito ambientale deriva dalla produzione evitata di energia elettrica dal biogas. Il credito relativo alla produzione fotovoltaica appare di modesta entità poiché la produzione complessiva è limitata rispetto ai consumi globali di energia elettrica dell'azienda. Il credito proveniente dalla produzione di CSS viene in buona parte, per varie categorie d'impatto, controbilanciato dall'impatto associato alla produzione stessa del CSS. In sintesi, pur considerando l'effetto di mi-

tigazione generato dalla produzione di energia alternativa, l'eco-indicatore complessivo rimane sostanzialmente invariato, passando da 14,6 mPt a 14,4 mPt per tonnellata di rifiuto. Tale risultato è il frutto di un bilanciamento fra categorie d'impatto che subiscono un peggioramento e categorie che invece ottengono un miglioramento del profilo ambientale.

5. ANALISI DI SENSIBILITÀ E INCERTEZZA

5.1. Analisi di sensibilità

Il controllo della qualità dei dati e della coerenza dei sistemi ha mostrato che alcuni elementi posso-

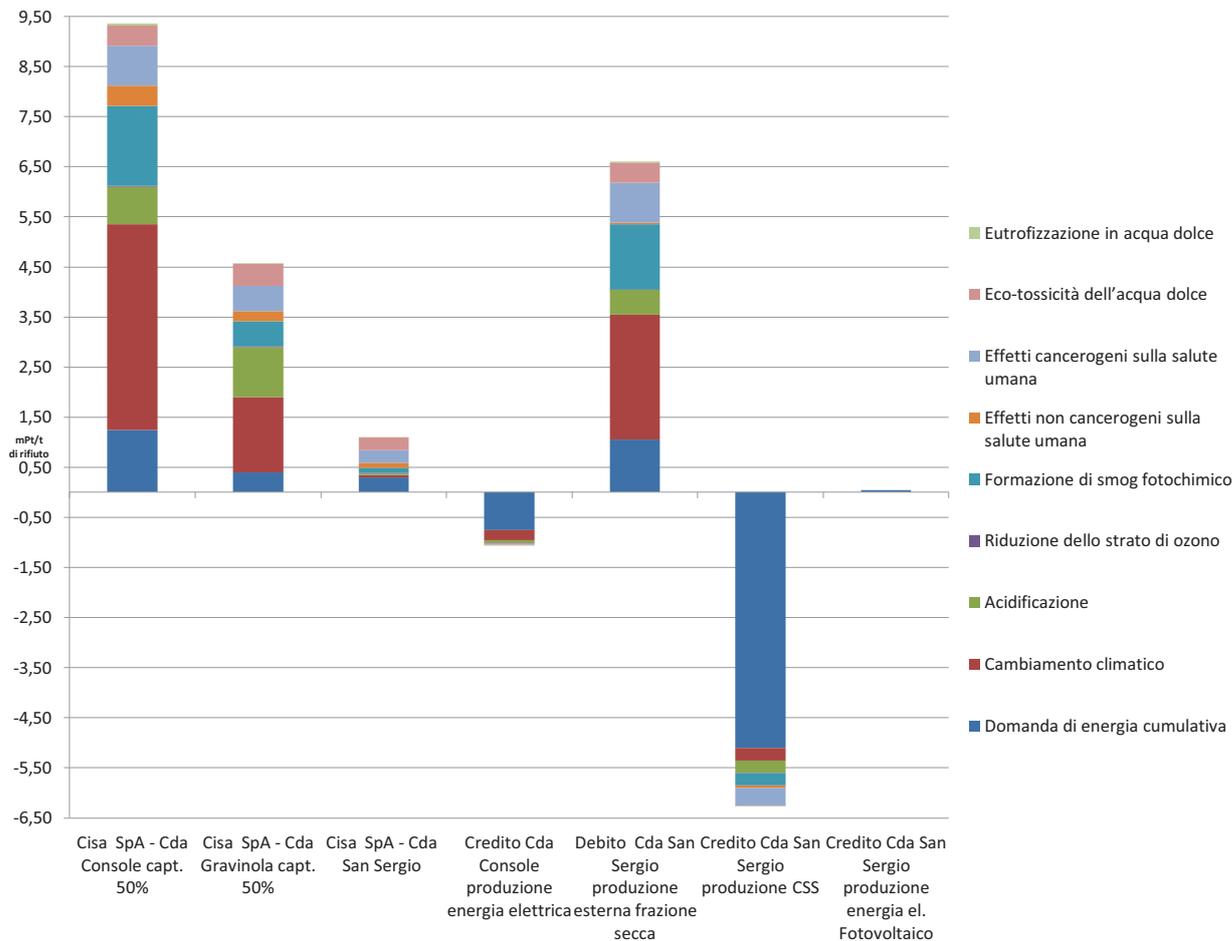


Figura 10 – Eco-indicatori dei tre siti, integrati dai debiti e crediti ambientali derivanti dalla produzione di energia elettrica e CSS

no generare un certo grado di incertezza nel sistema esaminato; per alcuni dati del sistema sono state effettuate ipotesi e/o assunzioni; in particolare i dati stimati riguardano:

- la quantità di biogas captato e non captato;
- la quantità di percolato raccolto e i tassi di abbattimento degli inquinanti nel relativo trattamento.

Inoltre per il trasporto dei rifiuti in ingresso sono state fatte assunzioni specifiche sul tipo di mezzo impiegato.

Alla luce di tali considerazioni, è stata eseguita un'analisi di sensibilità per verificare come variano i risultati al variare delle ipotesi e/o assunzioni che influiscono maggiormente sui risultati d'impatto evidenziati in precedenza.

I valori dei principali parametri considerati nel sistema sono i seguenti:

- quota di biogas captato e non captato: 50%-50%;
- quantità di percolato raccolto durante la post-gestione: pari alla quantità raccolta in fase di gestione;
- tasso di abbattimento degli inquinanti nel trattamento del percolato: 98%;

- tipo di mezzo impiegato nel trasporto dei rifiuti in ingresso:

- per C.da Console: autocompattatore;
- per Gravinola e C.da San Sergio: autocarro >32 t;

Tali valori sono stati modificati nel seguente modo:

- quota di biogas captato e non captato: 75%-25%;
- quantità di percolato raccolto durante la post-gestione: pari al doppio della quantità raccolta in fase di gestione;
- tasso di abbattimento degli inquinanti nel trattamento del percolato: 90%;
- tipo di mezzo impiegato nel trasporto dei rifiuti in ingresso:
 - per C.da Console: autocompattatore 80%, autocarro >32 t 20%;
 - per Gravinola e C.da San Sergio: autocarro >32 t 80%, autocarro 3,5-7,5 t 20%.

L'aumento della percentuale di captazione del biogas al 75% produce una netta riduzione dell'impatto, nell'ordine del 45%, sulla categoria di impatto del CC, un leggero miglioramento del POF

Tabella 4 – Parametri variati per l’analisi di sensibilità e rispettivi risultati

Parametro variato	Valore iniziale	Valore variato	Variazione % dell’ecoindicatore
Quota di biogas captato	50%	75%	-19%
Quantità di percolato raccolto durante post gestione	Pari alla quantità raccolta in fase di gestione	Pari al doppio della quantità raccolta in fase di gestione	+1.3%
Tasso abbattimento degli inquinanti nel trattamento del percolato	98%	90%	+1.7%
Tipo di mezzo impiegato nel trasporto del rifiuto in ingresso	Autocompattatore (Console). Autocarro >32 t (c.de Grav. e S. Sergio)	Autocompattatore 80% e autocarro >32 t 20% (Console). Autocarro >32 t 80%, autocarro 3,5-7,5 t 20% (c.de Grav. e S. Sergio)	+5%

(10%), un leggero peggioramento dell’A (2%) e una situazione stabile sulle altre categorie di impatto. Una maggiore captazione di biogas si traduce quindi in un risultato di minor impatto. Il sistema risulta abbastanza sensibile alla variazione di tale parametro. Infatti l’ecoindicatore complessivo si riduce di circa il 19% (da 14.6 mPt a 11.9 mPt per tonnellata di rifiuto) con una captazione del 75%.

Raddoppiare la quantità di percolato che si è ipotizzata possa essere prodotta in fase di post gestione registra il massimo incremento dell’impatto nella categoria della ecotossicità in acqua dolce per circa il 3%. L’ecoindicatore aumenta complessivamente dell’1,3%. Si può concludere, quindi, che tale ipotesi non influenza molto i risultati dello studio che restano stabili pur raddoppiando la quantità di percolato prodotto.

Lo scenario in cui si ipotizza un abbattimento del 90% (rispetto al 98%) degli inquinanti nel trattamento del percolato, registra il massimo incremento dell’impatto nella categoria della Tossicità umana effetti cancerogeni per circa il 6%. L’ecoindicatore aumenta complessivamente dell’1,7%. Si può concludere, quindi, che anche in questo caso l’ipotesi peggiorativa non influenza molto i risultati dello studio che restano stabili pur riducendo il tasso di abbattimento degli inquinanti nel trattamento del percolato.

Infine, il succitato scenario in cui si cambia il tipo di automezzo di trasporto registra un incremento dell’impatto, talora notevole, nelle categorie di tossicità e dell’eutrofizzazione e un decremento in tutte le altre. Il risultato globale in termini di ecoindicatore è un aumento complessivo di circa il 5%. Il sistema risulta, pertanto, stabile anche considerando l’ipotesi di modifica dei trasporti. Tuttavia tale risultato è l’effetto di un miglioramento nel caso di C.da Console che viene controbilanciato da

un peggioramento della situazione negli altri due siti. La variabilità dei risultati nei singoli siti risulta quindi significativa.

La Tabella 4 illustra in sintesi i risultati dell’analisi di sensibilità.

5.2. *Analisi di incertezza*

L’analisi sinora effettuata si basa su un approccio deterministico che permette, fissate le ipotesi e condizioni di partenza, di ottenere un unico risultato, appunto determinato. Gli scenari illustrati successivamente al caso base rappresentano invece un’analisi di sensibilità in cui, sempre partendo da ipotesi e condizioni di base, si modificano alcuni dei parametri iniziali per valutare quanto i risultati possano cambiare. Si tratta ugualmente di un’analisi condotta seguendo un approccio deterministico e difatti al termine di ogni elaborazione si ottiene sempre un unico risultato.

In realtà i parametri e le condizioni di base non sono fissi, ma variano all’interno di certi range. Si tratta di un’analisi probabilistica, non più deterministica. Come condizioni di base si fissano dei range di valori rappresentativi delle varie caratteristiche del sistema e come risultato, ovviamente, non si ottiene un unico valore, ma un range di valori con la corrispondente probabilità che si verifichino.

L’analisi di incertezza è stata eseguita utilizzando la metodologia Monte Carlo.

La Tabella 5 riporta i parametri considerati con i corrispondenti valori dei range che sono stati considerati ai fini dell’esecuzione dell’analisi di incertezza. La funzione di probabilità impiegata è quella triangolare. La scelta di questa funzione di probabilità dipende dal fatto che i parametri esaminati non presentano un profilo di valori concen-

Tabella 5 – Parametri utilizzati per l'esecuzione dell'analisi di incertezza

Parametro	scenario base	min	max
Trasporto da terzi (C.da Console): tonnellate*km con autocompattatore	x	-20%	x
Trasporto da terzi (Gravinola e San Sergio): tonnellate*km con autocarro>32 t	x	x	+20%
Emissione CO ₂ dalla biostabilizzazione	59 kg/t rifiuto in ingresso	-20%	+20%
Produzione percolato da discarica nella fase di gestione	x	x	+100%
Produzione percolato da discarica nella fase di post-gestione	x	x	+100%
Biogas captato	x	x	+50%
Biogas non captato	x	-50%	x
CO ₂ biogenica emessa da biogas non captato	x	-10%	+10%
CH ₄ biogenico emesso da biogas non captato	x	-10%	+10%
CO ₂ biogenica emessa da combustione biogas captato	x	-10%	+10%
% abbattimento inquinanti da trattamento percolato	98%	90%	98%

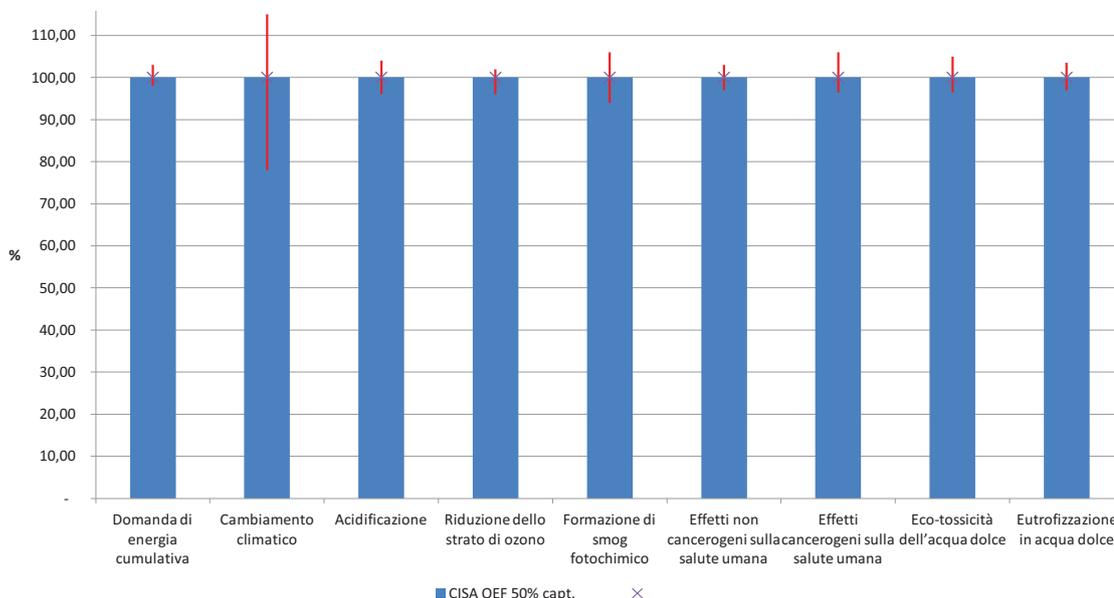


Figura 11 – Analisi di incertezza delle singole categorie di impatto per l'intera organizzazione

trato maggiormente sulla media, ma una distribuzione meno raccolta e, peraltro, il campione di dati a disposizione risulta abbastanza ristretto; ad ogni modo, con questa scelta il coefficiente di variabilità viene incrementato, rappresentando a priori lo scenario peggiore.

In tal modo vengono calcolati i valori rappresentativi della variabilità, in particolare la media, la mediana, la deviazione standard ed il coefficiente di variabilità oltre che i valori degli intervalli di confidenza al 95%.

La Figura 11 riporta l'analisi di incertezza riferita alle singole categorie d'impatto per l'intera organizzazione (contributo complessivo dei tre siti). Si

può notare che il range più elevato di variabilità si osserva per la categoria d'impatto del Cambiamento climatico che presenta anche un coefficiente di variabilità del 10% dovuto prevalentemente alla variabilità dei dati relativi alla captazione di biogas.

In conclusione anche l'analisi di incertezza mostra che i risultati ottenuti rientrano in range di valori abbastanza ristretti, confermando che lo studio non risente in maniera significativa della variabilità dei dati riferiti ai parametri stimati o ipotizzati, anzi è probabile ottenere risultati migliorativi dell'impatto calcolato con l'analisi deterministica.

Tabella 6 – Confronto fra la caratterizzazione del sito di Contrada San Console e i dataset provenienti dalle banche dati Ecoinvent v.3 e ELCD v3.2

Categoria d'impatto	Unità	1 t C.da Console	1 t Ecoinvent	1 t ELCD
Domanda di energia cumulativa	MJ eq	1242,84	381,75	886,62
Cambiamento climatico	kg CO ₂ eq	807,7	619,9	806,8
Acidificazione	molc H ⁺ eq	0,59	0,15	0,40
Riduzione dello strato di ozono	kg CFC-11 eq	1,14E-05	3,55E-06	2,26E-06
Formazione di smog fotochimico	kg NMVOC eq	1,15	0,33	0,60
Effetti non cancerogeni sulla salute umana	CTUh	5,43E-06	0,001507	5,75E-07
Effetti cancerogeni sulla salute umana	CTUh	7,05E-07	2,25E-05	5,04E-07
Eco-tossicità dell'acqua dolce	CTUe	86,03	112131,90	10,31
Eutrofizzazione in acqua dolce	kg P eq	0,002	0,014	0,541

6. ANALISI DEI RISULTATI E INDIVIDUAZIONE DEI POSSIBILI MIGLIORAMENTI AMBIENTALI

6.1. Analisi dei risultati: confronto con banche dati

Per valutare la qualità dei risultati ottenuti, essi sono stati innanzitutto confrontati con i risultati di altri studi o banche dati autorevoli presenti in letteratura.

Vi è da considerare preliminarmente che i tre siti di oggetto di studio trattano rifiuti differenti con finalità differenti; pertanto la comparazione viene effettuata non sull'intero impatto dell'azienda ma sui singoli flussi di trattamento, in particolare sui flussi del sito di contrada Console.

In merito al trattamento di rifiuti urbani la banca dati ELCD (JRC, 2017) contiene un processo riferito a vari paesi europei denominato "Landfill of municipal solid waste, landfill including landfill gas utilisation and leachate treatment, without collection, transport and pre-treatment, AT, DE, IT, LU, NL, SE, CH technology mix, at landfill site EU-27". Tale *dataset* rappresenta la situazione tipica di una discarica europea. Il processo include il trattamento del biogas, il trattamento del percolato e le relative emissioni. Per il biogas si assume la seguente situazione: 22% combustione in torcia, 28% recupero energetico, 50% non captato. Come evidente dal titolo del processo, il *dataset* non include la raccolta dei rifiuti urbani, il trasporto al sito di smaltimento ed il pretrattamento.

Anche la banca dati Ecoinvent v.3 contiene un processo analogo intitolato "Municipal solid waste {CH} treatment of, sanitary landfill | Alloc Def, S" riferito alla situazione Svizzera. Il rifiuto

umido è composto da: H₂O 22,9%; O 25,7%; H 4,8%; C 33,4%. Di tale carbonio la percentuale di carbonio biogenico è del 60,4%. Tale rifiuto è molto simile a quello considerato nel presente studio; con la modellistica applicata al rifiuto di C.da Console trattato nel 2015 si è valutato un contenuto di carbonio pari al 30% di cui il 59% biogenico; il rifiuto di C.da Console appare contenere un quantitativo maggiore di umidità (31%). Tali dati permettono di validare il modello realizzato. Anche il *dataset* della banca dati Ecoinvent si riferisce ad un rifiuto non pretrattato e non include la raccolta urbana ed il trasporto dei rifiuti alla discarica. Contiene invece la raccolta ed il trattamento di biogas e percolato; inoltre considera un post-gestione di 150 anni dopo la chiusura della discarica. La Tabella 6 riporta il confronto fra i risultati di caratterizzazione del sito di C.da Console e i due *dataset* indicati, riferiti a 1 t di rifiuto conferito alla discarica.

Il confronto mostra dati abbastanza comparabili fra loro; anche le differenze sono giustificabili. Ad es. il Cambiamento climatico di C.da Console risulta in linea con gli altri due *dataset*. Il consumo di energia primaria è maggiore per C.da Console in quanto il dato include anche il trasporto del rifiuto alla discarica che, come evidenziato in precedenza, rappresenta una notevole fonte di impatto e di consumo energetico. Gli impatti delle categorie di tossicità del *dataset* tratto da Ecoinvent risultano notevolmente superiori agli altri casi in quanto il foglio dati modella le emissioni inquinanti dalla discarica per un periodo più lungo, pari a 150 anni anziché 30 come nel caso di C.da Console. Infine l'impatto dell'Eutrofizzazione in acqua dolce risulta massimo nel *dataset* di ELCD in quanto tale foglio dati considera l'emissione di fosfati al suolo, non presente negli altri due sistemi esami-

nati; gli altri due fogli dati sono fra loro maggiormente comparabili in termini di questa categoria d'impatto ambientale.

6.2. Individuazione delle opzioni di miglioramento ambientale

A questo punto è importante analizzare ed indicare le cause che contribuiscono alla criticità del sistema e quali sono i miglioramenti che bisogna apportare per perfezionare il suo profilo (prestazione) ambientale.

A tal fine si è proceduto all'analisi dei contributi del ciclo di vita in modo da individuare le fasi, i fattori o i processi dell'intero ciclo produttivo responsabili di determinati impatti ambientali.

Dalla Figura 8 e dalla Figura 9, che mostrano il valore dell'eco-indicatore nelle varie fasi di trasporto da terzi, processo produttivo, gestione discariche e attività di servizio, risulta che la gestione delle discariche e il trasporto da terzi sono maggiormente responsabili dell'impatto ambientale dell'organizzazione. L'indagine va quindi rivolta innanzitutto all'analisi più approfondita di tali fasi per individuare eventuali opzioni di miglioramento. Si è proceduto inoltre a verificare le possibili opzioni di miglioramento della qualità dei dati utilizzati come base dello studio.

6.2.1. Il trasporto da terzi

In tutti e tre siti il trasporto da terzi è risultato un punto critico del sistema. L'analisi di sensibilità sui mezzi di trasporto impiegati nello studio ha mostrato un incremento del risultato globale in termini di eco-indicatore di circa il 5%, modificando i mezzi impiegati. Il sistema risulta complessivamente stabile anche considerando l'ipotesi di modifica dei trasporti; tuttavia tale risultato è l'effetto di un miglioramento nel caso di C.da Console che viene controbilanciato da un peggioramento della situazione negli altri due siti. La variabilità dei risultati nei singoli siti risulta quindi significativa.

Al fine di procedere ad un miglior inquadramento del profilo ambientale di tale fase è necessario innanzitutto ottenere dati più specifici sui mezzi impiegati da parte degli operatori.

Il miglioramento ambientale deriva invece da un efficientamento da parte di terzi del trasporto dei rifiuti al sito, sia dal punto di vista della tipologia di mezzo usata che del carico degli stessi mezzi (occorre fare in modo che viaggino più

pieni possibile). Tale opzione di miglioramento non è sotto il controllo operativo dell'azienda proprietaria dei tre siti di trattamento/smaltimento rifiuti.

6.2.2. La discarica: la captazione del biogas

In entrambi i siti di C.da Console e Gravinola, pur trattandosi di discariche di tipologie differenti, la quota di captazione di biogas è risultata una criticità ambientale del sistema. In particolare si è considerata una quota di captazione del 50% di biogas ed una pari quota di non captazione emessa in atmosfera. L'impatto ambientale prevalente di tale emissione avviene sull'effetto serra a causa dei rilasci di metano biogenico. L'analisi di sensibilità ha, poi, mostrato che il sistema risulta sensibile alla variazione di tale parametro.

Un miglioramento del profilo ambientale potrebbe (così come si evince dall'analisi di sensibilità) certamente derivare da un incremento della quota di biogas captato. A titolo di esempio, nel paragrafo 5.1, è possibile osservare il miglioramento che si otterrebbe se si portasse tale quota al valore del 75% indicato dall'Environmental Protection Agency (EPA) americana come valore medio tipico delle discariche.

Alla luce di tale considerazione, nella ricerca di possibili opzioni di miglioramento del sistema esaminato si dovrà preliminarmente procedere all'effettuazione di una campagna più efficace di monitoraggio e misurazione del biogas non captato tramite l'uso congiunto di:

- monitoraggio delle discariche tramite termografia a infrarossi che permette di individuare in modo estremamente rapido le anomalie termiche che possono essere causate da fughe di biogas, da ristagno, ruscellamento e trafileamento di percolato superficiale e da altre anomalie;
- confronto con le rilevazioni già effettuate attraverso la tecnica della camera di accumulo che permette di quantificare direttamente i flussi di gas in modo puntuale.

6.2.3. La discarica: il percolato

Per la valutazione degli impatti associati al trattamento del percolato sono stati impiegati dati di letteratura e stime sulla percentuale di abbattimento degli inquinanti presenti nel prodotto conferito.

L'analisi di qualità dei dati ha mostrato che tali ipotesi producono un abbassamento di qualità dei dati, anche se di portata limitata come verificato nell'analisi di sensibilità.

Per migliorare la qualità dei dati dello studio sarebbe opportuno ottenere dati d'impianto sul trattamento del percolato dal proprio fornitore.

6.2.4. Il processo di biostabilizzazione

La produzione di biogas nella discarica dipende dal tipo di rifiuto che è stato conferito alla stessa; poiché per la discarica di Contrada Console, il rifiuto conferito è rappresentato dal biostabilizzato prodotto presso i propri impianti, risulta determinante il controllo del processo di biostabilizzazione.

Il carbonio contenuto nei rifiuti rappresenta il potenziale energetico; è quindi auspicabile ridurre al massimo la decomposizione della sostanza organica al fine di mantenere elevato il potere calorifico del biogas. La stabilizzazione del rifiuto avviene dunque tramite la riduzione del contenuto percentuale di umidità fino a valori del 7-15% (in funzione dell'umidità iniziale); in tali condizioni ogni attività biologica è soppressa e non si ha degradazione (APAT, 2003).

In letteratura sono riportati vari esempi di processi di biostabilizzazione con tempi diversi (APAT, 2007).

Pur tuttavia è possibile esplorare il campo di sistemi alternativi e/o innovativi di trattamento di biostabilizzazione quali i sistemi di trattamento biologico combinato o l'utilizzo di ossigeno puro.

Per quanto riguarda quest'ultima applicazione è già in corso una sperimentazione da parte dell'azienda proprietaria dei tre siti. L'uso di ossigeno puro è finalizzato all'ottimizzazione delle reazioni microbiche esotermiche che si svolgono in presenza dell'ossigeno, a carico della frazione organica biodegradabile presente nel rifiuto. L'impianto pilota attualmente in uso per la sperimentazione utilizza ossigeno liquido puro al posto dell'aria durante il processo di biostabilizzazione, che in teoria dovrebbe permettere di:

- abbattere i tempi di maturazione secondaria dei ceppi batterici coinvolti nel processo di stabilizzazione aerobica;
- abbassare le temperature in cui suddette specie decompongono la sostanza organica del rifiuto;
- ridurre le emissioni odorigene in ambiente;
- aumentare l'efficienza impiantistica.

6.2.5. La composizione merceologica dei rifiuti

Gli impatti prevalenti dei sistemi di trattamento di rifiuti sul Cambiamento Climatico sono stati stimati attraverso la modellizzazione delle emissioni di gas climalteranti che dipende dalla quantità di

carbonio totale e biogenico presente nei rifiuti in ingresso. Il contenuto di carbonio totale e biogenico è stato stimato partendo dalla composizione merceologica dei rifiuti (in termini di frazioni di prodotti) e applicando alle stesse percentuali medie di contenuto di carbonio.

Tale operazione è risultata più semplice per i rifiuti in ingresso a Contrada Console, trattandosi di rifiuti urbani, mentre risulta più problematica per i rifiuti conferiti al sito di Gravinola, trattandosi di rifiuti speciali non pericolosi che hanno composizioni variabili.

Una migliore definizione del rifiuto in ingresso permetterebbe di ridurre le incertezze legate a tali stime. L'azienda effettua già frequenti analisi campionarie sui rifiuti in ingresso, seguendo un severo protocollo, per determinarne la composizione merceologica. Tuttavia sarebbe opportuno integrare l'analisi merceologica con l'analisi più frequente della composizione chimica dei rifiuti in ingresso in modo da conoscere più approfonditamente la composizione percentuale sia in termini di carbonio (suddiviso in totale e biogenico) che eventualmente di metalli.

6.2.6. I consumi energetici

Il principale punto critico della fase di processo svolta presso gli impianti è rappresentato dal consumo energetico sotto forma di energia elettrica e di gasolio per la movimentazione dei mezzi meccanici.

La razionalizzazione dei consumi di tali input può essere conseguita attraverso l'esecuzione della diagnosi energetica e successivi interventi di efficientamento energetico e di implementazione di processi gestionali di controllo della variabile energia all'interno dei cicli di lavorazione.

7. CONCLUSIONI

Lo stato dell'arte dello studio di analisi del ciclo di vita del sistema di trattamento di rifiuti presso gli impianti sopra descritti ha portato alla redazione di un inventario dei consumi diretti di materie prime e di energia durante le varie fasi del ciclo esaminato.

I risultati d'inventario e di valutazione degli impatti hanno mostrato che smaltire 1 t di RSU nel sito di C.da Console provoca un impatto ambientale superiore rispetto allo smaltimento di 1 t di RSNP o al trattamento di 1 t di CSS. Considerando anche l'espansione del sistema, per includere crediti e debiti ambientali associati alla produzione di energia,

si evince che lo smaltimento di 1 t di RSU nel sito di C.da Console resta più impattante rispetto agli altri due casi sebbene se ne riduca l'impatto complessivo. Il profilo ambientale di San Sergio, invece, peggiora in quanto il trattamento di RSU per la produzione di CSS produce un impatto ambientale maggiore del credito generato dall'aver prodotto un combustibile alternativo. Ciò è dovuto al fatto che anche nella produzione di CSS una quota consistente di rifiuto viene conferita in discarica con tutti gli impatti connessi alla stessa. Considerando l'intero ciclo di vita dei diversi trattamenti, comunque, il trattamento di RSU per la produzione di CSS produce un impatto inferiore a quello dell'avvio in discarica del biostabilizzato e recupero di maggiori quantità di biogas per usi energetici.

Partendo dagli impatti per unità di massa di rifiuto, è stato possibile ottenere l'Organization Environmental Footprint dell'azienda. Moltiplicando infatti l'impatto di una singola tonnellata conferita ai rispettivi siti per il totale delle tonnellate conferite, si è ottenuto il profilo ambientale complessivo dell'organizzazione. I risultati in termini di eco-indicatore mostrano la superiorità dell'impatto generato del sito di Contrada Console che è pari a circa il doppio della somma degli impatti degli altri due siti. Ciò è dovuto sia al maggior quantitativo di rifiuti smaltito presso tale sito che al maggior impatto unitario del rifiuto conferito.

In merito alle fasi più impattanti, la fase più critica del sistema risulta il conferimento in discarica del rifiuto biostabilizzato o del rifiuto speciale non pericoloso seguita dal trasporto dei rifiuti da terzi. Le altre fasi, relative al processo produttivo e alle attività di supporto, risultano meno impattanti.

L'analisi ha inoltre mostrato che la principale categoria d'impatto interessata dal sistema di trattamento dei rifiuti all'interno degli stabilimenti oggetto di studio è il Cambiamento climatico seguito dalla Formazione di smog fotochimico, Domanda di energia cumulativa, Tossicità umana (specialmente quella relativa agli effetti cancerogeni) e Eco-tossicità dell'acqua dolce. Di scarsa rilevanza l'influenza del sistema sulla Riduzione dello strato di ozono e sulla Eutrofizzazione in acqua dolce.

L'origine degli impatti va ricercata principalmente in:

- sistema di trasporti usato per conferire i rifiuti all'ingresso dei siti, che influisce su quasi tutte le categorie d'impatto;

- emissioni di metano biogenico dalle discariche a seguito della non captazione del biogas, che impattano sul cambiamento climatico.

Le analisi di sensibilità e l'analisi di incertezza hanno evidenziato che in generale lo studio non risente delle stime e delle ipotesi effettuate in merito ai parametri incerti; la maggiore variabilità si è riscontrata nel caso dell'analisi di sensibilità riferita alla modifica della quota di captazione del biogas dalla discarica. In tal caso l'incremento del recupero di biogas incide significativamente sui risultati dello studio, evidenziando un netto miglioramento del profilo ambientale del sistema, quantificabile con un decremento di circa il 19% del valore del rispettivo ecoindicatore complessivo.

Le principali proposte di miglioramento, che emergono alla luce dello studio, riguardano una maggiore definizione di dati e informazioni attraverso analisi specifiche, al fine di migliorare il grado di precisione dello studio ed eliminare alcune delle incertezze emerse. È il caso delle analisi richieste sulla composizione del rifiuto in ingresso in termini di carbonio o metalli o delle analisi relative al trattamento del percolato. Altre proposte riguardano invece attività più operative che potrebbero contribuire al miglioramento del profilo ambientale dell'azienda. Poiché uno dei principali carichi ambientali è rappresentato dalle emissioni diffuse di biogas in atmosfera dal corpo di discarica, si rende indispensabile effettuare costanti ulteriori specifiche campagne integrative di monitoraggio delle emissioni dalla discarica. La metodologia proposta è quella della termografia ad infrarosso che permette un rapido e frequente screening della situazione, da integrare successivamente con apposite misurazioni sul sito. Si rende necessario seguire poi tutta la filiera di attività e di cause che portano alla formazione di biogas, per ridurne le portate. In tal caso è stato proposto di valutare attentamente la fattibilità dell'introduzione di nuove tecnologie nel processo di biostabilizzazione, strada peraltro già intrapresa dall'azienda attraverso la sperimentazione dell'utilizzo diretto di ossigeno in tale processo.

In conclusione si può affermare che l'azienda oggetto di studio ha finora già eseguito tutta una serie di attività volte al monitoraggio e al contenimento degli impatti ambientali derivanti dalla propria operatività. Il presente studio di LCA ha evidenziato che vi sono comunque ancora aree di possibile miglioramento che senz'altro contribuirebbero

bero sia a perfezionare il profilo ambientale dell'azienda che a potenziare il proprio posizionamento nel panorama delle aziende di gestione e trattamento dei rifiuti.

8. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- ANPA (2000) Database I-LCA, Banca dati italiana a supporto della valutazione del ciclo di vita: manuale. Agenzia Nazionale Protezione Ambiente. Unità per la qualità ecologica dei prodotti – Roma. CD-Rom.
- APAT (2003) Metodi di misura della stabilità biologica dei rifiuti. APAT Manuali Linee Guida 25/2003. <http://www.isprambiente.gov.it/contentfiles/00003400/3488-mlg25-2003-stabilita-biologica.pdf/>
- APAT (2007) Caratterizzazione chimico-fisica del biostabilizzato proveniente da impianti di trattamento meccanico biologico dei rifiuti. Rapporto APAT-ARPA-CIC. APAT – Servizio Stampa ed Editoria. <http://www.isprambiente.gov.it/contentfiles/00004100/4160-rapporto-biostabilizzato.pdf/>
- Astrup T., Mosbæk H., Christensen T.H. (2006) Assessment of long-term leaching from waste incineration air-pollution-control residues. *Waste Management* 26 (8), pp. 803-814.
- ATSDR (2008) Chapter 2: Landfill Gas Basics. In *Landfill Gas Primer – An Overview for Environmental Health Professionals*. Figure 2-1, p. 6. [http://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/PDFs/Landfill 2001 ch2mod.pdf](http://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/PDFs/Landfill%20ch2mod.pdf)
- Benini L., Mancini L. e Sala S. (2014) Normalisation method and data for Environmental Footprints. Report EUR 26842 EN.
- CISA SpA. (2017) CISA S.p.A., Contrada Forcellara S. Sergio, 74016 Massafra (TA), www.cisaonline.it
- EC (2017) European Commission. Environment-Waste. Disponibile su: <http://ec.europa.eu/environment/waste/>
- EC (2010) European Commission. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook. General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance. First edition March 2010. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- EC (2013) European Commission. Communication from the Commission to the European Parliament and the Council. Building a single market for green products: facilitating better methods to measure, benchmark and communicate the environmental performance of products and organisations. COM(2013) 196.
- EPA (2005) U.S. Landfill Gas Emissions Model. LandGEM v 3.02. Environmental Protection Agency Office of Research and Development Washington, DC 20460. <https://www3.epa.gov/ttnatc1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>
- EPA (2010) Greenhouse Gas Emissions Estimation Methodologies for Biogenic Emissions from Selected Source Categories: Solid Waste Disposal, Wastewater Treatment, Ethanol Fermentation. Draft Report. Environmental Protection Agency Office of Research and Development Washington, DC 20460.
- https://www3.epa.gov/ttnchie1/efpac/ghg/GHG_Biogenic_Report_draft_Dec1410.pdf
- EPA (2016) The LFG Energy Project Development Handbook. Chapter 1 – Landfill gas energy basics. <https://www.epa.gov/lmop/landfill-gas-energy-project-development-handbook-files#file-305219>
- EPD (2008) Environmental Product Declaration product group classification: UN CPC 942, 943 – Solid waste disposal services. Product category rules according to ISO 14025. Available at <http://environdec.com/en/PCR/Detail/?Pcr=5810>
- EUROSTAT (2016) Energy balance sheets. 2014 DATA. 2016 edition. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016.
- Hischier R., Weidema B., Althaus H.-J., Bauer C., Doka G., Dones R., Frischknecht R., Hellweg S., Humbert S., Jungbluth N., Kollner T., Loerincik Y., Margni M., Nemecek T. (2010). Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Ecoinvent Report No. 3, v2.2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- IPCC (2006) Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5. Waste. Chapter 2: Waste generation, composition and management data. Report and associated Excel® waste model are available at <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>.
- IPCC (2013) Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- ISO (2006a) UNI EN ISO 14040:2006. “Gestione ambientale. Valutazione del ciclo di vita. Principi e quadro di riferimento”. Sostituisce la norma UNI EN ISO 14040:1998.
- ISO (2006b) UNI EN ISO 14044:2006. “Gestione ambientale. Valutazione del ciclo di vita. Requisiti e linee guida”. Sostituisce le norme UNI EN ISO 14041:1999, UNI EN ISO 14042:2001, UNI EN ISO 14043:2001.
- JRC (2010) International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook. General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance. First edition March 2010. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- JRC (2017) Joint Research Centre – European Commission. European Life Cycle Database. <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/>
- Lamlom S.H., Savidge R.A. (2003) A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. *Biomass and Bioenergy* 25 (4), pp.381 – 388.
- McDougall F., White P., Franke M., Hindle P. (2001) Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory. Blackwell Science Ltd, Regno Unito.
- MISE (2015) BEN – Bilancio Energetico Nazionale di sintesi. Anno 2015.
- Nebbia G. (2001) Risorse, Merci, Ambiente. Progedit Editore – Bari.
- Notarnicola B., Puig R., Raggi A., Fullana P., Tassielli G., Tarabella A., Petti L., De Camillis C., Mongelli I. (2007) LCA of Italian and Spanish bovine leather production systems in an industrial ecology perspective. In: Puig R., Notarnicola B., Raggi A. Industrial ecology in the cattle-to-leather supply chain. Franco Angeli, Milano.



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2017 è sostenuta da:

STADLER[®]
STADLER ITALIA S.r.l.



VEOLIA
Veolia Water Technologies Italia S.p.A.

SOLVair Solutions

 **INGEGNERIA
DELL'AMBIENTE**



N. 3/2017

Ledizioni 



CiAI Consorzio
Imballaggi
Alluminio


UNICALCE
Innoviamo la tradizione



ecopneus
il futuro dei pneumatici fuori uso, oggi


iren

VOMM

 **RICREA** 20¹⁹⁹⁷
CONSORZIO NAZIONALE RICICLO
E RECUPERO IMBALLAGGI ACCIAIO 2017

ALLEGRI
ecologia
trattamento acque

KSB 

PASSAVANT
IMPIANTI 
progettazione e costruzione impianti trattamento acque, fanghi e rifiuti

 **comieco**
Consorzio Nazionale Recupero e Riciclo
degli Imballaggi a base Cellulosica

conTec

 **SEAM**
engineering
l'acqua e l'ambiente