



PIANO REGIONALE DI GESTIONE DEI RIFIUTI URBANI AGGIORNAMENTO 2022

ANALISI DEL CICLO DI VITA (LCA)

Studio realizzato da:

greenstep s.r.l.s.

Innovation and sustainability

piazza Medici, 16, Asti

Componenti del gruppo di lavoro: ing. Giorgio Cantino, Ph.D., dott. Fabio Claps

Responsabile dello studio: ing. Giorgio Cantino, Ph.D.

Revisione: Finale, novembre 2021

Committente dello studio:

Regione autonoma Friuli-Venezia Giulia

Direzione centrale Difesa dell'ambiente, energia e sviluppo sostenibile

Servizio disciplina gestione rifiuti e siti inquinati

Via Carducci, 6, Trieste

Tel. +39 040 3774113

rifiuti@regione.fvg.it

Referenti: dott. Flavio Gabrielcig, ing. Simone Birtig, ing. Elena Caprotti, arch. Roberta Brunello Zanitti

Copyright: Regione autonoma Friuli-Venezia Giulia, Servizio disciplina gestione rifiuti e siti inquinati.

Ringraziamenti:

Un sincero ringraziamento a tutti coloro che hanno collaborato attivamente alla realizzazione dello studio fornendo dati ed informazioni per la predisposizione del modello LCA o contribuendo con critiche e revisioni al miglioramento del prodotto finale.

Gli autori hanno elaborato la ricerca con cura, utilizzando al meglio informazioni e dati forniti dal committente, unitamente all'esperienza maturata dal gruppo di lavoro. I risultati presentati sono i più accurati possibili, compatibilmente con la qualità dei dati ricevuti, e devono essere utilizzati coerentemente con gli obiettivi dello studio ed il campo d'applicazione previsto. Gli autori declinano ogni responsabilità per decisioni o azioni intraprese al di fuori del contesto entro il quale lo studio è stato sviluppato.

Extended Abstract

Lo studio consiste nella valutazione in ottica di ciclo di vita degli scenari previsti dalla bozza di “Piano regionale di gestione dei rifiuti urbani - Aggiornamento 2022”, revisione aprile 2021.

Lo studio è stato svolto secondo le norme ISO 14040-14044 e le linee guida ILCD. L’analisi LCA dei Rifiuti Solidi Urbani (RSU) in Friuli-Venezia Giulia consiste nel presente report e in un modello informatico realizzato grazie all’ausilio del software openLCA. Tutti i dati necessari per la realizzazione del modello sono stati forniti dalla Direzione Centrale Difesa dell’Ambiente, Energia e Sviluppo sostenibile della Regione committente.

L’obiettivo dello studio è il seguente:

Analisi, attraverso la tecnica della Life Cycle Assessment (LCA), degli scenari previsti dall’aggiornamento del “Piano regionale di gestione dei rifiuti urbani – Aggiornamento 2022”, revisione aprile 2021, consistenti in:

- scenario 0 – nessuna azione integrativa attuata;
- scenario 1 – costruzione di un nuovo impianto di selezione e combustione;
- scenario 2 – ammodernamento degli impianti di selezione esistenti e realizzazione di un nuovo impianto di combustione.

Lo studio parte dall’analisi della composizione tipologica del rifiuto urbano residuo fornita dalla committenza e arriva a stimare in maniera quantitativa i profili ambientali del risultato del processo di selezione e di valorizzazione di parte di essi, cercando di fornire alcuni potenziali elementi di supporto per il decisore politico in sede di valutazione complessiva delle linee di intervento proposte nella bozza di Piano condivisa agli autori.

Sommario

Extended Abstract	II
Sommario	III
Indice delle tabelle	V
Indice delle figure	VII
Introduzione	1
Base di partenza metodologica	1
Introduzione alla metodologia LCA	1
Definizione dell’obiettivo e del campo di applicazione	3
Analisi dell’inventario del ciclo di vita (Life Cycle Inventory analysis – LCI)	3
Valutazione dell’impatto del ciclo di vita (Life Cycle Impact Assessment – LCIA)	4
Interpretazione e miglioramento del ciclo di vita (Life Cycle Interpretation)	4
Unità funzionale	4
Confini di sistema	4
Fonti di dati e diretti/indiretti e strumenti informatici LCA	4
Indicatori ambientali tipicamente utilizzati negli studi LCA nel settore dei rifiuti	5
Impatti causati e impatti evitati	6
Nota metodologica sulla gestione dell’anidride carbonica da fonte biogenica	7
Analisi del ciclo di vita del rifiuto indifferenziato in Friuli-Venezia Giulia	8
1. Introduzione	8
2. Obiettivo e campo di applicazione	10
Unità funzionale.....	11
Parte 1 - ecoprofilo del processo di selezione del RSU	11
Parte 2 - ecoprofilo energia prodotta da combustione CSS	11
Confini di sistema	12
Criteri e assunzioni comuni	12
Parte 1 - ecoprofilo del processo di selezione del RSU	12
Parte 2 – ecoprofilo energia prodotta da combustione CSS	14
3. Analisi di inventario	16
Parte 1 – ecoprofilo del processo di selezione del RSU.....	17
Composizione del rifiuto indifferenziato in ingresso.....	18
Composizione del combustibile solido secondario (CSS) prodotto dagli impianti regionali.....	20
Bilancio di massa del trattamento meccanico.....	21
Trasporti	24
Impianti di trattamento	25
Parte 2 – ecoprofilo energia prodotta da combustione CSS	28
Trasporti	28
Processo di combustione del CSS	29
Analisi di inventario dell’unità funzionale	33
4. Analisi degli impatti e interpretazione dei risultati	35
Parte 1 - ecoprofilo del processo di selezione del RSU	36
Cumulative Energy Demand (CED)	36
ReCiPe midpoint H.....	37
ReCiPe endpoint H.....	38
Parte 2 - ecoprofilo energia prodotta da combustione CSS.....	39
Cumulative Energy Demand (CED)	39
Recipe midpoint H	40
Recipe endpoint H	41

Analisi di contributo.....	43
Parte 1 - ecoprofilo del processo di selezione del RSU	43
Analisi di contributo ambientale – Global Warming Potential.....	43
Analisi di contributo energetico – Non renewable, fossil	44
Parte 2 - ecoprofilo energia prodotta da combustione CSS.....	45
Analisi di contributo ambientale – Global Warming Potential.....	45
Analisi di contributo energetico – Non renewable, fossil	46
5. Interpretazione dei risultati.....	47
Parte 1.....	47
Parte 2.....	48
6. Conclusioni, limitazioni e suggerimenti per eventuali sviluppi futuri	49
Conclusioni.....	49
Limiti	49
Suggerimenti.....	50
Bibliografia.....	51
Allegati.....	52
I. Elaborazioni bilancio di massa.....	52
Bilancio di massa per lo scenario 0.....	53
Bilancio di massa per lo scenario 1.....	54
Bilancio di massa per lo scenario 2.....	55
II. Calcolo dei consumi.....	56
NET.....	56
S.N.U.A.....	56
ECO SINERGIE	57
III. Analisi di inventario del processo di incenerimento elaborato da “waste tool 2021” di Doka LCA. ..	58
IV. Analisi di inventario delle emissioni associate alla produzione di 1 kWh attraverso la combustione del CSS. 62	

Indice delle tabelle

Tabella 1 Descrizione dell'impiantistica regionale. Fonte: "Piano regionale di gestione dei rifiuti urbani – Aggiornamento 2022".	14
Tabella 2 Inventario dei flussi in ingresso di 200301 e 191212 nell'anno 2019. Fonte: bozza di "Piano regionale di gestione dei rifiuti urbani – Aggiornamento 2022" e successiva elaborazione.	18
Tabella 3 Inventario per 200301 e 191212. Fonte: bozza di "Piano regionale di gestione dei rifiuti urbani – Aggiornamento 2022" e successiva elaborazione.	19
Tabella 4 Composizione della tonnellata di RSU in ingresso negli impianti di trattamento. Fonte: elaborazione degli autori a partire dai dati della bozza di Piano.	19
Tabella 5 Composizione del CSS comune a tutti gli scenari e PCI risultante.	20
Tabella 6 Bilancio di massa per i tre scenari di trattamento.	23
Tabella 7 Inventario del processo di trasporto della tonnellata di rifiuto in ingresso.	24
Tabella 8 Descrizione dell'impiantistica TM regionale nei tre scenari e delle assunzioni effettuate per il calcolo dei consumi.	25
Tabella 9 Consumi degli impianti. Fonte: dati Direzione centrale dell'ambiente, elaborati dall'autore.	27
Tabella 10 Inventario del processo di trasporto della CSS prodotto per ciascuno scenario.	29
Tabella 11 Waste-specific inventories elaborati nel "Waste tools" di Doka LCA. Fonte: elaborazione degli autori.	29
Tabella 12 Reagenti ed additivi necessari per il funzionamento, per 1kg di CSS. Fonte: Elaborazione da "Updated location - and waste-specific life cycle inventories of waste treatment".	30
Tabella 13 Discariche e trattamento finale dei residui, per 1 kg di CSS. Fonte: Elaborazione da "Updated location - and waste-specific life cycle inventories of waste treatment".	31
Tabella 14 Emissioni dirette in atmosfera di CO ₂ e CO da combustione di 1 kg di CSS trattato. Fonte: "Updated location - and waste-specific life cycle inventories of waste treatment".	31
Tabella 15 Emissioni dirette in atmosfera da combustione per 1 kg di CSS trattato. Fonte: Elaborazione da "Updated location - and waste-specific life cycle inventories of waste treatment".	32
Tabella 16 Rappresentazione dei calcoli effettuati per calcolare i coefficienti da inserire nell'inventario del processo di incenerimento.	33
Tabella 17 Valori utilizzati per la parametrizzazione delle emissioni utilizzate per ogni scenario, al fine di descriverle in termini di unità funzionale.	34
Tabella 18 – Metodo CED - Rappresentazione degli indicatori energetici associati ai 3 scenari analizzati (1 t di rifiuto indifferenziato).	36
Tabella 19 Metodo ReCiPe, Midpoint (H) - Rappresentazione degli indicatori energetici associati ai 3 scenari analizzati (1 t di rifiuto indifferenziato).	37
Tabella 20 Metodo ReCiPe, Endpoint (H) – Risultati assoluti degli indicatori associati ai 3 scenari analizzati (1 t di rifiuto indifferenziato).	38
Tabella 21 Metodo ReCiPe, Endpoint (H) – Risultati relativi degli indicatori associati ai 3 scenari analizzati (1 t di rifiuto indifferenziato).	38
Tabella 22 Metodo CED – Rappresentazione degli indicatori energetici associati ai tre scenari analizzati (1 kWh di energia elettrica).	39
Tabella 23 Metodo ReCiPe, Midpoint (H) - Rappresentazione degli indicatori energetici associati ai 3 scenari analizzati (1 kWh energia elettrica).	40
Tabella 24 Metodo ReCiPe, Endpoint (H) - Risultati assoluti degli indicatori associati ai 3 scenari analizzati (1 kWh energia elettrica).	41
Tabella 25 Metodo ReCiPe, Endpoint (H) - Risultati relativi degli indicatori associati ai 3 scenari analizzati (1 kWh energia elettrica).	41
Tabella 26 Rappresentazione complessiva dei flussi in ingresso nel sistema e in uscita, costruita sulla base delle elaborazioni dei tecnici regionali e sulle assunzioni dello studio (Arpa, 2019).	52

Tabella 27 Rappresentazione del bilancio di massa elaborato in relazione allo scenario 2.	53
Tabella 28 Rappresentazione in termini percentuali della composizione del flusso di 191212 destinato alle operazioni D1 e D10.	53
Tabella 29 Rappresentazione del bilancio di massa elaborato in relazione allo scenario 2.	54
Tabella 30 Rappresentazione in termini percentuali della composizione del flusso di 191212 destinato alle operazioni D1 e D10.	54
Tabella 31 Rappresentazione del bilancio di massa elaborato in relazione allo scenario 2.	55
Tabella 32 Rappresentazione in termini percentuali della composizione del flusso di 191212 destinato alle operazioni D1 e D10.	55
Tabella 33 Consumi totali per degli impianti per l’anno 2020, così come comunicati dalla Direzione Regionale.	56
Tabella 34 Elaborazione dei dati relativi ai materiali trattati nell’impianto Net, per la stima della quota dei consumi corrispondente al trattamento del rifiuto indifferenziato.....	56
Tabella 35 Elaborazione dei dati relativi ai materiali trattati nell’impianto S.N.U.A., per la stima della quota dei consumi corrispondente al trattamento del rifiuto indifferenziato.....	56
Tabella 36 Elaborazione dei dati relativi ai materiali trattati nell’impianto Eco Sinergie, per la stima della quota dei consumi corrispondente al trattamento del rifiuto indifferenziato.....	57
Tabella 37 Consumi del sistema degli impianti TM elaborati in modo da evidenziare la quota dei consumi corrispondente al trattamento del solo rifiuto indifferenziato.....	57
Tabella 38 Elaborazione per il calcolo dei consumi relativi ad una tonnellata trattata.	57
Tabella 39 Tabella di input dell’analisi di inventario condotta per il processo di trattamento per i tre scenari.	57
Tabella 40 Tabella di input dell’analisi di inventario condotta per il processo di incenerimento di 1 kg di CSS. Fonte: Elaborazione da “Updated location- and waste-specific life cycle inventories of waste treatment”.	58
Tabella 41 Tabella di output dell’analisi di inventario condotta per il processo di incenerimento di 1 kg di CSS. Fonte: Elaborazione da “Updated location- and waste-specific life cycle inventories of waste treatment”.	61
Tabella 42 Tabella di input dell’analisi di inventario condotta per il processo di produzione di 1 kWh di energia elettrica tramite combustione del CSS, per tutti gli scenari analizzati.....	62
Tabella 43 Tabella di output dell’analisi di inventario condotta per il processo di produzione di 1 kWh di energia elettrica tramite combustione del CSS, per tutti gli scenari analizzati.....	65

Indice delle figure

Figura 1. Schema operativo della LCA. Fonte: Commissione Europea, Joint Research Centre (JRC).....	1
Figura 2 Schema dei confini di analisi di ciclo di vita LCA secondo la normativa ISO 14040. Fonte: Commissione Europea, Joint Research Centre (JRC).	2
Figura 3 Schema della LCA secondo la normativa ISO 14040. Fonte: Commissione Europea, Joint Research Centre (JRC).	3
Figura 4 Descrizione riassuntiva dallo scenario 0, corrispondente allo stato attuale.	8
Figura 5 Descrizione riassuntiva dello scenario 1 previsto dalla bozza di Piano.	8
Figura 6 Descrizione riassuntiva dello scenario 2 previsto dalla bozza di Piano.	9
Figura 7 Confini di sistema dell’ecoprofilo del processo di selezione del RSU.....	13
Figura 8 Confini di sistema dell’ecoprofilo dell’energia prodotta da combustione CSS.	15
Figura 9 Ecoprofilo del processo di selezione del RSU (scenario 0) - Schematizzazione del sistema in studio con evidenziazione dei flussi in ingresso e in uscita considerati.....	17
Figura 10 Ecoprofilo energia prodotta da combustione CSS - Schematizzazione del sistema in studio con evidenziazione dei flussi in ingresso e in uscita considerati.....	28
Figura 11 Metodo CED - Risultati relativi per il confronto dei tre scenari previsti dalla bozza di Piano (%)...	37
Figura 12 Metodo ReCiPe, Midpoint (H) - Risultati relativi per il confronto dei tre scenari previsti dalla bozza di Piano (%).	38
Figura 13 Metodo ReCiPe, Endpoint (H) - Valutazione degli impatti del ciclo di vita: confronto tra i 3 scenari (1 t di rifiuto indifferenziato).	39
Figura 14 Metodo CED - Risultati relativi per il confronto dei tre scenari previsti dalla bozza di Piano (%)...	40
Figura 15 Metodo ReCiPe, Midpoint (H) - Risultati relativi per il confronto dei tre scenari previsti dalla bozza di Piano (%).	41
Figura 16 Metodo ReCiPe, Endpoint (H) - Valutazione degli impatti del ciclo di vita: confronto tra i 3 scenari (1 kWh energia elettrica).	42
Figura 17 Metodo ReCiPe, Midpoint (H) - ecoprofilo del processo di selezione del RSU (1 t di RSU indifferenziato trattata) - Analisi di contributo all’impatto dei processi per la categoria Global Warming. ..	43
Figura 18 Metodo CED - ecoprofilo del processo di selezione del RSU - Analisi di contributo all’impatto dei processi per la categoria Non renewable, fossil.....	44
Figura 19 Metodo ReCiPe, Midpoint (H) - ecoprofilo energia prodotta da combustione CSS RSU (1 kWh prodotto) - Analisi di contributo all’impatto dei processi per la categoria Global Warming.	45
Figura 20 Metodo CED - ecoprofilo energia prodotta da combustione CSS (1 kWh prodotto) - Analisi di contributo all’impatto dei processi per la categoria Non renewable, fossil.	46

Introduzione

La programmazione e la gestione della filiera dei rifiuti necessitano di strumenti di valutazione che consentano di stimare in maniera oggettiva i potenziali effetti ambientali (impatti) che si possono verificare a seguito del perseguimento di proposte progettuali e permettano eventualmente di supportarne le scelte.

Uno strumento utile allo scopo è la Life Cycle Assessment (LCA). La LCA è basata sulla normativa internazionale serie ISO 14040-44 ed è finalizzata allo studio dei potenziali impatti ambientali che si possono generare lungo tutto il ciclo di vita di un prodotto, di un processo o di servizio, secondo un approccio che va dalla acquisizione delle materie prime, alla produzione, all'utilizzazione, sino ad includere lo smaltimento finale. La metodologia permette quindi di individuare e, soprattutto, quantificare in modo oggettivo e confrontabile le potenziali prestazioni ambientali di un prodotto, di un processo o di un servizio.

Base di partenza metodologica

Nel presente capitolo è sinteticamente introdotta la metodologia LCA (Life Cycle Assessment), coerentemente con la normativa ISO 14040-44 e le linee guida ILCD (International Reference Life Cycle Data System) pubblicate dalla Commissione Europea nel marzo 2010 (eplca.jrc.ec.europa.eu, 2010).

Di seguito si riportano gli aspetti metodologici rilevanti ai fini della LCA che saranno richiamati nello studio.

Introduzione alla metodologia LCA

La metodologia di Analisi di Ciclo di Vita (LCA), può essere definita come:

“Tecnica oggettiva di valutazione ambientale per la quantificazione degli impatti ambientali di un prodotto o di un processo durante tutte le fasi del ciclo di vita, attraverso la misura sistematica di tutti gli scambi fisici da e per il sistema ambiente”



Figura 1. Schema operativo della LCA. Fonte: Commissione Europea, Joint Research Centre (JRC).

La metodologia è basata su criteri oggettivi che consentono di individuare e valutare i potenziali impatti ambientali e i carichi energetici di un processo, attraverso l'identificazione dei flussi in entrata e in uscita lungo tutto il ciclo di vita.

La valutazione comprende tutte le fasi: l'estrazione e il trattamento della materia prima, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale.

A seconda dei confini di estensione dello studio sono identificabili tre situazioni alternative:

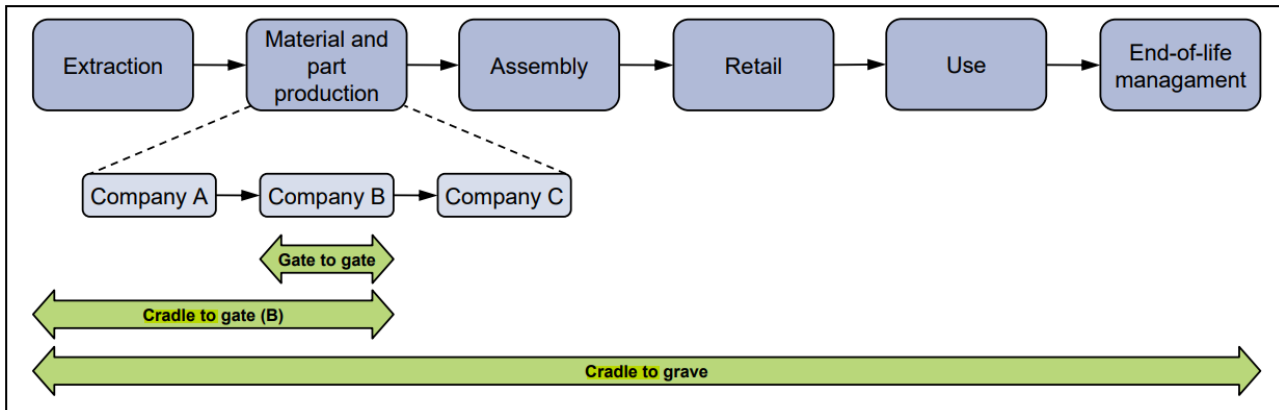


Figura 2 Schema dei confini di analisi di ciclo di vita LCA secondo la normativa ISO 14040. Fonte: Commissione Europea, Joint Research Centre (JRC).

In base alla normativa ISO 14040, le fasi di un'analisi del ciclo di vita sono le seguenti:

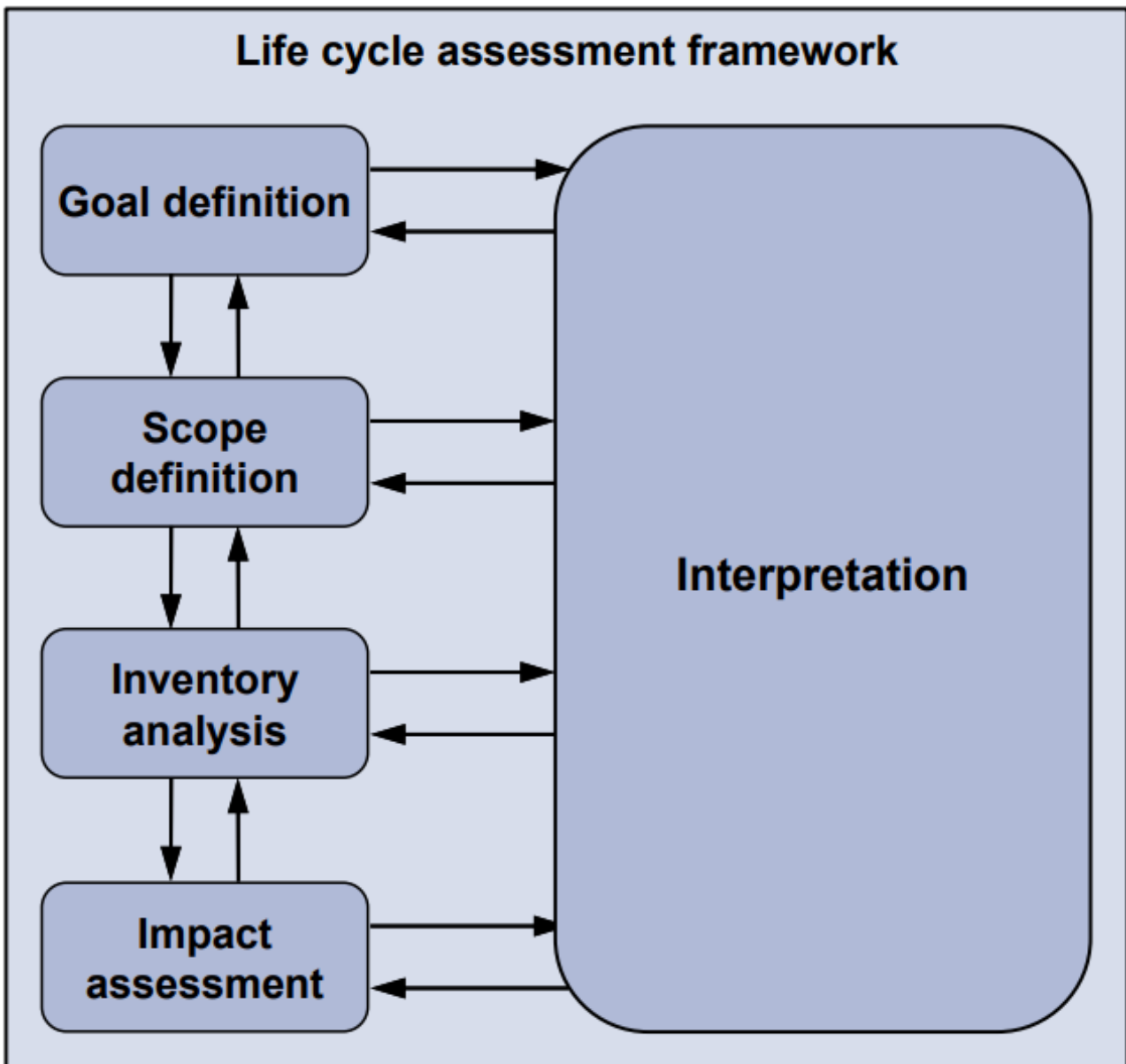


Figura 3 Schema della LCA secondo la normativa ISO 14040. Fonte: Commissione Europea, Joint Research Centre (JRC).

Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione

È la prima fase, in cui sono dichiarate le finalità dello studio ed il suo campo di applicazione, l'unità funzionale e i confini dello studio LCA. Tale fase determina tutta l'impostazione di uno studio LCA, descrive il sistema oggetto dello studio e determina le categorie di dati da reperire, le assunzioni ed i limiti.

Analisi dell'inventario del ciclo di vita (Life Cycle Inventory analysis – LCI)

Comprende la raccolta dei dati e dei procedimenti di calcolo che consentono di quantificare i flussi in entrata e uscita di un sistema di prodotto. È sicuramente la fase più importante di uno studio LCA: realizza la costruzione di un modello del sistema reale esaminato e consente di determinare gli input e gli output fisici

in funzione degli obiettivi dello studio. Per tale ragione questa fase viene solitamente supportata da software e banche dati dedicate.

Valutazione dell'impatto del ciclo di vita (Life Cycle Impact Assessment – LCIA)

È la fase di elaborazione dei risultati dell'inventario acquisiti, con lo scopo di valutare la portata dei potenziali impatti ambientali e quindi di evidenziare l'entità delle modificazioni ambientali che si generano a seguito dei rilasci nell'ambiente.

Interpretazione e miglioramento del ciclo di vita (Life Cycle Interpretation)

È la fase conclusiva di valutazione del ciclo di vita, nella quale i risultati ottenuti nell'analisi d'inventario e nella valutazione dell'impatto sono combinati coerentemente con l'obiettivo prestabilito e lo scopo da raggiungere. La fase di Interpretazione dei risultati ha lo scopo di ricavare conclusioni e raccomandazioni, necessarie a ridurre l'impatto ambientale dei processi o delle attività considerati, valutandoli in maniera iterativa con la stessa metodologia.

Unità funzionale

“Lo scopo principale dell'unità funzionale è di fornire un riferimento cui legare i flussi in uscita ed in entrata” (UNI EN ISO 14041/44)

La scelta dell'unità funzionale è arbitraria, ma deve essere chiaramente definita e misurabile e deve essere correlata alla funzione svolta dal sistema oggetto di studio.

Ad es., nel caso dei sistemi di gestione dei rifiuti le unità funzionali tipicamente adottate sono:

- 1 tonnellata di rifiuto da smaltire;
- tonnellate totali da smaltire nell'arco di un anno.

Ogni scelta di unità funzionale deve essere opportunamente giustificata e inquadrata coerentemente con gli obiettivi dell'applicazione LCA.

Confini di sistema

L'estensione dei confini di sistema di uno studio LCA è probabilmente l'elemento più importante e delicato di cui tenere conto, poiché le ipotesi sulla definizione di tali confini influenzano in modo pesante i risultati.

In primo luogo, è necessario definire in modo preciso a quali elementi del ciclo di vita dei servizi e a quali elementi della filiera l'analisi verrà estesa. Per quanto riguarda gli studi effettuati sul sistema di gestione rifiuti i confini di sistema sono particolarmente critici e devono essere definiti con attenzione.

Fonti di dati e diretti/indiretti e strumenti informatici LCA

Le fonti di dati utilizzate nel modello LCA ed i soggetti responsabili del loro reperimento sono elementi essenziali che condizionano fortemente la qualità e l'affidabilità di uno studio LCA nonché l'utilizzabilità dei risultati.

Gli strumenti informatici utilizzati come supporto per lo sviluppo e l'analisi LCA sono ad esempio i seguenti:

- Software LCA: openLCA 1.10.3 con il relativo pacchetto metodi 2.1.1;
- Database LCA (dati secondari e terziari): ecoinvent 3.7.1, Allocation, cut-off by classification;
- Fogli di calcolo specifici per l'elaborazione di analisi di inventario elaborati da società di consulenza.

Nota metodologica: Il modello del sistema "Allocation, cut-off by classification" si basa sull'idea che un produttore è pienamente responsabile per lo smaltimento dei propri rifiuti (ma non dei processi di riciclaggio) e non riceve alcun credito per la fornitura di materiali riciclabili.

Alcune tra le fonti di dati primari sono ad esempio:

- I documenti pianificatori (ad es. la bozza di Progetto di Piano regionale di gestione dei rifiuti urbani, Aggiornamento 2022, revisione aprile 2021);
- Le elaborazioni relative ai dati ambientali tipicamente disponibili (ad es. i modelli unici di Dichiarazione Ambientale forniti da ARPA Friuli-Venezia Giulia);
- Le caratterizzazioni merceologiche (ad es. quelle riferite al CSS fornite da Net s.p.a. ed Eco Sinergie S.c.a.r.l. relativamente agli impianti ubicati e attivi in Regione Friuli-Venezia Giulia);
- I consumi energetici e di acqua per anno (ad es. quelli forniti su base annuale da Net s.p.a., Eco Sinergie S.c.a.r.l. e S.N.U.A. s.r.l. relativamente agli impianti ubicati e attivi in Regione Friuli-Venezia Giulia).

Indicatori ambientali tipicamente utilizzati negli studi LCA nel settore dei rifiuti

Per rendere fruibili al meglio i risultati ottenuti dall'analisi LCA, per apprezzarne a fondo il significato ambientale e per comunicarli agli addetti ai lavori e al pubblico, devono essere individuate delle aree di interesse ambientale (categorie di impatto) e per ognuna di esse occorre selezionare opportuni indicatori.

Detti indicatori (cosiddetti di categoria = riferiti ad un singolo impatto ambientale) sintetizzano gli effetti ambientali potenziali associabili ai flussi di materia/energia in ingresso/uscita dal sistema studiato.

Nella fase di analisi degli impatti per processi analoghi a quello oggetto di studio sono comunemente utilizzati i seguenti indicatori:

- **Emissione di gas ad effetto serra:** fornisce un risultato in termini di impatti ambientali causati dall'emissione in atmosfera di gas climalteranti, valutati con orizzonte temporale di 100 anni (IPCC, 2007 e versioni successive). Per ciascun gas serra, il valore del potenziale è espresso dal rapporto tra l'assorbimento di radiazione infrarossa causata dall'emissione di 1 kg di tale sostanza e quello causato da una stessa emissione di anidride carbonica, sostanza presa come riferimento.
- **Assottigliamento fascia d'ozono stratosferico:** l'ozono è il gas che caratterizza la stratosfera ed ha la funzione di schermare la Terra dai raggi ultravioletti del sole; i CFC (Cloro-fluoro-carburi) intaccano le molecole di ozono e col passare del tempo hanno creato il ben noto "buco". Le maggiori conseguenze di questo fenomeno riguardano soprattutto la salute dell'uomo (carcinomi, riduzione sistema immunitario). Viene quantificato dai kg CFC11 equivalenti; per standardizzare i valori relativi alle varie sostanze, si utilizza il potenziale di riduzione dell'ozono (ODP) che si basa sul numero di

reazioni di rottura della molecola di ozono [lista prodotta dal World Meteorological Organization - WMO]

- **Acidificazione:** consiste nell'abbassamento del pH di laghi, fiumi, foreste, suoli, il che porta a pesanti conseguenze per l'uomo e per l'ambiente naturale. Principali responsabili sono le emissioni provenienti dall'utilizzo di combustibili fossili, in particolare di quelli ad elevato contenuto di zolfo. Viene espressa in termini di kg di SO₂ equivalenti oppure di moli di H⁺ equivalenti attraverso il sistema di standardizzazione che considera il potenziale di acidificazione (AP); questo viene calcolato prendendo in considerazione gli ioni potenziali H⁺ della sostanza in esame.
- **Eutrofizzazione:** Consiste nell'abbassamento del tenore di ossigeno nei suoli e nelle acque superficiali a seguito del massiccio apporto di sostanze come il fosforo e l'azoto (contenuti negli scarichi urbani e nei fertilizzanti). L'effetto risulta particolarmente evidente nei bacini lacustri per via della formazione di alghe in sovrannumero. Il BOD e il COD (espressi in kg di O₂) rappresentano le unità di misura che quantificano la domanda di ossigeno necessario per raggiungere la purezza naturale. Attraverso il potenziale di eutrofizzazione (NP) si ricavano i kg di N o di P equivalenti.
- **Formazione di particolato fine:** Si tratta di un effetto ambientale causato dalla presenza in atmosfera di materiale in forma di particelle microscopiche derivante da sorgenti naturali e da attività antropiche (principalmente processi di combustione). Data la particolare dimensione ridotta, esso viene inalato dall'uomo e provoca problemi di salute di vario tipo. L'unità di misura è il kg di PM_{2,5}-equivalenti. Ai fini delle valutazioni, si considera solo il contributo dato alla frazione di particolato che può essere influenzata dall'attività umana.
- **Impoverimento risorse minerali e fossili:** questa categoria rappresenta il consumo di risorse minerali e fossili. Le unità di misura rispettivamente per l'impoverimento di risorse minerali e fossili sono: kg Cu-equivalenti e kg oil-equivalenti.
- **Tossicità umana:** effetti carcinogeni e non carcinogeni. I fattori di effetto per la tossicità umana sono stati ricavati per gli effetti carcinogeni e non carcinogeni separatamente, in questo modo riflettendo il cambiamento nel corso della vita dell'incidenza di malattie dovuto alla variazione dell'assunzione della sostanza. L'unità di misura è il kg di 1,4-diclorobenzene-equivalente (1,4DCB-eq).
- **Uso di energia non rinnovabile:** Questa categoria rappresenta l'energia in ingresso per la generazione di un prodotto, nello specifico derivante da risorse non rinnovabili, fossili. È quindi utile nella quantificazione della quantità di energia, in particolare nell'analisi di processi che ne vanno a sfruttare grandi quantità, che provengono da determinate fonti. In modo tale da poter identificare la provenienza dell'energia che entra nel ciclo di vita di un prodotto, ottenendo un risultato semplicemente quantificabile in MJ.

Impatti causati e impatti evitati

In ottica LCA si considerano solitamente i bilanci di ciclo vita in termini di footprint. Tali bilanci sono costituiti dalla somma di impatti generati e di impatti evitati lungo l'intero arco del ciclo di vita. Il risultato finale dipende dalla somma algebrica dei singoli contributi di ciascuna delle fasi del ciclo di vita incluse nel modello LCA.

Questo significa che il valore finale degli indicatori di ciclo vita può avere segno algebrico positivo oppure negativo: positivo quando gli impatti generati sono maggiori di quelli evitati, negativo quando accade il contrario.

In pratica, in un sistema di gestione dei rifiuti, quando il valore finale dell'indicatore risulta essere negativo, questo significa che il bilancio energetico/ambientale del sistema porta ad un netto beneficio ambientale.

Nel caso dell'energia, un valore negativo degli indicatori implica che il sistema di gestione dei rifiuti produce più energia di quanta ne consuma. Tuttavia, le conseguenze di questo tipo di risultato non devono essere trattate con superficialità, in quanto potrebbero essere causa di malintesi. In effetti, il bilancio energetico può evidenziare una prevalenza dei consumi/impatti evitati rispetto a quelli causati, solo perché non si considera il ciclo di vita dei prodotti prima del momento in cui diventano rifiuti. Tale considerazione vale anche nel caso di alcuni indicatori ambientali.

La conseguenza è che qualcuno potrebbe erroneamente pensare che più rifiuti si producono e più energia si può ottenere. Questa è l'immediata (e banale) conseguenza di un indicatore di ciclo vita con segno algebrico negativo.

Nel ciclo di vita dei prodotti il bilancio energetico ed ambientale non si può chiudere con la produzione netta di energia e, conseguentemente, con benefici ambientali netti. Quel che si può (e si deve) fare è studiare (e progettare) il ciclo vita in modo rigoroso per cercare soluzioni con minori conseguenze energetico ambientali (Blengini and Genon, 2008).

Nota metodologica sulla gestione dell'anidride carbonica da fonte biogenica

Negli studi LCA possono essere considerati diversi criteri per il conteggio delle emissioni di anidride carbonica da fonte biogenica. Infatti, per i materiali di origine vegetale possono essere assegnati i crediti di biossido di carbonio, ovvero le quantità di anidride carbonica che le biomasse legnose sequestrano dall'atmosfera durante la fase di crescita.

Secondo la letteratura internazionale sono diversi i criteri adottabili.

Il primo criterio prevede l'assegnazione a priori del credito di CO₂ alla biomassa legnosa in ingresso al modello LCA, dopodiché, nella fase di fine vita tutte le emissioni di anidride carbonica, compresa quelle di origine biogenica, sono conteggiate nel calcolo dell'indicatore "Global Warming Potential" (GWP), senza esclusioni.

Il secondo criterio non prevede l'assegnazione del credito di CO₂ a priori, ma nel fine vita le emissioni biogeniche di biossido di carbonio sono considerate neutre, da un punto di vista dell'effetto serra.

Il terzo criterio prevede l'assegnazione a posteriori del credito della CO₂ alle sole biomasse che nel fine vita vengono riutilizzate ed il conteggio delle emissioni di biossido di carbonio da origine biogenica.

Si noti che i tre criteri portano allo stesso risultato, nel caso della realizzazione di un modello LCA rigoroso. Tuttavia, poiché nella realtà è necessario introdurre delle semplificazioni al modello LCA, è possibile, e probabile, che non tutte le emissioni/crediti legate al fine vita delle biomasse vengano conteggiate.

In sostanza, come spesso accade nelle applicazioni a casi reali, è possibile che il primo criterio porti all'assegnazione di crediti di CO₂ che poi non vengono "restituiti" nel fine vita, distorcendo i risultati dell'analisi.

Analisi del ciclo di vita del rifiuto indifferenziato in Friuli-Venezia Giulia

1. Introduzione

La pianificazione della gestione del rifiuto solido urbano indifferenziato è di particolare interesse per la Direzione centrale difesa dell'ambiente, energia e sviluppo sostenibile della Regione Friuli-Venezia Giulia, perché direttamente gestibile a livello regionale. A tal proposito, nell'ambito delle attività di programmazione in capo alla Direzione stessa è stato predisposto l'aggiornamento del Piano Regionale di Gestione dei Rifiuti Urbani relativo al periodo 2022, la cui bozza aggiornata ad aprile 2021 è stata posta alla base della presente analisi di ciclo di vita (LCA). L'obiettivo dell'analisi è pertanto quantificare e valutare ai fini di supportare le decisioni, l'uso di risorse e gli impatti ambientali associati a tre diversi scenari di gestione del rifiuto solido urbano indifferenziato presentati nella bozza di Piano.

Oggetto dello studio sono i tre scenari di gestione del rifiuto indifferenziato descritti nella parte programmatica della bozza di Piano stessa:

- scenario 0 – nessuna azione integrativa attuata (Figura 4);

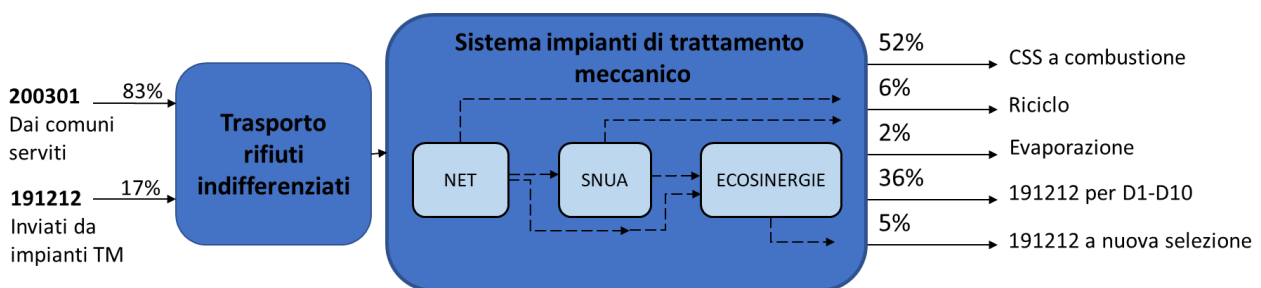


Figura 4 Descrizione riassuntiva dallo scenario 0, corrispondente allo stato attuale.

- scenario 1 – Costruzione di un nuovo impianto di combustione del Combustibile Solido Secondario (CSS), comprensivo di una sezione di raffinazione del sovrappeso prodotto in Regione Friuli-Venezia Giulia e produzione del CSS (Figura 5);

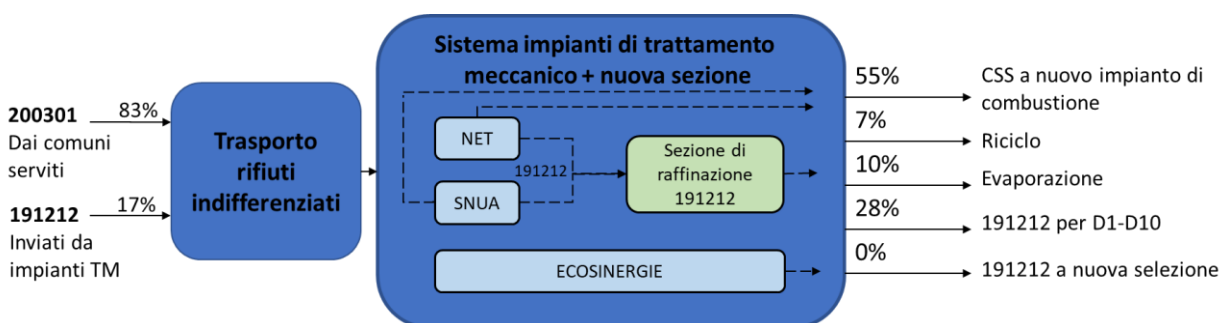


Figura 5 Descrizione riassuntiva dello scenario 1 previsto dalla bozza di Piano.

- scenario 2 – ammodernamento dei tre impianti di trattamento meccanico (TM) esistenti e costruzione di un nuovo impianto di combustione del CSS (Figura 6).

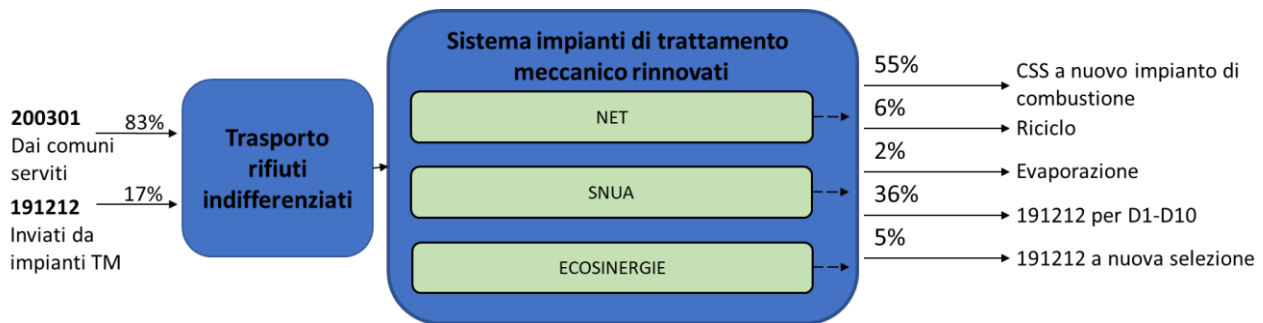


Figura 6 Descrizione riassuntiva dello scenario 2 previsto dalla bozza di Piano.

La valutazione in chiave LCA degli scenari ipotizzati nella bozza di Piano, effettuata per conto della Direzione centrale, consiste nel presente elaborato e in un modello informatico realizzato grazie all'ausilio del programma openLCA 1.10.3, comprendente il pacchetto di metodi di valutazione degli impatti LCIA (versione 2.1.1), del database ecoinvent v3.7.1, Allocation, cut-off by classification e di un foglio di calcolo elaborato dalla società di consulenza Doka LCA.

La raccolta dei dati necessari per lo svolgimento dello studio è stata effettuata dalla Direzione centrale difesa dell'ambiente della Regione Friuli-Venezia Giulia. Tutti i dati sono stati tradotti nel software riferendosi il più possibile alle unità di processo presenti nel database ecoinvent v3.7.1; ove ciò non è stato possibile è stato necessario creare apposite unità di processo.

I risultati dello studio sono destinati al supporto di decisioni.

2. Obiettivo e campo di applicazione

In uno studio LCA non è possibile comprendere tutte le possibili implicazioni ambientali e dare una risposta a tutte le problematiche; è necessario invece definire con cura gli obiettivi dello studio.

I modelli LCA possono essere utili ad interpretare sistemi complessi e individuare soluzioni efficaci quando obiettivi ed approccio sono delineati con chiarezza. Ad esempio, la definizione dei confini di sistema deve tenere conto di criteri rigorosi e chiari, se non si vuole compromettere la qualità dei risultati.

L'obiettivo dello studio LCA condotto per la Regione Friuli-Venezia Giulia è il seguente:

Analisi, attraverso la tecnica della Life Cycle Assessment (LCA), degli scenari previsti dall'aggiornamento del "Piano regionale di gestione dei rifiuti urbani – Aggiornamento 2022", revisione aprile 2021, consistenti in:

- scenario 0 – nessuna azione integrativa attuata;
- scenario 1 – Costruzione di un nuovo impianto di combustione del CSS, comprensivo di una sezione di raffinazione del sovrappeso prodotto in Regione finalizzata alla produzione del CSS.
- scenario 2 – ammodernamento dei tre impianti di TM esistenti e costruzione di un nuovo impianto di combustione del CSS.

L'obiettivo consiste dunque nella quantificazione degli impatti ambientali e dell'uso di risorse associati al trattamento dell'RSU indifferenziato prodotto in Regione Friuli-Venezia Giulia e nella simulazione di possibili scenari relativi agli impatti generati dalla combustione del CSS prodotto dal processo di selezione.

A tal proposito, lo studio LCA è stato diviso in due parti. Le due parti dello studio cui si farà riferimento sono:

- Parte 1 (ecoprofilo del processo di selezione del RSU): profilo ambientale relativo al processo di selezione del RSU prodotti e raccolti in Regione Friuli-Venezia Giulia nell'anno 2019;
- Parte 2 (ecoprofilo energia prodotta da combustione CSS): profilo ambientale relativo al kWh prodotto dalla combustione del CSS selezionato, utilizzato in un impianto di combustione ubicato all'interno del territorio della Regione Friuli-Venezia Giulia.

La ricerca è stata commissionata dalla Direzione Centrale regionale, per supportare le decisioni relative alla programmazione della gestione del rifiuto indifferenziato. Lo studio è rivolto ai tecnici e ai decisori politici dell'Ente committente e ai principali stakeholder della filiera del rifiuto indifferenziato in Regione Friuli-Venezia Giulia.

Unità funzionale

Parte 1 - ecoprofilo del processo di selezione del RSU

L'unità funzionale scelta è "1 tonnellata di rifiuto indifferenziato prodotto e selezionato in Regione Friuli-Venezia Giulia".

Il rifiuto indifferenziato è costituito dalla frazione secca residua non riciclabile ovvero, in generale, da tutto ciò che non può essere conferito nelle raccolte differenziate e che viene identificato con il codice CER 200301 e dai sovvalli identificati con il codice CER 191212.

Tale unità funzionale permette di valutare e confrontare l'efficienza energetica ed ambientale di scenari alternativi, con riferimento ad una quantità unitaria di rifiuto.

Parte 2 - ecoprofilo energia prodotta da combustione CSS

L'unità funzionale scelta è "1 kWh di energia elettrica ottenuto dalla combustione di CSS" prodotto in seguito ai trattamenti di cui alla Parte 1.

Tale unità permette di valutare e confrontare i potenziali impatti relativi alla combustione di CSS per produzione di energia elettrica, generati dai diversi processi di selezione considerati negli scenari della bozza di Piano ed effettuati in Regione Friuli-Venezia Giulia.

Confini di sistema

I confini di sistema definiscono quali processi siano inclusi o esclusi dal sistema in esame. L'identificazione della loro estensione è un elemento estremamente importante di uno studio LCA specifico per il settore dei rifiuti e le ipotesi sulla definizione di essi influenzano in modo decisivo i risultati. Pertanto, una definizione attenta dei confini di sistema riduce i rischi di spostamento dell'attribuzione di impatti nel sistema in analisi.

È quindi necessario definire con precisione a quali elementi del ciclo di vita della filiera dei rifiuti estendere l'analisi e giustificare tali scelte.

Criteri e assunzioni comuni

Dal momento che nei tre scenari confrontati, la quantità totale di RSU indifferenziato trattato rimane costante, si è proceduto conformemente alla ISO 14040, ovvero escludendo le parti del ciclo di vita comuni a tutti gli scenari. Si è pertanto adottata la semplificazione nota come “zero burdens”, per la quale, al rifiuto in ingresso nel sistema non sono attribuiti contributi dovuti alla loro generazione. I rifiuti non hanno memoria storica degli impatti, ma è bene ricordare che a causa di questa semplificazione sia necessaria particolare attenzione nell'analizzare gli impatti, poiché si potrebbe erroneamente credere che talora la generazione di rifiuti comporti un impatto positivo sull'ambiente (Blengini and Genon, 2008).

L'approccio relativo al conteggio della CO₂ di origine biogenica, raccomandato dalla comunità scientifica internazionale (Rabl et al., 2007) e adottato nel presente studio, è il seguente:

- 1) Dato che la fase di accrescimento delle biomasse rientra nelle fasi del ciclo di vita precedenti alla generazione del rifiuto, gli eventuali crediti non vengono conteggiati (si veda ipotesi “zero burdens”: il rifiuto non ha memoria storica di impatti/benefici precedenti a quando è diventato rifiuto);
- 2) tutte le emissioni climalteranti di origine biogenica sono conteggiate nel momento in cui vengono generate (es. emissioni di CO₂ e CH₄ dalle discariche, da trattamenti aerobici ed anaerobici della FORSU, da combustione di biogas, da incenerimento).

Tradizionalmente, il trasporto di rifiuti è inteso come l'insieme di operazioni che consentono di prelevare in modo capillare il rifiuto dal luogo in cui viene generato e di trasportarlo in un centro logistico dal quale a sua volta viene inviato a successive operazioni di trattamento, valorizzazione e smaltimento (Blengini e Genon, 2008). È da evidenziare che spesso la fase di trasporto sia tralasciata negli studi LCA sui sistemi di gestione dei rifiuti, perché considerata trascurabile sulla base di studi precedenti (Laurent et al., 2014). È però vero che, seppure in misura differente da caso a caso, il contributo all'impatto del trasporto e dei beni strumentali al trattamento del rifiuto non sia sempre marginale e dipenda anche dai confini del sistema considerati.

Parte 1 - ecoprofilo del processo di selezione del RSU

I confini del sistema associati a questa parte dello studio comprendono il ciclo di vita secondo l'approccio “dalla-culla-al-cancello”, per il quale la culla, per le considerazioni riportate nel paragrafo precedente, corrisponde alla produzione del rifiuto.

I confini del sistema analizzato per la determinazione dell'ecoprofilo del processo di selezione dei rifiuti solidi urbani in Regione Friuli-Venezia Giulia possono essere rappresentati per mezzo del diagramma in Figura 7:

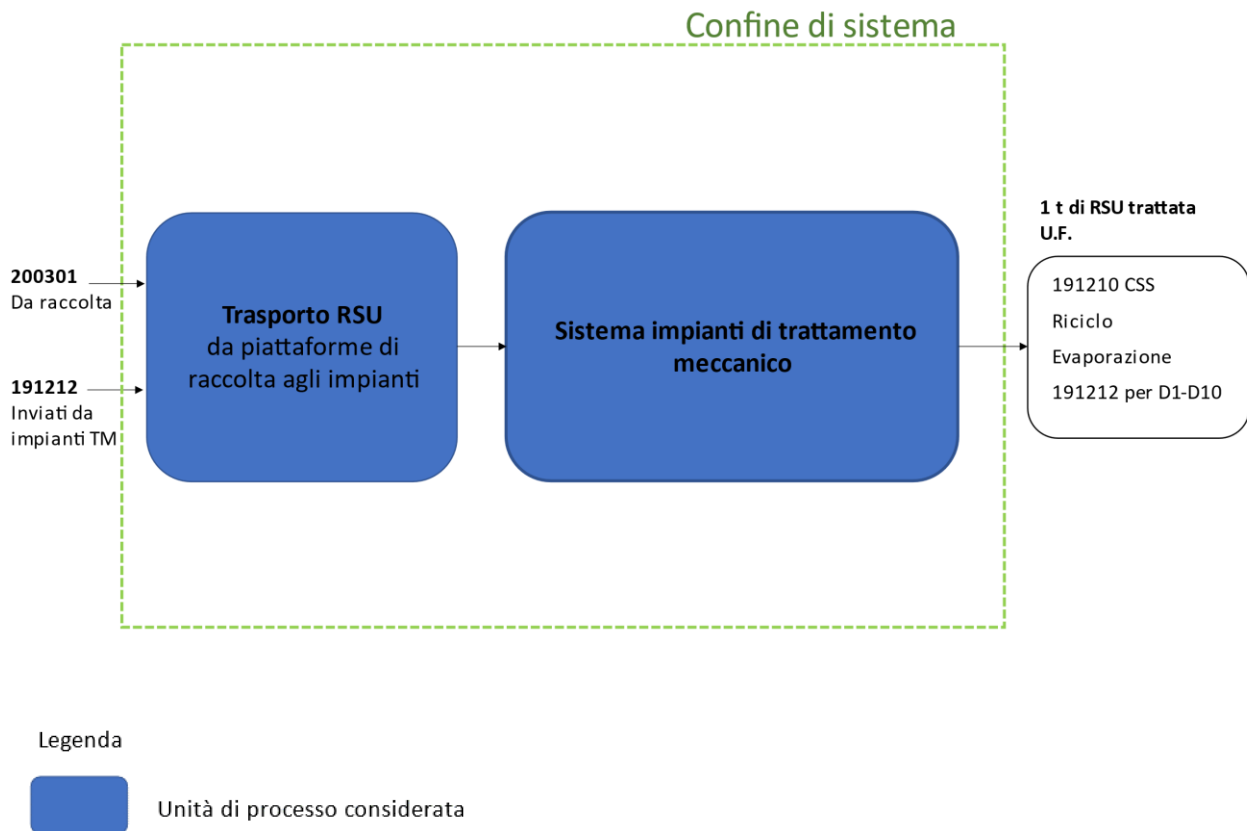


Figura 7 Confini di sistema dell'ecoprofilo del processo di selezione del RSU.

Nei confini di sistema sono state quindi incluse le fasi principali della filiera del rifiuto indifferenziato, a partire dal trasporto del rifiuto dai Comuni serviti, fino alla separazione dei vari flussi selezionati comprendendo anche i trasporti del CSS prodotto, seppur all'occasione stimati.

In dettaglio, le fasi del ciclo di vita prese in considerazione nella Parte 1 del modello LCA sono le seguenti:

- trasporto dalle aree comunali servite dai gestori territoriali agli impianti di trattamento meccanico. È considerato solo il viaggio di andata e sono escluse la raccolta capillare nei Comuni stessi e la produzione di contenitori;
- trattamenti di selezione del RSU e produzione del CSS, presso i tre stabilimenti presenti in Regione Friuli-Venezia Giulia (Net s.p.a., Eco Sinergie S.c.a.r.l. e S.N.U.A. s.r.l.).

In Regione Friuli-Venezia Giulia sono attualmente operativi quattro impianti, tutti dedicati al trattamento del rifiuto urbano residuo. Essi sono:

- l'impianto di produzione di CSS Eco Sinergie di San Vito al Tagliamento;
- l'impianto di trattamento meccanico e produzione di CSS Net di San Giorgio di Nogaro;
- l'impianto di trattamento meccanico e produzione di CSS S.N.U.A. di Aviano;
- l'impianto di incenerimento Hestambiente di Trieste.

Impianto	Quantità autorizzata impianto [t/anno]	Quantità trattata 200301 [t]
ECO SINERGIE - San Vito al Tagliamento	140.800	21.459
NET - San Giorgio di Nogaro	71.000	46.156
S.N.U.A. - Aviano	90.000	14.528
HESTAMBIENTE - Trieste	197.000	97.125

Tabella 1 Descrizione dell'impiantistica regionale. Fonte: "Piano regionale di gestione dei rifiuti urbani – Aggiornamento 2022".

Nello studio sono stati considerati solo i tre impianti identificati dai diversi scenari descritti nella bozza di Piano, la quale esclude dalla valutazione l'impianto di incenerimento Hestambiente di Trieste perché già operativo a pieno regime e dedicato pressoché in maniera esclusiva al trattamento dell'RSU indifferenziato proveniente dalla città di Trieste.

Parte 2 – ecoprofilo energia prodotta da combustione CSS

Nella seconda parte dello studio il confine del sistema considerato include i limiti della precedente Parte 1 e si estende fino a comprendere il conferimento del CSS generato dal processo di selezione in un impianto di combustione dedicato alla produzione di energia.

L'impianto di combustione previsto dalla bozza di Piano è di tipo cogenerativo, ovvero prevede sia una valorizzazione elettrica che termica dell'energia prodotta attraverso la combustione. Ai fini dello studio LCA, considerata la scarsità e l'incertezza delle informazioni a disposizione degli autori e in accordo con la Direzione Regionale e con l'unità funzionale individuata, si è scelto di considerare l'output che sarà preponderante per l'impianto, ovvero l'energia elettrica. In tal senso, la totalità degli impatti potenziali successivamente determinati in relazione al kWh di energia elettrica prodotto, sarà attribuita interamente al solo vettore elettrico. Nel futuro, in sede di progettazione esecutiva dell'intervento, il soggetto attuatore dovrà rivedere i contributi agli impatti calcolati nel presente studio, tenendo nel giusto conto anche l'energia termica ottenuta grazie alla cogenerazione.

I confini del sistema considerati nella presente Parte 2 possono essere rappresentati per mezzo del seguente diagramma:

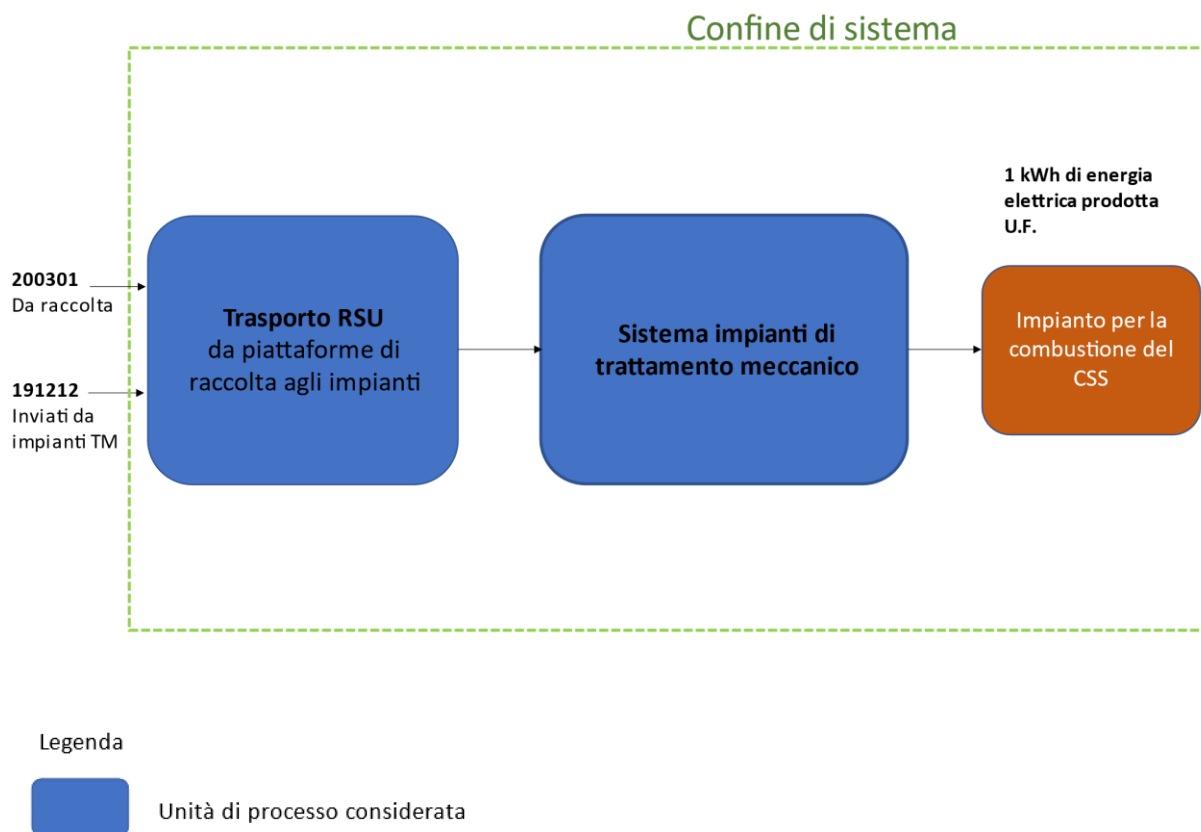


Figura 8 Confini di sistema dell'ecoprofilo dell'energia prodotta da combustione CSS.

In dettaglio, le fasi del ciclo di vita prese in considerazione nel modello LCA sono pertanto le seguenti:

- trasporto dalle aree comunali servite dai gestori territoriali agli impianti di trattamento meccanico. È considerato solo il viaggio di andata e sono escluse la raccolta capillare nei Comuni stessi e la produzione di contenitori;
- trattamenti di selezione del RSU e produzione del CSS, presso i tre stabilimenti presenti in Regione Friuli-Venezia Giulia (Net s.p.a., Eco Sinergie S.c.a.r.l. e S.N.U.A. s.r.l.) (Parte 1). I confini di sistema dell'ecoprofilo del processo di selezione escludono le fasi di trattamento finale dei materiali selezionati diversi dal CSS generato che avvengono in impianti esterni a quelli considerati. La scelta è stata dettata dall'indisponibilità di informazioni di dettaglio concernenti i processi che avvengono al di fuori dei confini nazionali e regionali;
- trasporto del CSS dagli impianti di trattamento meccanico all'impianto di combustione;
- trattamento del CSS nell'impianto di combustione per la generazione di energia elettrica.

3. Analisi di inventario

L'analisi di inventario è una delle attività principali di uno studio LCA e si basa sulla capacità di correlare le unità di processo all'interno del sistema con flussi di materiali ed energia.

Rispetto alle LCA di prodotto, condurre uno studio LCA sui sistemi di gestione dei rifiuti comporta difficoltà aggiuntive, individuabili ad esempio nell'eterogeneità della composizione del rifiuto e nelle diverse qualità dei flussi di materiali (Laurent et al., 2014).

Ai fini dell'analisi, la Direzione Centrale regionale ha raccolto e reso disponibili il maggior numero possibile di informazioni relative alla filiera del RSU indifferenziati e agli scambi che avvengono negli impianti di trattamento meccanico (TM), Net s.p.a., Eco Sinergie S.c.a.r.l. e S.N.U.A. s.r.l.

In particolare, le informazioni utilizzate nello studio relative agli scambi di materiali all'interno degli impianti, sono state desunte dai Modelli Unici di Dichiarazione ambientale (MUD) depositati dai gestori degli impianti. La dichiarazione MUD è articolata in tre moduli: uno per i rifiuti in entrata (RT), uno per i rifiuti gestiti (MG) e uno per i rifiuti in uscita (DR). Le informazioni, desunte dal MUD, sono state predisposte da ARPA Friuli-Venezia Giulia e rielaborate all'occorrenza dal personale tecnico della Regione Friuli-Venezia Giulia in un foglio di calcolo di più semplice consultazione, utilizzato successivamente dagli autori come base per ulteriori elaborazioni.

Si sottolinea che la qualità e il dettaglio delle informazioni desumibili dai MUD degli impianti è risultata particolarmente limitata, sia per quanto riguarda le quantità scambiate, che per la composizione dei flussi di materia. Pertanto, per ovviare a tali carenze, si è reso necessario ricorrere a semplificazioni consistenti e ad assunzioni specifiche, esplicitate nei paragrafi successivi.

Le informazioni relative ai consumi di energia e acqua presso gli impianti di Net s.p.a., Eco Sinergie S.c.a.r.l. e S.N.U.A. s.r.l. sono state fornite dai gestori degli impianti stessi alla Direzione centrale, attraverso la compilazione di uno specifico questionario di acquisizione dati.

A livello modellistico gli impianti di trattamento e i relativi scambi di sovralli all'interno dei confini regionali, sono stati rappresentati complessivamente attraverso la definizione di un unico processo di trattamento "equivalente", racchiudente al suo interno tutti gli scambi e i consumi energetici in essere dei tre impianti, sovralli inclusi. Tale rappresentazione ha permesso di considerare correttamente gli scambi di sovralli tra gli impianti perché interni al processo stesso ed è identificabile nel modello di calcolo tramite l'etichetta "Sistema impianti di trattamento meccanico".

Le informazioni relative ai processi di trasporto, di produzione dell'energia elettrica e termica sono stati desunti dalla banca dati ecoinvent 3.7.1, Allocation, cut-off by classification.

Parte 1 – ecoprofilo del processo di selezione del RSU

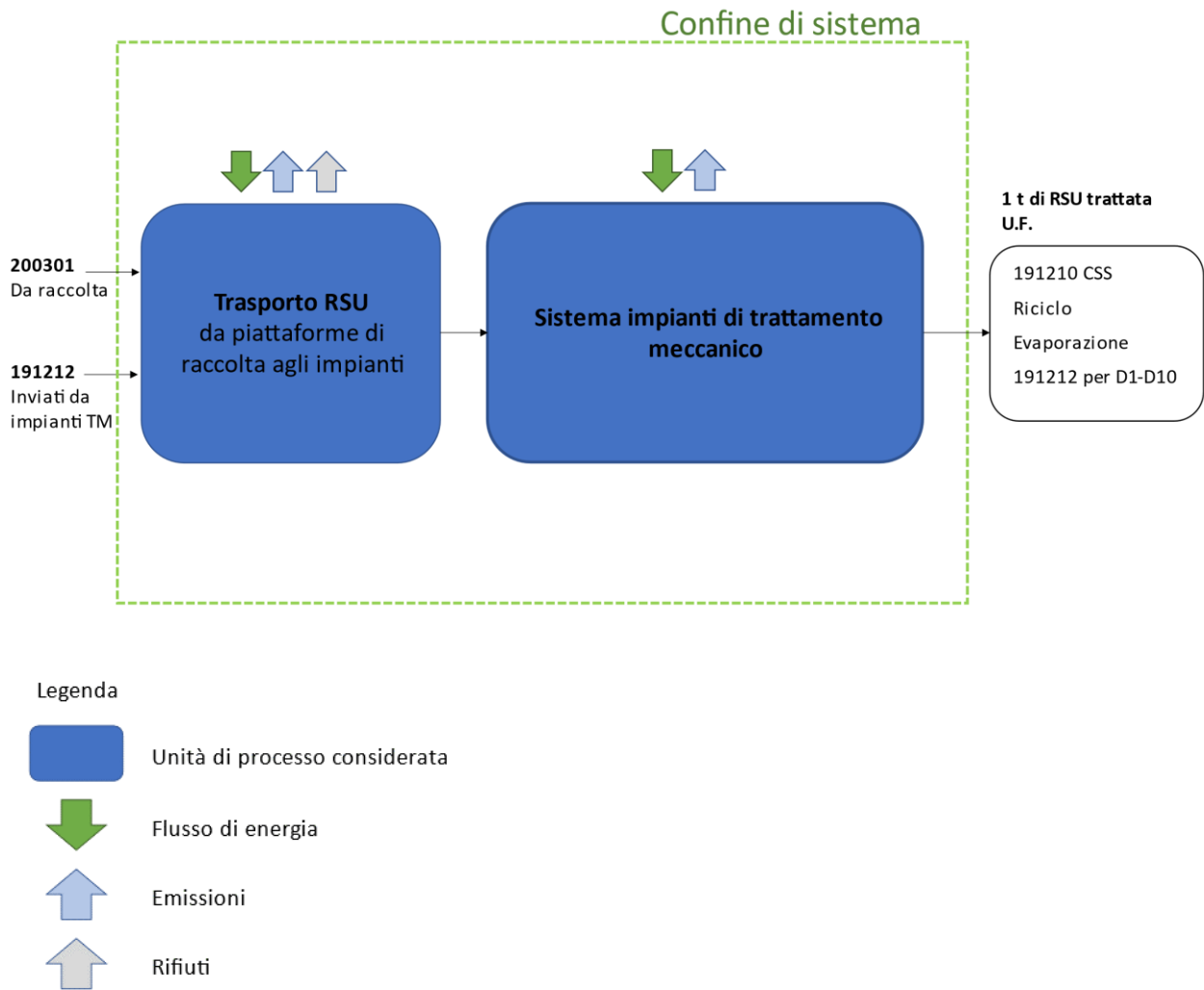


Figura 9 Ecoprofilo del processo di selezione del RSU (scenario 0) - Schematizzazione del sistema in studio con evidenziazione dei flussi in ingresso e in uscita considerati.

Composizione del rifiuto indifferenziato in ingresso

Il sistema degli impianti TM della Regione Friuli-Venezia Giulia accoglie due flussi di rifiuti indifferenziati, da avviare alle linee di produzione del CSS:

- il RSU indifferenziato prodotto in Regione Friuli-Venezia Giulia, indicato con il codice CER 200301;
- i sovalli inviati da impianti al di fuori del sistema considerato e destinati a nuova selezione, indicati con il codice CER 191212.

Il totale delle tonnellate trattate dal sistema degli impianti TM della Regione Friuli-Venezia Giulia nel 2019 per i due flussi è risultato pari a 101.304 t, come rappresentato in Tabella 2.

Flussi in ingresso nel 2019		
Codice CER	t	%
200301	83.790	82.71%
191212	17.514	17.29%
Totale	101.304	100%

Tabella 2 Inventario dei flussi in ingresso di 200301 e 191212 nell'anno 2019. Fonte: bozza di "Piano regionale di gestione dei rifiuti urbani – Aggiornamento 2022" e successiva elaborazione.

Per consentire la determinazione degli scambi di materia all'interno degli impianti di selezione, è stato necessario definire la composizione dei due flussi in ingresso.

La composizione del flusso indifferenziato prodotto in Friuli-Venezia Giulia, codice CER 200301, deriva dall'analisi merceologica effettuata da ARPA Friuli-Venezia Giulia sul rifiuto urbano residuo, riportata nella bozza condivisa del Piano regionale di gestione dei rifiuti urbani. Ai fini della rappresentazione modellistica della composizione media del rifiuto in ingresso agli stabilimenti di trattamento, si sono considerati i dati relativi all'anno 2019, sia perché in linea con la media delle analisi merceologiche del periodo 2014-2020, sia per ragioni di uniformità con gli altri dati messi a disposizione degli autori per l'elaborazione dello studio. I valori sono stati successivamente normalizzati rispetto al totale delle frazioni, in modo da poter rappresentare la corretta ripartizione percentuale delle stesse.

Diversamente, per quanto concerne i sovalli 191212 in ingresso negli impianti regionali, si evidenzia che poiché essi provengono da impianti al di fuori del sistema considerato e non sono disponibili informazioni circa la loro composizione, si è proceduto alla stima della caratterizzazione merceologica secondo il criterio del bilanciamento delle masse in entrata e in uscita dagli impianti. In conseguenza all'adozione di tale approccio di stima è stato necessario assegnare una significativa quota di materiale plastico anche al sovallo 191212.

Ciò è probabilmente imputabile tanto alla composizione del CSS derivata dai dati forniti, quanto al cospicuo flusso di materiale di scarto proveniente dalle linee di trattamento del rifiuto differenziato e multimateriale, la cui composizione è difficilmente conoscibile.

L'applicazione del criterio del bilanciamento di massa ai dati disponibili per lo scenario di riferimento (scenario 0) ha portato alla definizione della composizione del rifiuto codice 191212 ed è riportata nel dettaglio negli Allegati.

La Tabella 3 mostra la composizione in percentuale e in peso dei codici 200301 e 191212, così come utilizzate nel modello di calcolo. Si evidenzia che la composizione in termini assoluti relativa ai due flussi di rifiuti è

stata determinata moltiplicando i valori elencati nella colonna riferita alla composizione percentuale per le tonnellate complessive di rifiuti riportate nella precedente Tabella 2.

Categoria	CER 200301 [%]	CER 200301 [t]	CER 191212 [%]	CER 191212 [t]
Altro-Residuo	2,7%	2.230	0%	0
Carta	15,5%	12.951	0%	0
Inerti	4,2%	3.505	0%	18
Legno	2,5%	2.090	17%	2.995
Metalli	3,9%	3.291	2%	263
Organico	16,3%	13.643	0%	18
Pericolosi	0,9%	732	0%	0
Plastica	20,4%	17.132	81%	14.222
RAEE	1,2%	1.020	0%	0
Tessili	30,0%	25.105	0%	0
Vetro	2,5%	2.090	0%	0

Tabella 3 Inventario per 200301 e 191212. Fonte: bozza di “Piano regionale di gestione dei rifiuti urbani – Aggiornamento 2022” e successiva elaborazione.

Le quantità complessive di 200301 e 191212 sono state successivamente riferite all’unità funzionale di riferimento rappresentata da 1 tonnellata di rifiuto trattato (Tabella 4).

Categoria	200301 [kg]	191212 [kg]
Altro-Residuo	22	0
Carta	128	0
Inerti	35	0
Legno	21	30
Metalli	32	3
Organico	135	0
Pericolosi	7	0
Plastica	169	140
RAEE	10	0
Tessili	248	0
Vetro	21	0

Tabella 4 Composizione della tonnellata di RSU in ingresso negli impianti di trattamento. Fonte: elaborazione degli autori a partire dai dati della bozza di Piano.

Composizione del combustibile solido secondario (CSS) prodotto dagli impianti regionali

La composizione del combustibile solido secondario (CSS) prodotto dagli impianti TM regionali è variabile, dipendente dalla tecnologia della linea di produzione utilizzata in ciascun impianto e dalla composizione del rifiuto in ingresso. Ai fini della valutazione, a causa dell'assenza di informazioni relative ai risultati di campagne di monitoraggio condotte sulla composizione media del CSS nell'anno 2019, si è fatto riferimento agli unici dati messi a disposizione consistenti in due analisi puntuali di caratterizzazione merceologica del CSS prodotto, effettuate nel 2020 presso gli impianti Eco Sinergie e Net e fornite dalla Direzione Regionale. La composizione media definita per il CSS nel 2019 si basa quindi sui valori dell'analisi merceologica del CSS prodotto dall'impianto Eco Sinergie, adattata in modo da essere compatibile con il bilancio di materia per la frazione plastica descritto nel precedente paragrafo.

La composizione del CSS è quindi rappresentata nella seguente Tabella 5.

PCI	MJ/kg
CSS	18,7
Categoria	[%]
Altro-Residuo	0%
Carta	21,4%
Inerti	0,1%
Legno	5,0%
Metalli	0,1%
Organico e verde	1,0%
Pericolosi	0%
Plastica	55,0%
RAEE	0%
Tessili	17,4%
Vetro	0%

Tabella 5 Composizione del CSS comune a tutti gli scenari e PCI risultante.

Si evidenzia che, su specifica richiesta della Direzione Regionale, si è provveduto a mantenere invariata la composizione del CSS determinata per i tre scenari di valutazione dal momento che si è assunto che l'impianto di combustione previsto nell'ambito della bozza di Piano sia finalizzato al trattamento del CSS-rifiuto.

Bilancio di massa del trattamento meccanico

Le composizioni merceologiche dei flussi di RSU indifferenziato e di CSS prodotto, utilizzate nel modello di calcolo e precedentemente descritte, hanno fornito le basi per la definizione del bilancio di massa rappresentativo per il sistema attuale di trattamento meccanico effettuato negli impianti regionali (scenario 0).

A completamento dell'impostazione di base, sono state effettuate ulteriori assunzioni circa la determinazione e la composizione dei flussi rappresentati nel modello; tali assunzioni sono valide per tutti gli scenari considerati e sono riportate di seguito. Nell'allegato I è possibile analizzare il dettaglio dei calcoli effettuati.

- I flussi di materiale in uscita dagli impianti TM nell'anno 2019 sono risultati sensibilmente superiori al rifiuto indifferenziato in ingresso nel sistema considerato. È stato dunque necessario elaborare le quantità di materiali in uscita dagli impianti TM, al fine di poterle ricondurre alla sola quota di 200301 e 191212 oggetto di valutazione. L'assunzione è stata effettuata in analogia all'approccio tenuto per l'elaborazione da parte da ARPA e dalla Direzione Regionale nel foglio di calcolo denominato "2019_200301_flussi" relativo ai flussi di rifiuto circolanti nei vari impianti di trattamento meccanico.
- Le quantità di materia nel sistema oggetto di valutazione sono state elaborate al fine di poter ottenere una quota di input superiore all'output e rappresentare coerentemente le perdite dovute all'evaporazione durante il processo di trattamento. L'entità della compensazione è stata definita riferendosi alla perdita dovuta all'evaporazione nell'impianto TM di Net s.p.a. (1,6%), ovvero lo stabilimento che presenta meno commistione dei flussi e di più chiara interpretazione. La quantità di acqua evaporata, definita secondo l'elaborazione descritta, è stata interamente attribuita alla frazione organica del rifiuto indifferenziato, ipotizzando per esigenze modellistiche che sia l'unica frazione del rifiuto a contenere acqua evaporabile.
- La composizione del materiale destinato a riciclo è stata desunta dal foglio di calcolo denominato "2019_200301_flussi" predisposto da ARPA e rielaborato dalla Direzione Regionale. Ai fini della quantificazione e della determinazione della composizione di tale materiale non sono stati conteggiati i flussi di rifiuto di carta e cartone in entrata e in uscita dagli impianti TM S.N.U.A. s.r.l. ed Eco Sinergie s.c.a.r.l. Tali flussi non sono stati considerati ai fini modellistici dal momento che le quantità in ingresso e in uscita dallo stabilimento descrivono una situazione di mero transito;
- Gli scambi di sovralli che avvengono tra gli impianti TM Net s.p.a., Eco Sinergie S.c.a.r.l. e S.N.U.A. s.r.l. sono stati considerati ai fini della determinazione del contributo relativo ai trasporti;
- I sovralli 191212 sono caratterizzati da un'elevata variabilità nella composizione; pertanto, la loro composizione merceologica è stata ipotizzata riferendosi il più possibile alla finalità del trattamento cui sono destinati, ovvero:
 - Per il 191212 destinato a operazioni di recupero energetico (R1), si è ipotizzata la medesima composizione del CSS;
 - Per il sovrallo 191212 inviato a nuovo trattamento, in assenza di informazioni, si è assunta una composizione analoga a quella del RSU indifferenziato precedentemente descritto;
 - Il 191212 destinato a operazioni di smaltimento (D1, D10) è stato descritto come la frazione residua di tutte le precedenti operazioni di selezione.

Per lo scenario 1, la ripartizione tipologica della tonnellata di rifiuto in ingresso agli stabilimenti è frutto di differenti assunzioni effettuate relativamente:

- Alla più efficace selezione del CSS, conseguente alla presenza di una nuova sezione di raffinazione adiacente all'impianto di incenerimento, vincolata in ogni caso dal rispetto dei quantitativi massimi per il mantenimento del bilancio di massa;
- All'essiccazione del sovrillo di codice 191212 inviato a nuovo trattamento nella sezione di raffinazione, che comporta un'evaporazione aggiuntiva stimata in circa 4450 t di acqua. Ciò è stato definito in accordo a quanto richiesto nel Piano, sebbene non sia stato possibile valorizzare nel modello di calcolo l'incremento di potere calorifico conseguente alle migliori caratteristiche prestazionali del CSS essiccato. La quantità di acqua evaporata, definita secondo l'elaborazione descritta, è stata interamente attribuita alla frazione organica del rifiuto indifferenziato, ipotizzando per esigenze modellistiche che sia l'unica frazione del rifiuto contenente acqua evaporabile.

Per lo scenario 2, la ripartizione tipologica della tonnellata di rifiuto in ingresso agli stabilimenti è frutto di differenti assunzioni effettuate relativamente:

- Alla più efficace selezione del CSS, conseguente alla presenza di una nuova sezione di raffinazione adiacente all'impianto di incenerimento, vincolata in ogni caso dal rispetto dei quantitativi massimi per il mantenimento del bilancio di massa;
- All'essiccazione del RSU negli impianti rinnovati, che comporta un'evaporazione aggiuntiva, stimata in circa 8450 t di acqua. Ciò è stato definito in accordo a quanto richiesto nel Piano, sebbene non sia stato possibile valorizzare nel modello di calcolo l'incremento di potere calorifico conseguente alle migliori caratteristiche prestazionali del CSS essiccato. La quantità di acqua evaporata, definita secondo l'elaborazione descritta, è stata interamente attribuita alla frazione organica del rifiuto indifferenziato, ipotizzando per esigenze modellistiche che sia l'unica frazione del rifiuto a contenere acqua evaporabile.

I risultati del bilancio di massa effettuato sulla base delle assunzioni precedentemente descritte per gli scenari oggetto di valutazione sono riassunti nella successiva tabella:

Scenari rappresentati	Output	Ripartizione [%]	Ripartizione della tonnellata [kg]
Scenario 0	CSS	52,3	523
	Materiali destinati a riciclo	6,0	60
	191212 per R12	4,5	45
	191212 per D1-D10	35,5	355
	Evaporazione	1,7	17
Scenario 1	CSS	54,5	545
	Materiali destinati a riciclo	7,3	73
	191212 per R12	-	-
	191212 per D1-D10	32,1	321
	Evaporazione	6,0	60
Scenario 2	CSS	54,5	545
	Materiali destinati a riciclo	7,3	73
	191212 per R12	-	-
	191212 per D1-D10	28,2	282
	Evaporazione	10,0	100

Tabella 6 Bilancio di massa per i tre scenari di trattamento.

Trasporti

Lo studio ha stimato, relativamente all'anno 2019, le distanze percorse dal rifiuto prodotto tra i Comuni conferenti agli impianti e gli impianti stessi. Le distanze percorse dai mezzi di raccolta per il trasporto dei rifiuti sono state determinate mediante stime condotte su base geografica e determinazioni di effettive distanze medie percorse dai diversi gestori del sistema di raccolta locale. Tali stime si sono rese necessarie al fine di consentire di caratterizzare dimensionalmente al meglio gli impatti ambientali conseguenti alle operazioni di raccolta. Si è pertanto identificata la distanza media di 39,18 km quale risultato della media, pesata sulle quantità di rifiuto codice CER 200301, della distanza dalle aree comunali agli impianti di trattamento meccanico a cui i Comuni afferiscono. A causa della carenza di informazioni di maggiore dettaglio, si è ritenuto opportuno mantenere lo stesso valore anche per la quota di sovvalli codice CER 191212 provenienti da altri impianti esterni ai confini di sistema considerati.

I dati utilizzati per le elaborazioni sono stati desunti dalla bozza di Piano condivisa dalla committenza e si riferiscono all'anno 2019.

Trasporto RSU	U.M.	Quantità
Trasporti	Kg*km	39,18*1000

Tabella 7 Inventario del processo di trasporto della tonnellata di rifiuto in ingresso.

I dati di inventario relativi al sistema di trasporto sono stati desunti dall'unità di processo "transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, Euro4", del database ecoinvent v3.7.1, Allocation, cut-off by classification.

Impianti di trattamento

Consumi degli impianti

L'unità di processo "Sistema impianti di trattamento meccanico" descrive l'attività complessiva degli impianti di selezione e trattamento meccanico regionali. I consumi relativi all'unità di processo sono frutto dell'aggregazione dei consumi comunicati per i tre impianti attivi e dell'elaborazione di tali consumi conformemente alle ipotesi avanzate per ciascuno scenario. Le assunzioni principali effettuate per la modellizzazione di ciascuno dei tre scenari sono evidenziate in Tabella 8:

Impianti TM regionali		Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2
S.N.U.A.		attivo	attivo	rinnovato
Net		attivo	attivo	rinnovato
Eco Sinergie		attivo	attivo	rinnovato
Nuova sezione di raffinazione		non presente	attivo	non presente
Elaborazione per consumi		Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2
Consumi degli impianti	Energia elettrica, acqua e gasolio	Valori elaborati a partire dai consumi del 2020 e riferiti a 1 t di rifiuto trattato.	Valori elaborati a partire dai consumi del 2020 e riferiti a 1 t di rifiuto trattato + Consumo sezione di raffinazione: consumi per tonnellata di Eco Sinergie*0.9 (fattore di efficientamento della linea previsto dal piano)	Riduzione (-10%) dei valori elaborati a partire dai consumi del 2020 e riferiti a 1 t di rifiuto trattato.
	Metano	Valori elaborati a partire dai consumi del 2020 e riferiti a 1 t di rifiuto trattato.	Valori stimati in base alla quantità di acqua evaporata prevista	Valori stimati in base alla quantità di acqua evaporata prevista
	Trasporti interni	Scambio di 191212 tra i tre impianti	Trasporto del 191212 dagli impianti Net e S.N.U.A. alla sezione di raffinazione	Trasporti interni assenti

Tabella 8 Descrizione dell'impiantistica TM regionale nei tre scenari e delle assunzioni effettuate per il calcolo dei consumi.

Più nel dettaglio, per quanto riguarda i consumi del processo di trattamento sono state effettuate le seguenti elaborazioni:

- I dati relativi ai consumi di energia elettrica, gasolio e acqua per gli impianti di trattamento meccanico Net s.p.a., Eco Sinergie S.c.a.r.l. e S.N.U.A s.r.l., sono stati resi disponibili dalla Direzione Centrale regionale. Questi sono relativi all'anno 2020, ma considerati dai gestori degli impianti non significativamente differenti dai valori del 2019. Relativamente allo scenario 0, poiché gli impianti presentano al loro interno linee di trattamento di rifiuto differenziato, multimateriale e organico, i dati dei consumi messi a disposizione sono stati rielaborati al fine di stimare i consumi relativi alla sola quota di 200301 e 191212. Tali consumi sono stati successivamente espressi in termini di unità funzionale di riferimento (1 tonnellata);

Diversamente, i valori dei consumi di energia, gasolio e acqua ipotizzati per gli scenari 1 e 2 sono basati sulle richieste formulate nella bozza di Piano dalla Direzione Centrale regionale e sulle conseguenti assunzioni. In particolare, per quanto riguarda lo scenario 1, ai consumi relativi al trattamento di una tonnellata di RSU nei tre impianti si aggiunge il consumo relativo a una nuova sezione di raffinazione. La quota di consumo aggiuntivo dovuta alla sezione di raffinazione è frutto dell'elaborazione dei valori relativi all'impianto Eco Sinergie (2020), tenendo conto di una riduzione dei consumi per la nuova linea (-10%), come auspicato nella bozza di piano;

Per lo scenario 2, invece, la riduzione dei consumi ipotizzata ai fini della modellizzazione è stimata pari al 10% ed è dovuta al rinnovamento degli impianti, come descritto dalla bozza di piano;

- In accordo con le prescrizioni della bozza di Piano, per gli scenari 1 e 2 è stato incluso il contributo di una linea di essiccamento termico. A livello tecnologico, si fa notare che il processo di essiccazione del RSU è implementabile attraverso due principali alternative: l'essiccazione termica e la bioessiccazione. Mentre la bioessiccazione sembra più adatta ad impianti di trattamento di tipo TMB, l'essiccazione termica comporta un ingente consumo di combustibile, se decentralizzata e non associata all'impianto di combustione (Asadi, 2016). Tuttavia, in conformità alle previsioni formulate nella bozza di Piano, si è fatto riferimento al metodo individuato dallo stesso e basato sull'essiccazione termica. Conseguentemente, i consumi ipotizzati per la linea di essiccamento termico diretto sono stati desunti da analisi in letteratura e stimati pari a 894 kJ per chilogrammo di acqua evaporata (Asadi, 2016);
- I dati di inventario relativi all'infrastruttura degli impianti di trattamento considerati come base per tutti gli scenari analizzati, sono stati assimilati al processo di ecoinvent 3.7.1 denominato "waste paper sorting facility construction" riferito ad un impianto per la selezione della carta da raccolta differenziata, ritenuto tuttavia sufficientemente simile ad un impianto TM. Nello specifico, il processo considerato si riferisce ad un impianto avente una vita utile di 50 anni e in grado di trattare 33.000 t di carta all'anno. La quota relativa al contributo quantitativo dell'infrastruttura stessa è stata successivamente espressa in termini di unità funzionale, calcolata considerando i parametri precedentemente descritti;
- I trasporti descritti per lo scenario 0 sono riferiti al trasporto di sovrappeso 191212 tra impianti, come desunto dai MUD degli impianti stessi. I trasporti relativi allo scenario 1 derivano dall'assunzione che successivamente alla costruzione del nuovo impianto, due degli impianti TM attualmente in uso (Net e S.N.U.A.) conferiscano alla nuova sezione di raffinazione il 191212 prodotto; si è quindi ipotizzata una distanza media tra gli impianti e la prevista sezione di raffinazione pesata sulla quantità di 191212 prodotta negli impianti Net e S.N.U.A. Nello scenario 2 invece, tali contributi non sono stati considerati, nell'ipotesi che non siano necessari scambi tra i diversi impianti di trattamento rimodernati.

In ogni caso, si fa notare che, al fine di poter modellizzare in modo più accurato i consumi relativi agli scenari proposti 1 e 2, sarebbe auspicabile disporre di proposte progettuali di maggiore dettaglio.

Nella Tabella 9 sono presentati i valori utilizzati nel modello di calcolo unitamente ai dataset ecoinvent a cui sono stati associati. Per queste unità di processo si è fatto riferimento alla geografia italiana “IT” quando possibile, altrimenti europea “RER”, “Europe without Switzerland”.

Consumo per t di RSU	U.M.	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2	Unità di processo – DB rif. ecoinvent
Energia elettrica	kWh	37,97	46,30	34,17	Market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - IT
Acqua	kg	48,24	73,45	43,42	Tap water production, conventional treatment tap water Cutoff, U – Europe without Switzerland
Gasolio per mezzi	l	2,07	2,39	1,86	Diesel, burned in building machine diesel, burned in building machine Cutoff, U – Europe without Switzerland
Metano	MJ	2,42	41,69	76,99	Heat and power co-generation, natural gas, 1MW electrical, lean burn heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U – Europe without Switzerland
Nuovo impianto di selezione	Item	$\left(\frac{3}{T * 50}\right)$	$\left(\frac{4}{T * 50}\right)$	$\left(\frac{3}{T * 50}\right)$	Waste paper sorting facility construction waste paper sorting facility Cutoff, U - RER
Trasporti	kg*km	109,4*64,07	40*432,9	-	Market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER
Legenda: T=tonnellate rifiuto indifferenziato trattato nel 2019, 50=numero anni di funzionamento impianto					

Tabella 9 Consumi degli impianti. Fonte: dati Direzione centrale dell’ambiente, elaborati dall’autore.

Parte 2 – ecoprofilo energia prodotta da combustione CSS

La seconda parte dello studio si concentra sulla definizione dell’ecoprofilo dell’energia generata dalla combustione del CSS prodotto in Regione Friuli-Venezia Giulia secondo i tre scenari ipotizzati dalla bozza di Piano. L’unità funzionale di riferimento è “1 kWh di energia elettrica prodotta attraverso la combustione del CSS prodotto in Regione”. La figura seguente descrive i flussi considerati ai fini modellistici.

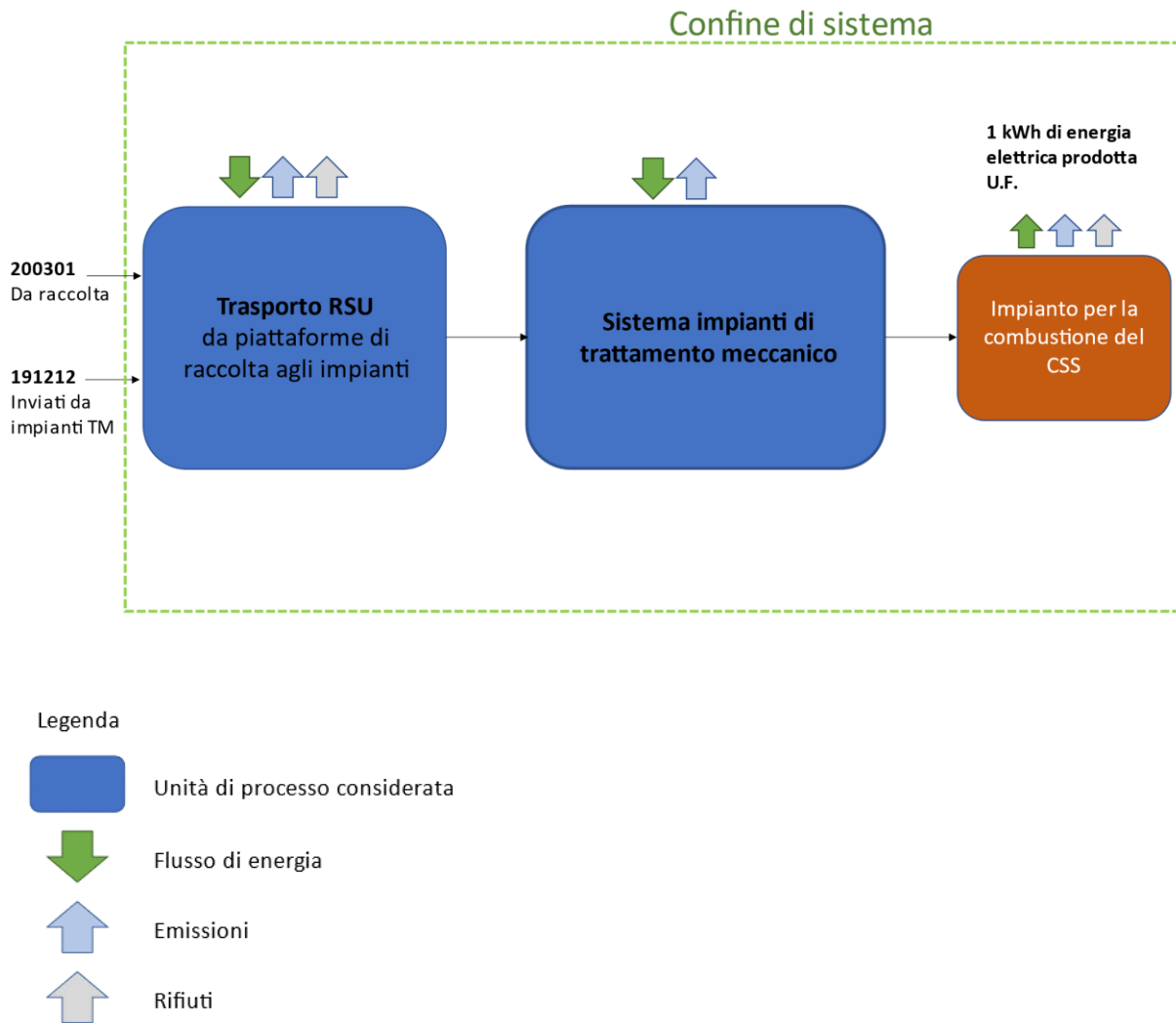


Figura 10 Ecoprofilo energia prodotta da combustione CSS - Schematizzazione del sistema in studio con evidenziazione dei flussi in ingresso e in uscita considerati.

Trasporti

La fase di trasporto dagli impianti di trattamento meccanico nei quali il CSS è prodotto all’impianto di combustione è stata inclusa all’interno dello studio. Le distanze percorse dai mezzi di raccolta per il trasporto dei rifiuti sono state determinate mediante stime su base geografica e determinazioni di effettive distanze medie percorse dai diversi gestori del sistema di raccolta locale.

Per lo scenario 0, che descrive la situazione attuale di trattamento del CSS in numerosi cementifici e inceneritori per lo più all’estero, si è determinata una distanza media, pesata sulla quantità, rappresentativa della situazione complessiva descritta nella bozza di Piano e relativa all’anno 2019.

Per gli scenari 1 e 2 invece si è descritta in maniera sommaria l’ipotetica distanza che il CSS dovrebbe percorrere tra gli impianti di trattamento meccanico e l’eventuale nuovo impianto di combustione in Regione.

Tali stime si sono rese necessarie al fine di consentire il contributo dovuto alle operazioni di trasporto ai potenziali impatti ambientali.

I dati di inventario relativi al sistema di trasporto sono stati desunti dall’unità di processo “transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, Euro4”, del database ecoinvent v3.7.1, Allocation, cut-off by classification.

Trasporto CSS	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2
Trasporti [kg*km]	276,8	15,2	28,7

Tabella 10 Inventario del processo di trasporto della CSS prodotto per ciascuno scenario.

Processo di combustione del CSS

La costruzione dell’inventario LCI dei consumi e delle emissioni associate alla combustione del CSS, è avvenuta mediante la definizione di uno specifico processo rappresentativo per la composizione del CSS valorizzato in un impianto di combustione di riferimento per i tre scenari, le cui caratteristiche tecniche sono state fatte variare opportunamente a seconda del caso. Per considerare tali aspetti nel modello di calcolo, come indicato nella documentazione a supporto del database ecoinvent di riferimento per il presente studio (Doka, 2003), si è utilizzato uno strumento di calcolo dedicato alla definizione di analisi di inventario relative a specifiche composizioni del mix di rifiuto. Lo strumento consiste nel foglio di calcolo realizzato dalla società di consulenza DokaLCA (Gabor Doka, 2021). Lo strumento è pubblicato nella sezione documentale della banca dati ecoinvent e sul sito dell’autore. Tale strumento consente di calcolare inventari LCI finalizzati alla costruzione di processi di smaltimento, specifici per il sito e per la composizione del rifiuto.

Il mix della composizione del CSS è stato modellizzato sulla base delle precedenti elaborazioni, ed inserito nel foglio di calcolo seguendo le raccomandazioni del relativo manuale denominato “Calculation manual for LCI calculation tools for regionalised waste treatment”(Gabor Doka, 2021), inserendo, ove possibile, le informazioni primarie aggiuntive messe a disposizione degli autori. La composizione modellizzata nel foglio di calcolo per il CSS, comune a tutti gli scenari, è la seguente:

Waste input	Mixed various plastics	Natural wood	Inert material	Paper	Mixed cardboard	Plastics	Textiles	Compostable material	Inert metals
CSS scen. 0	38,0%	5,0%	0,1%	10,7%	10,7%	17,0%	17,4%	1,0%	0,1%

Tabella 11 Waste-specific inventories elaborati nel “Waste tools” di Doka LCA. Fonte: elaborazione degli autori.

Si precisa infine che l’inceneritore di riferimento per il modello di calcolo considera una capacità di 100.000 tonnellate di rifiuti combustibili all’anno e un tempo di servizio pari a 40 anni. Relativamente ai dati atmosferici utilizzati nel foglio di calcolo si conferma il mantenimento di quelli proposti di default dallo strumento di calcolo in quanto in linea con il contesto territoriale di valutazione.

I dati sopra descritti, elaborati attraverso lo strumento di calcolo hanno consentito la creazione della seguente unità di processo inserita all’interno del modello informatico:

- Combustione di 1 kg di CSS prodotto in Friuli-Venezia Giulia nel 2019 di riferimento per le valutazioni.

I risultati dell'analisi di inventario relativi ad 1 kg di CSS incenerito sono riportati in allegato e riassunti sommariamente nel seguito.

Input - Flusso	U.M.	Scenario 0
ammonia, anhydrous, liquid	kg	0,0015927
cationic resin	kg	2,06E-06
cement, unspecified	kg	0,0029201
chemical, inorganic	kg	2,14E-04
chemical, organic	kg	9,05E-06
chromium oxide, flakes	kg	2,04E-06
heat, district or industrial, natural gas	MJ	0,29784
hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	kg	2,47E-04
hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state	kg	4,86E-04
iron (III) chloride, without water, in 40% solution state	kg	2,04E-05
municipal waste incineration facility	Item(s)	2,50E-10
quicklime, milled, packed	kg	0,006227
slag landfill	Item(s)	6,37E-11
sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	kg	0,0018948
titanium dioxide	kg	9,98E-05
Treatment of 1 t of RSU indifferenziata in 1 anno	kg	1,9849*0,5322
water, decarbonised	kg	2,533

Tabella 12 Reagenti ed additivi necessari per il funzionamento, per 1kg di CSS. Fonte: Elaborazione da "Updated location - and waste-specific life cycle inventories of waste treatment".

Input - Flusso	U.M.	Scenario 0
process-specific burdens, residual material landfill	kg	0,014555
process-specific burdens, slag landfill	kg	0,03583
residual material landfill	Item(s)	3,03E-11
slag landfill	Item(s)	6,37E-11
transport, freight train	t*km	0,01109
transport, freight, lorry, unspecified	t*km	0,0091649
spent activated carbon with mercury	kg	2,1573E-4

waste cement, hydrated	kg	0,0073004
------------------------	----	-----------

Tabella 13 Discariche e trattamento finale dei residui, per 1 kg di CSS. Fonte: Elaborazione da "Updated location - and waste-specific life cycle inventories of waste treatment".

Output - Flusso	U.M.	Scenario 0
Carbon dioxide, fossil	kg	1.4192
Carbon dioxide, non-fossil	kg	0.59407
Carbon monoxide, fossil	kg	2.5464E-5
Carbon monoxide, non-fossil	kg	1.0659E-5

Tabella 14 Emissioni dirette in atmosfera di CO₂ e CO da combustione di 1 kg di CSS trattato. Fonte: "Updated location - and waste-specific life cycle inventories of waste treatment".

Output - Flusso	U.M.	Scenario 0
Aluminum	kg	1.2403E-9
Ammonia	kg	1.8726E-6
Antimony	kg	1.5357E-11
Arsenic	kg	5.5994E-9
Barium	kg	2.9191E-7
Benzene	kg	2.125E-8
Benzene, hexachloro-	kg	4.4433E-11
Benzene, pentachloro-	kg	1.1227E-10
Benzo(a)pyrene	kg	4.7289E-13
Bromine	kg	1.8797E-8
Cadmium	kg	1.9533E-8
Calcium	kg	1.4255E-5
Chromium	kg	2.4197E-8
Cobalt	kg	2.0471E-8
Copper	kg	1.2006E-8
Cyanide	kg	2.773E-5
Dinitrogen monoxide	kg	1.2907E-4
Dioxins	kg	4.2498E-14
Heat, waste	MJ	18.894
Hydrogen chloride	kg	6.9448E-6

Hydrogen fluoride	kg	7.1837E-8
Iodine	kg	3.0525E-13
Iron	kg	3.6945E-9
Lead	kg	1.5477E-8
Magnesium	kg	5.7174E-7
Manganese	kg	6.8898E-9
Mercury	kg	1.1549E-8
Methane, fossil	kg	2.247E-7
Methane, non-fossil	kg	9.4056E-8
Molybdenum	kg	1.4678E-9
Nickel	kg	1.5261E-8
Nitrogen oxides	kg	5.93E-4
NMVOOC, non-methane volatile organic compounds	kg	9.6709E-7
Particulates, < 2,5 um	kg	2.5371E-6
Particulates, > 2,5 um, and < 10um	kg	1.2749E-8
Phenol, pentachloro-	kg	9.2542E-12
Phosphorus	kg	7.077E-8
Potassium	kg	5.699E-6
Selenium	kg	8.9431E-9
Silicon	kg	4.1224E-9
Sodium	kg	4.9752E-6
Strontium	kg	3.1381E-9
Sulfur dioxide	kg	1.5814E-5
Thallium	kg	1.4184E-10
Tin	kg	6.1219E-12
Titanium	kg	2.9418E-7
Toluene	kg	4.2501E-8
Vanadium	kg	2.1677E-6
Zinc	kg	2.2265E-7

Tabella 15 Emissioni dirette in atmosfera da combustione per 1 kg di CSS trattato. Fonte: Elaborazione da "Updated location - and waste-specific life cycle inventories of waste treatment".

Analisi di inventario dell'unità funzionale

L'analisi di inventario del kWh di energia elettrica prodotta (unità funzionale) è stata effettuata sulla base delle seguenti informazioni:

- L'inventario del kg di CSS incenerito precedentemente descritto;
- Il rendimento elettrico dell'impianto per ciascuno scenario e il potere calorifico inferiore (PCI) del CSS;
- La quantità di rifiuto trattato negli impianti TM per la produzione del CSS.

Il dataset che descrive il processo di combustione di 1 kg di CSS è stato elaborato nel modello di calcolo sulla base della quantità di CSS necessaria per produrre di 1 kWh di energia elettrica, al variare del rendimento dell'impianto considerato per ciascuno scenario. Il PCI del CSS utilizzato nei tre scenari è stato estratto dall'analisi merceologica del CSS di Eco Sinergie s.c.a.r.l.

Per lo scenario 0, il rendimento di produzione di energia elettrica considerato, al netto degli autoconsumi, è stato ipotizzato pari al 15,84% e corrisponde al valore standard considerato dal modello di inceneritore di riferimento (ecoinvent CH 2015) contenuto nello strumento di calcolo "Waste tools 2020" elaborato da Doka LCA (Doka G. , 2020).

Diversamente, per gli scenari 1 e 2, il rendimento considerato è stato tratto da dati di letteratura indicati come rappresentativi dalla Direzione Regionale (Rigamonti et al., 2019).

Le elaborazioni necessarie per la determinazione del quantitativo di CSS necessario alla produzione di 1 kWh sono riportate nella seguente tabella:

	U.M.	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2
% CSS prodotto	%	52,28%	54,50%	54,50%
PCI	MJ/kg	18,7	18,7	18,7
Rendimento elettrico della combustione	%	15.84 %	27,5 %	27,5 %
RSU necessario per produrre 1 kg di CSS	kg	1,913	1,835	1,835
kg di indifferenziata trattata per ottenere 1 kwh	kg	1,568	0,847	0,885
Kg CSS/kWh	kg	1,542	0,796	0,796

Tabella 16 Rappresentazione dei calcoli effettuati per calcolare i coefficienti da inserire nell'inventario del processo di incenerimento.

L’inventario delle emissioni connesse all’incenerimento di 1 kg di CSS è stato quindi parametrizzato secondo i valori rappresentati in tabella:

	U.M.	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2
Kg CSS/kWh	kg	1,542	0,796	0,796

Tabella 17 Valori utilizzati per la parametrizzazione delle emissioni utilizzate per ogni scenario, al fine di descriverle in termini di unità funzionale.

Gli LCI completi relativi alla produzione di 1 kWh di energia elettrica attraverso la combustione di CSS secondo i tre diversi scenari sono riportati nell’allegato IV.

4. Analisi degli impatti e interpretazione dei risultati

L'analisi dei potenziali impatti ambientali relativi ai tre scenari considerati si è fondata su una serie di indicatori rappresentativi per l'oggetto dello studio.

La valutazione degli impatti del ciclo di vita è stata pertanto riferita a tre diversi metodi per la Life Cycle Impact Assessment (LCIA), tutti implementati nella versione 2.1.1 dei metodi di valutazione disponibili per openLCA 1.10.3:

- metodo Cumulative Energy Demand (CED);
- metodo ReCiPe 2016 Midpoint, Hierarchist perspective (H);
- metodo ReCiPe 2016 Endpoint, Hierarchist perspective (H).

Come si nota dall'elenco soprariportato, sono stati considerati sia metodi relativi alla valutazione di aspetti prettamente energetici (CED), sia metodi rappresentativi per la correlazione degli impatti con specifici effetti ambientali potenziali (midpoint), sia metodi rappresentativi per la correlazione degli impatti con specifici potenziali danni verificabili su Salute Umana, Ecosistemi e Risorse (endpoint).

Il metodo Cumulative Energy Demand (CED) è stato scelto per la sua significatività nel campo di applicazione dell'LCA al settore dei rifiuti.

Il metodo ReCiPe è il successore dei metodi di Ecoindicator 99 e CML 2002 (Huijbregts et al., 2017); integra e armonizza gli approcci midpoint ed endpoint in un framework coerente. I fattori di caratterizzazione per midpoint e endpoint sono calcolati sulla base di coerenti catene causa-effetto, tranne nel caso dell'utilizzo di suolo e di risorse. Il metodo è stato sviluppato congiuntamente da RIVM, Radboud University Nijmegen, Leiden University and PRé Sustainability, ed è largamente riconosciuto e utilizzato per l'applicazione della LCA. Molte delle categorie di impatto (16 indicatori complessivi) da esso considerate sono anche contenute nelle linee guida ILCD per l'applicazione della LCA. Nell'ambito del presente studio, la scelta delle categorie di impatto considerate di tipo midpoint è stata effettuata seguendo le raccomandazioni delle linee guida ILCD per la valutazione degli impatti ambientali nel contesto europeo (European Commission et al., 2011), (European Commission et al., 2010). Precisamente sono state scelte quelle classificate in classe I e II di qualità dalle linee guida, ovvero:

- Emissione di gas ad effetto serra (GWP100)
- Assottigliamento fascia d'ozono stratosferico (ODP)
- Acidificazione (AP)
- Tossicità umana; effetti carcinogeni
- Tossicità umana; effetti non carcinogeni
- Formazione di particolato
- Radiazioni ionizzanti
- Formazione di ozono, ecosistemi terrestri
- Formazione di ozono, salute umana

- Eutrofizzazione
- Ecotossicità
- Impoverimento risorse minerali
- Impoverimento risorse fossili

A livello di categorie di endpoint invece, sono state considerate integralmente le tre proposte relative a Salute Umana, Risorse ed Ecosistemi.

Di seguito, si presentano i risultati restituiti dal modello di calcolo, riferiti alle rispettive unità funzionali identificate per le due parti dello studio: “1 tonnellata di rifiuto indifferenziato prodotto e selezionato in Regione Friuli-Venezia Giulia” e “1 kWh di energia elettrica ottenuto dalla combustione di CSS prodotto in seguito ai trattamenti di cui alla Parte 1”

Parte 1 - ecoprofilo del processo di selezione del RSU

Cumulative Energy Demand (CED)

Categoria impatto	U.M.	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2
Non-renewable, fossil	MJ	505,199	631,095	485,040
Non-renewable, biomass	MJ	0,005	0,006	0,004
Non-renewable, nuclear	MJ	41,038	50,374	37,125
Renewable, biomass	MJ	11,235	14,091	10,443
Renewable, water	MJ	32,843	40,426	29,873
Renew., wind, solar, geothermal	MJ	16,984	20,752	15,311

Tabella 18 – Metodo CED - Rappresentazione degli indicatori energetici associati ai 3 scenari analizzati (1 t di rifiuto indifferenziato).

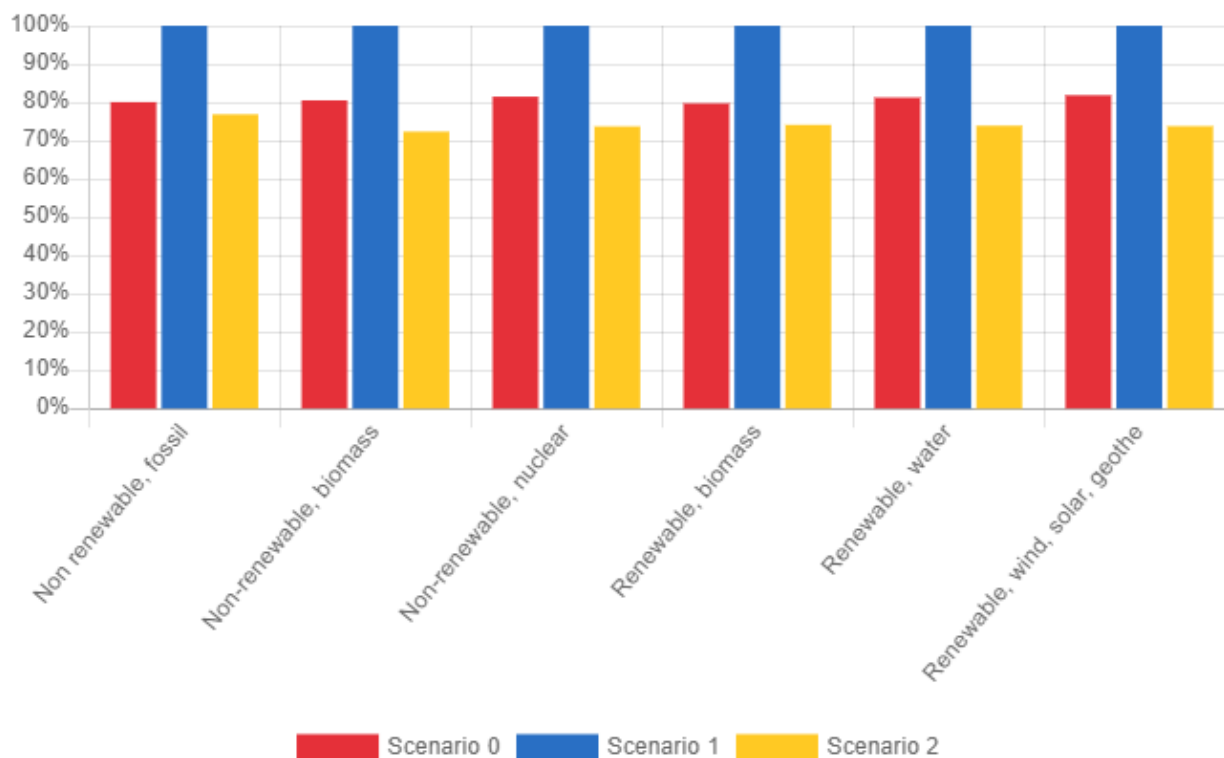


Figura 11 Metodo CED - Risultati relativi per il confronto dei tre scenari previsti dalla bozza di Piano (%).

ReCiPe midpoint H

Categoria impatto	U.M.	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2
Global warming	kg CO2 eq	35,592	44,463	34,095
Fine particulate matter formation	kg PM2,5 eq	0,055	0,067	0,051
Fossil resource scarcity	kg oil eq	11,032	13,783	10,595
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1,518	1,963	1,459
Freshwater eutrophication	kg P eq	0,006	0,008	0,006
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	4,533	5,851	4,379
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	27,139	34,712	25,618
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	2,277	2,792	2,058
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	0,186	0,244	0,183
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	0,164	0,198	0,151
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	0,167	0,202	0,154
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	0,00002	0,00002	0,00002
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	0,133	0,163	0,122

Tabella 19 Metodo ReCiPe, Midpoint (H) - Rappresentazione degli indicatori energetici associati ai 3 scenari analizzati (1 t di rifiuto indifferenziato).

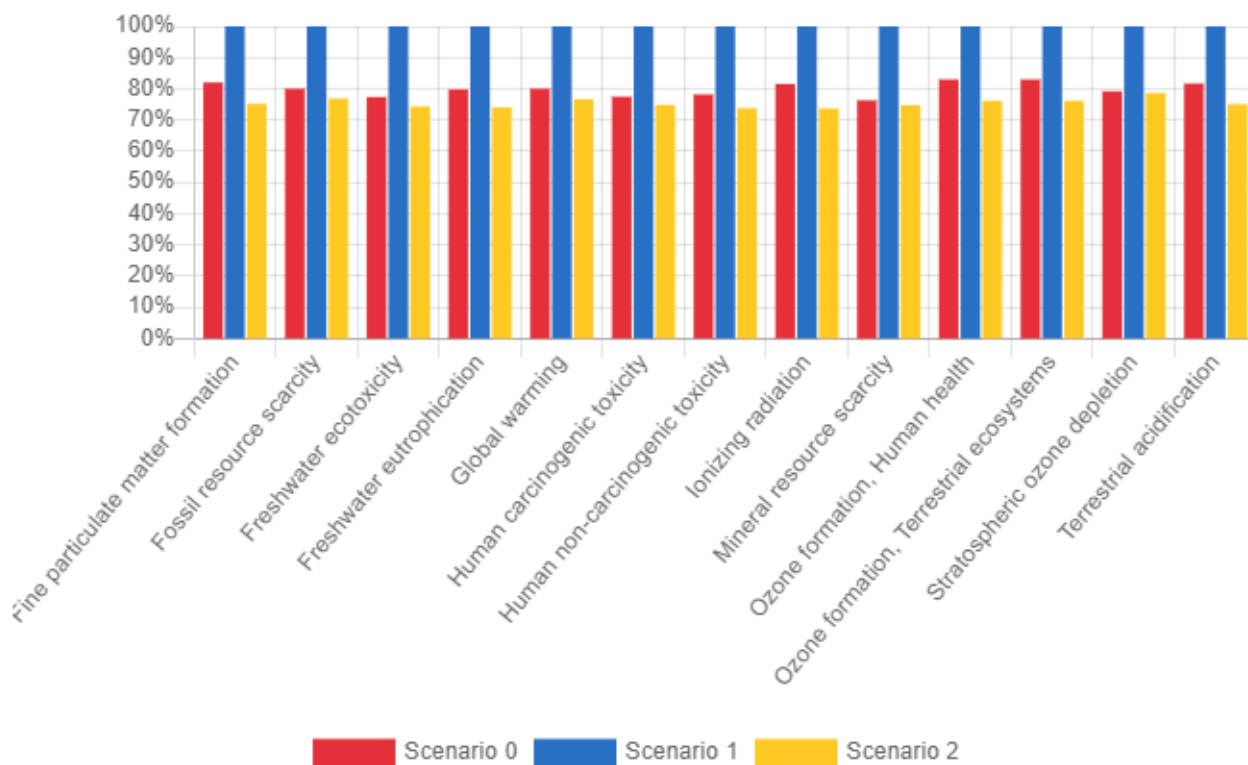


Figura 12 Metodo ReCiPe, Midpoint (H) - Risultati relativi per il confronto dei tre scenari previsti dalla bozza di Piano (%).

ReCiPe endpoint H

Categoria impatto	U.M.	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2
Damage to human health	DALY	0,00009	0,00011	0,00008
Damage to ecosystems	species,yr	0,0000002	0,0000002	0,0000002
Damage to resource availability	USD2013	3,995	4,974	3,820

Tabella 20 Metodo ReCiPe, Endpoint (H) – Risultati assoluti degli indicatori associati ai 3 scenari analizzati (1 t di rifiuto indifferenziato).

Categoria impatto	U.M.	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2
Damage to human health	DALY	80%	100%	76%
Damage to ecosystems	DALY	81%	100%	76%
Damage to resource availability	species,yr	80%	100%	77%

Tabella 21 Metodo ReCiPe, Endpoint (H) – Risultati relativi degli indicatori associati ai 3 scenari analizzati (1 t di rifiuto indifferenziato).

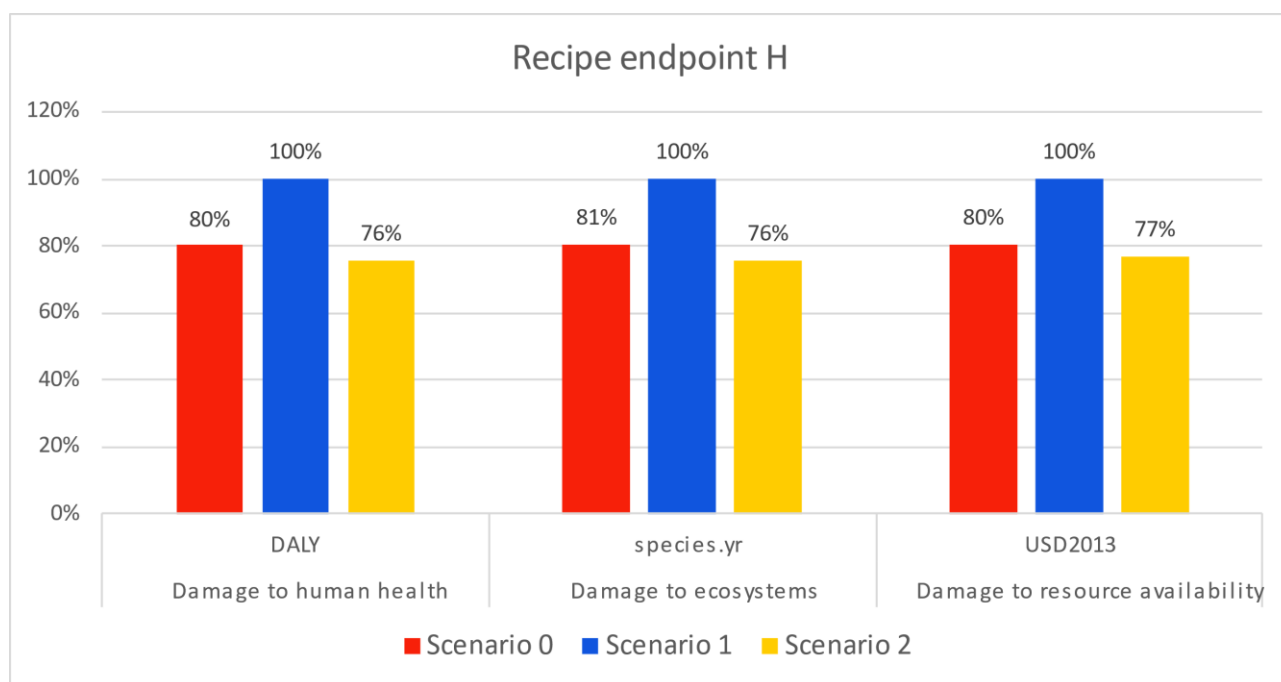


Figura 13 Metodo ReCiPe, Endpoint (H) - Valutazione degli impatti del ciclo di vita: confronto tra i 3 scenari (1 t di rifiuto indifferenziato).

Parte 2 - ecoprofilo energia prodotta da combustione CSS

Cumulative Energy Demand (CED)

Categoria impatto	U.M.	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2
Non-renewable, fossil	MJ	2,487	0,881	0,789
Non-renewable, biomass	MJ	0,000034	0,000008	0,000007
Non-renewable, nuclear	MJ	0,115	0,058	0,048
Renewable, biomass	MJ	0,028	0,016	0,013
Renewable, water	MJ	0,078	0,044	0,036
Renewable, wind, solar, geothermal	MJ	0,033	0,019	0,015

Tabella 22 Metodo CED – Rappresentazione degli indicatori energetici associati ai tre scenari analizzati (1 kWh di energia elettrica).

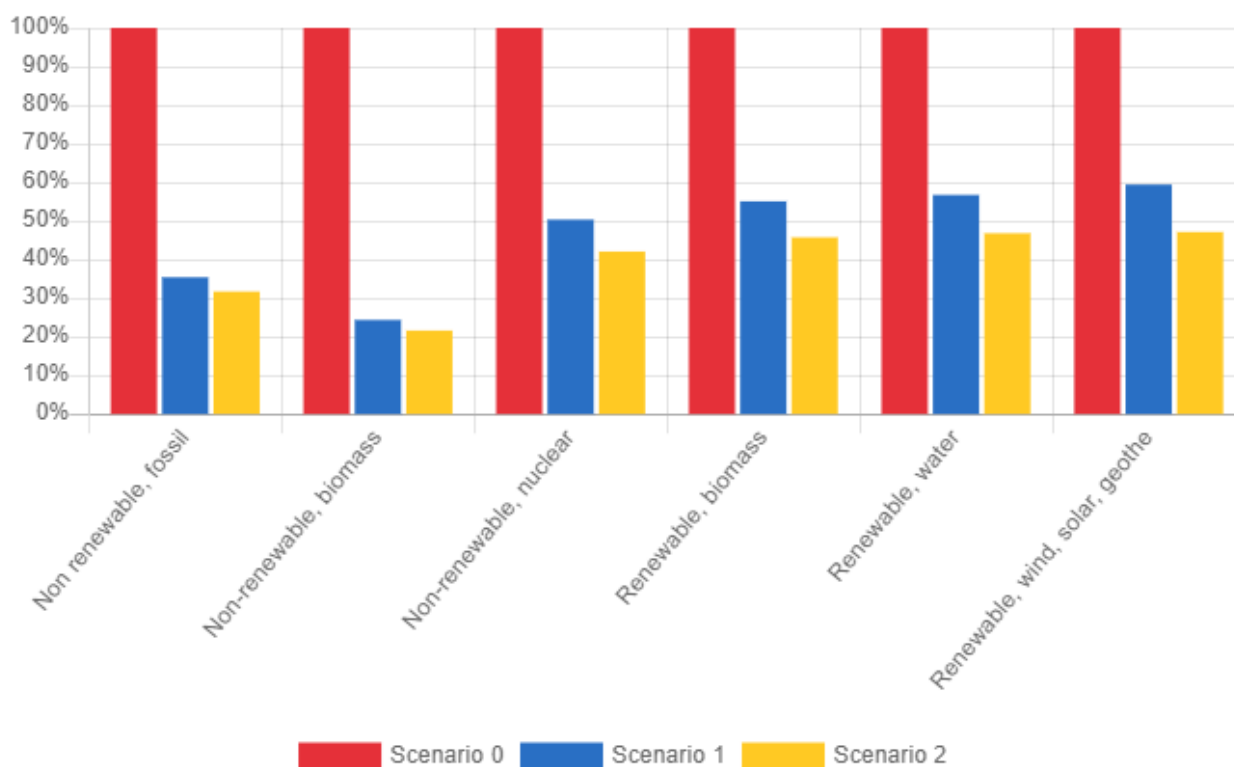


Figura 14 Metodo CED - Risultati relativi per il confronto dei tre scenari previsti dalla bozza di Piano (%).

Recipe midpoint H

Categoria impatto	U.M.	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	0,000322	0,000138	0,000127
Fossil resource scarcity	kg oil eq	0,054	0,019	0,017
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,1057	0,0543	0,0540
Freshwater eutrophication	kg P eq	0,0000254	0,0000125	0,0000122
Global warming	kg CO2 eq	2,424	1,227	1,220
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0,042	0,021	0,020
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	2,433	1,241	1,235
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	0,00682	0,00324	0,00271
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	0,0008	0,0004	0,0003
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	0,00158	0,000697	0,000666
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	0,00159	0,000701	0,000670
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	0,00000278	0,00000166	0,00000163
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	0,000862	0,000378	0,000351

Tabella 23 Metodo ReCiPe, Midpoint (H) - Rappresentazione degli indicatori energetici associati ai 3 scenari analizzati (1 kWh energia elettrica).

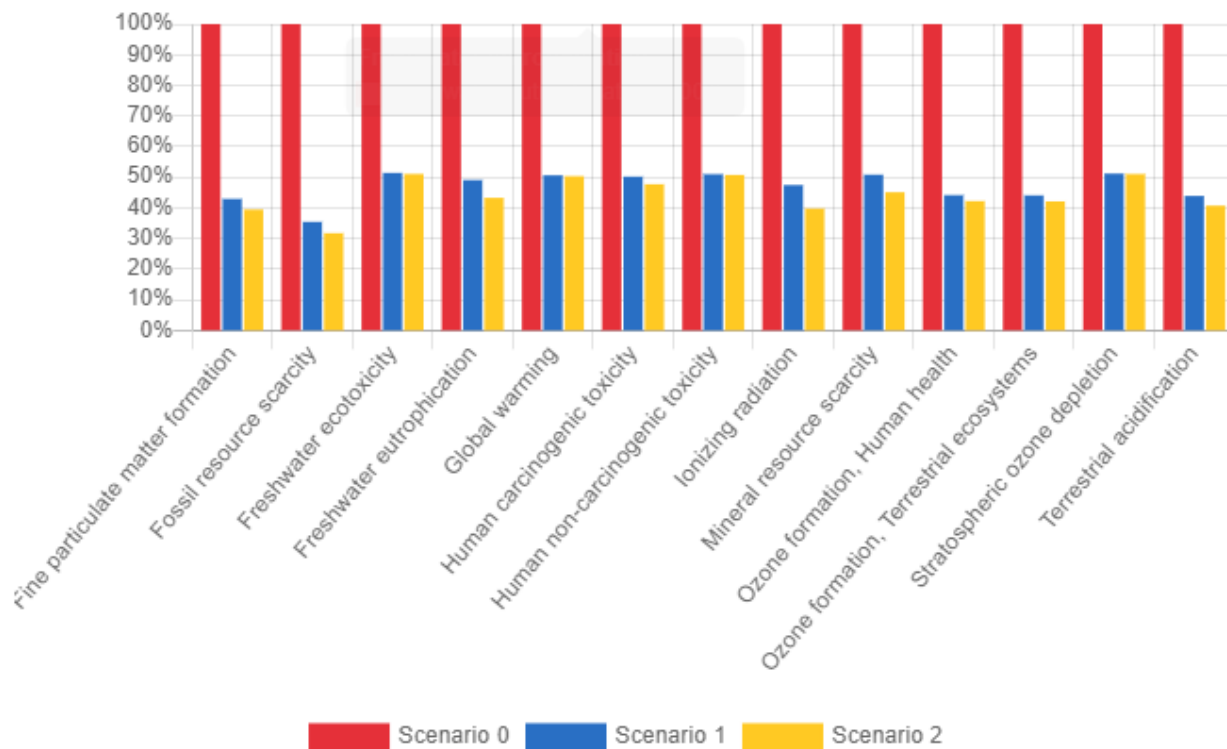


Figura 15 Metodo ReCiPe, Midpoint (H) - Risultati relativi per il confronto dei tre scenari previsti dalla bozza di Piano (%).

Recipe endpoint H

Categoria impatto	U.M.	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2
Damage to human health	DALY	0,0000032	0,0000016	0,0000016
Damage to ecosystems	species,yr	0,000000007	0,000000004	0,000000004
Damage to resource availability	USD2013	0,0212	0,0069	0,0062

Tabella 24 Metodo ReCiPe, Endpoint (H) - Risultati assoluti degli indicatori associati ai 3 scenari analizzati (1 kWh energia elettrica).

Categoria impatto	U.M.	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2
Damage to human health	DALY	100%	50%	50%
Damage to ecosystems	species.yr	100%	50%	50%
Damage to resource availability	USD2013	100%	33%	29%

Tabella 25 Metodo ReCiPe, Endpoint (H) - Risultati relativi degli indicatori associati ai 3 scenari analizzati (1 kWh energia elettrica).

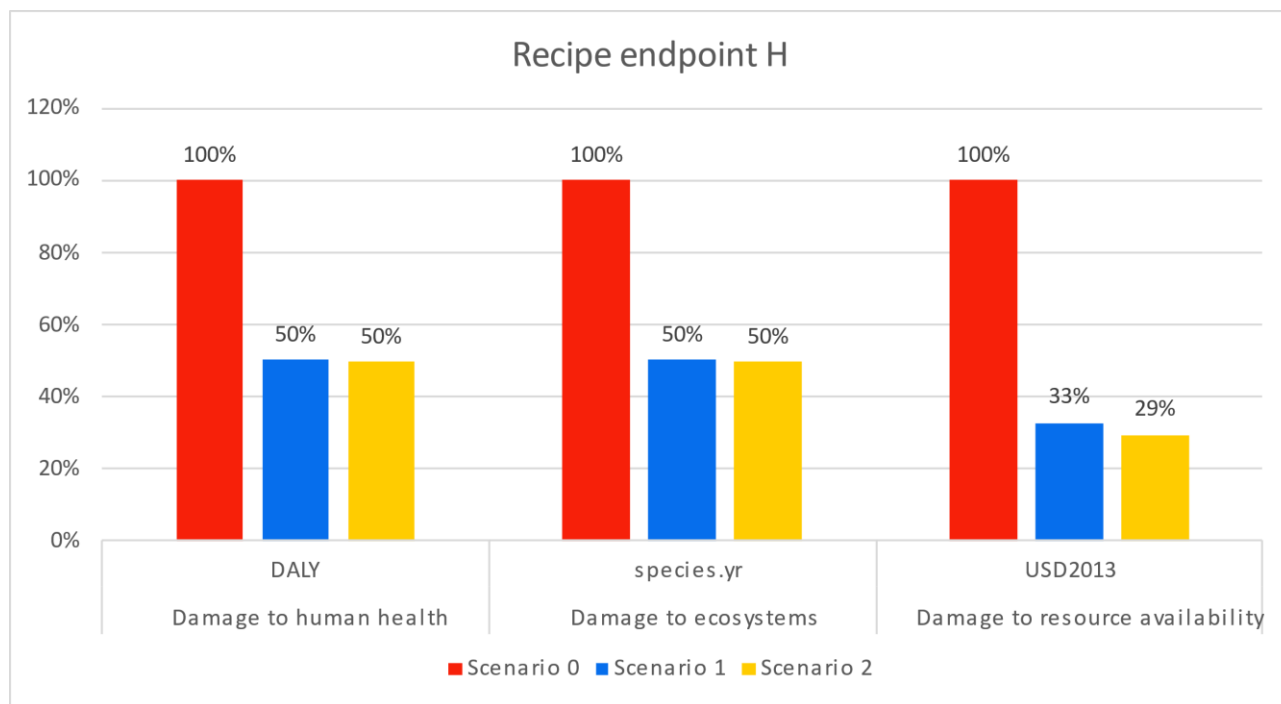


Figura 16 Metodo ReCiPe, Endpoint (H) - Valutazione degli impatti del ciclo di vita: confronto tra i 3 scenari (1 kWh energia elettrica).

Analisi di contributo

In questo paragrafo sono evidenziati per i diversi scenari i contributi dei singoli processi agli indicatori energetici e ambientali dell'intero sistema, suddivisi componente ambientale e componente energetica. Le figure seguenti evidenziano i risultati ottenuti facendo riferimento alla categoria di impatto "Global Warming Potential" del metodo ReCiPe e alla categoria "Non renewable, fossil" del metodo CED.

Parte 1 - ecoprofilo del processo di selezione del RSU

Analisi di contributo ambientale – Global Warming Potential

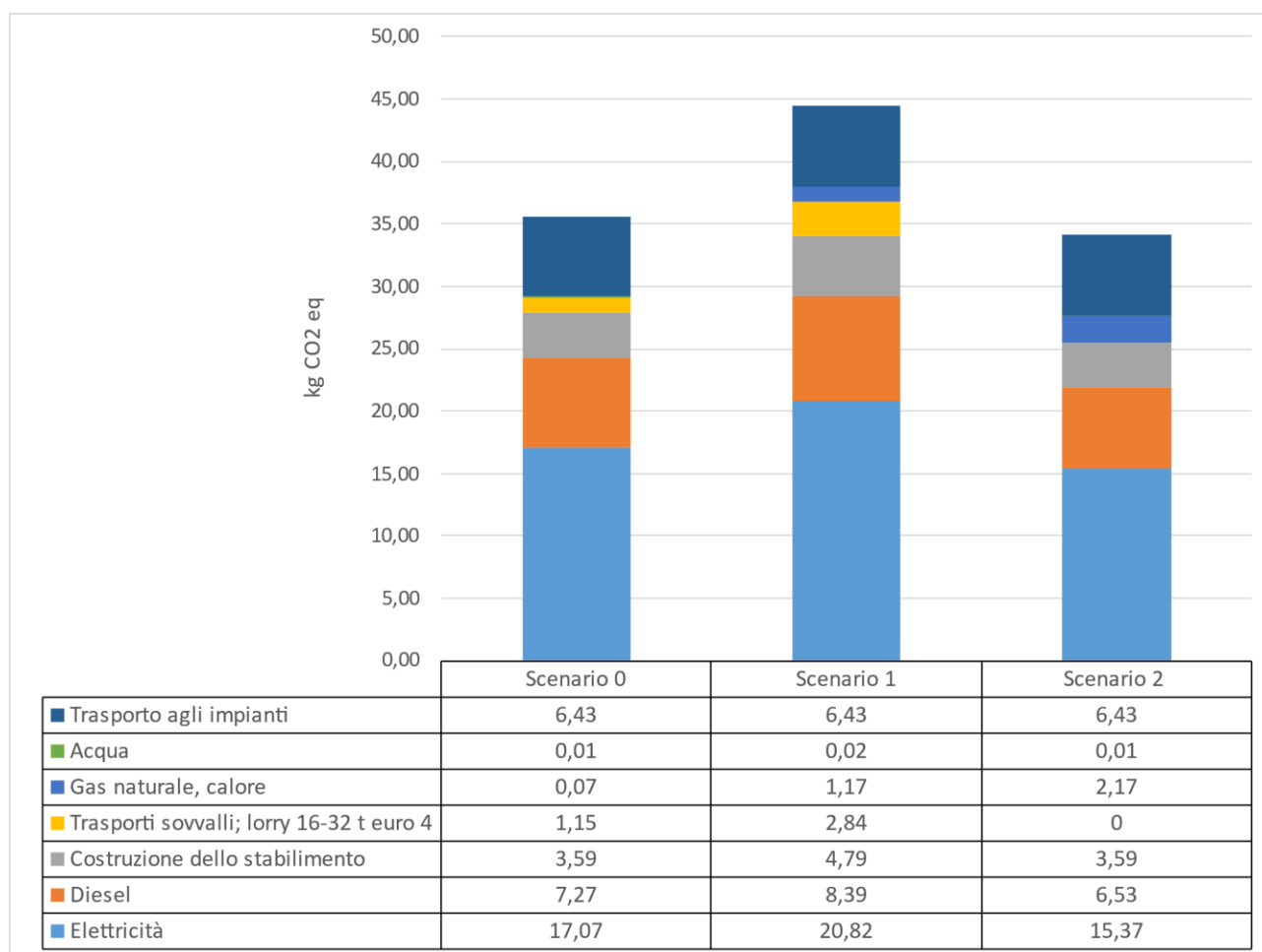


Figura 17 Metodo ReCiPe, Midpoint (H) - ecoprofilo del processo di selezione del RSU (1 t di RSU indifferenziato trattata) - Analisi di contributo all'impatto dei processi per la categoria Global Warming.

Analisi di contributo energetico – Non renewable, fossil

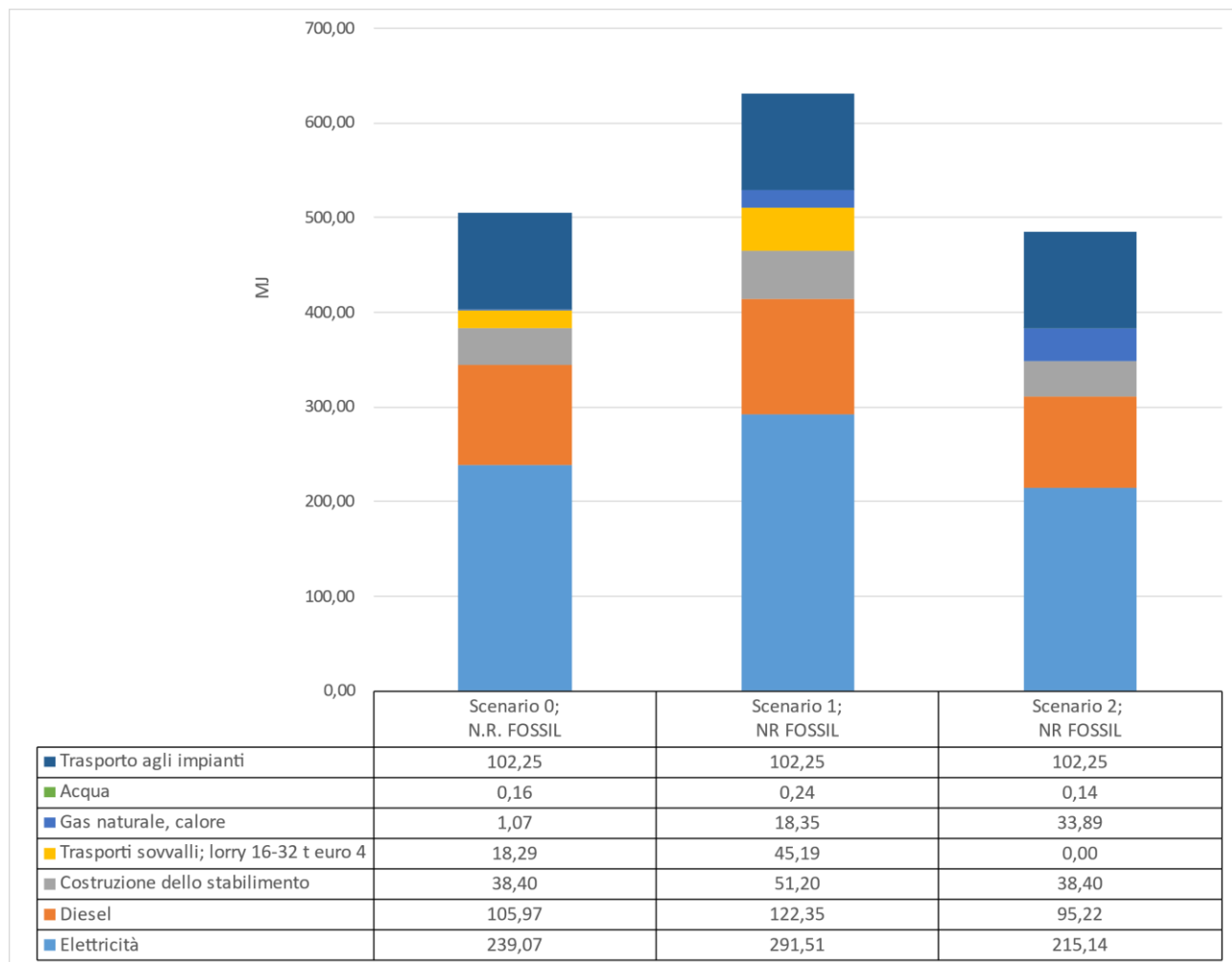


Figura 18 Metodo CED - ecoprofilo del processo di selezione del RSU - Analisi di contributo all’impatto dei processi per la categoria Non renewable, fossil.

Parte 2 - ecoprofilo energia prodotta da combustione CSS

Analisi di contributo ambientale – Global Warming Potential

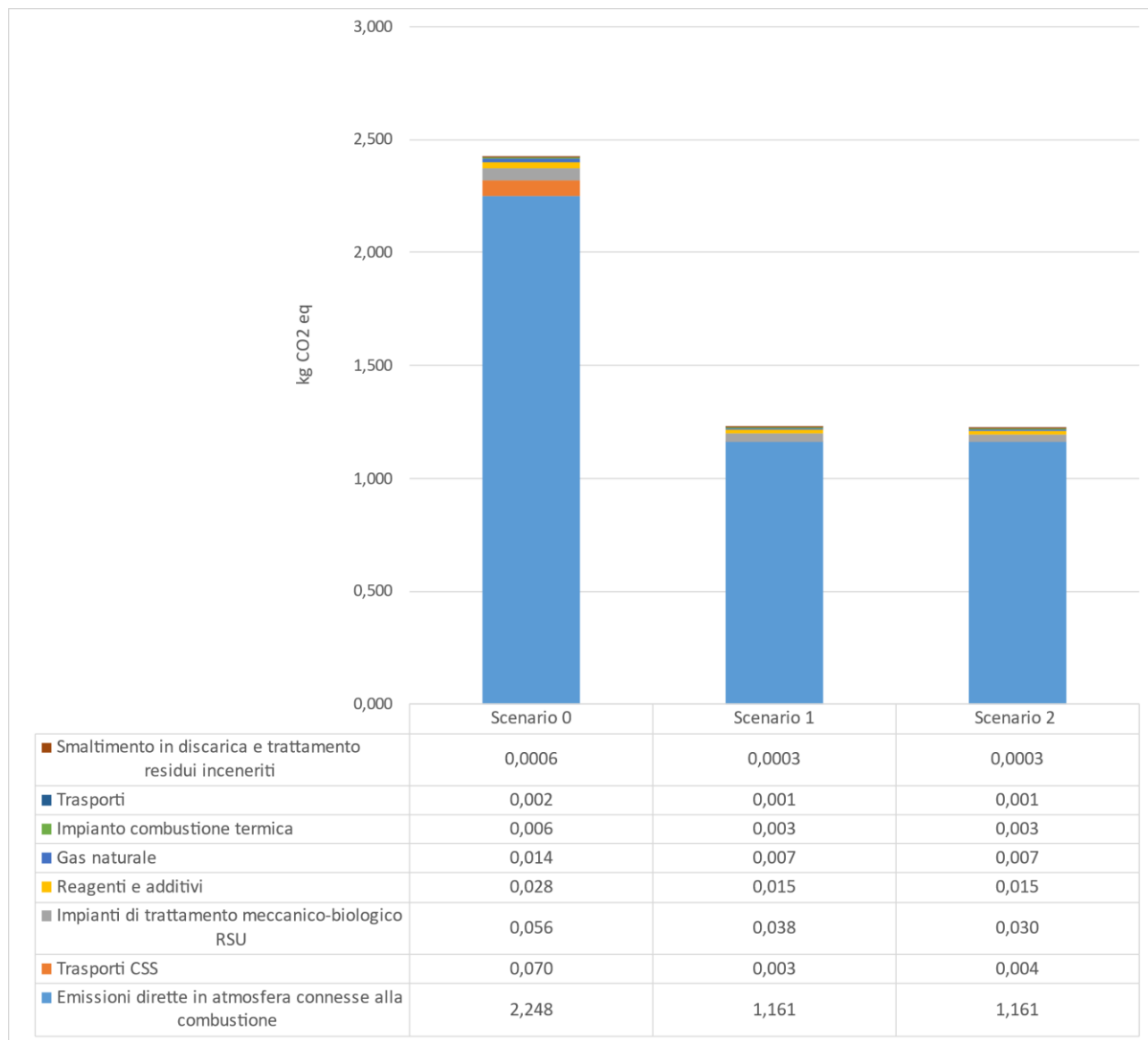


Figura 19 Metodo ReCiPe, Midpoint (H) - ecoprofilo energia prodotta da combustione CSS RSU (1 kWh prodotto) - Analisi di contributo all'impatto dei processi per la categoria Global Warming.

Analisi di contributo energetico – Non renewable, fossil

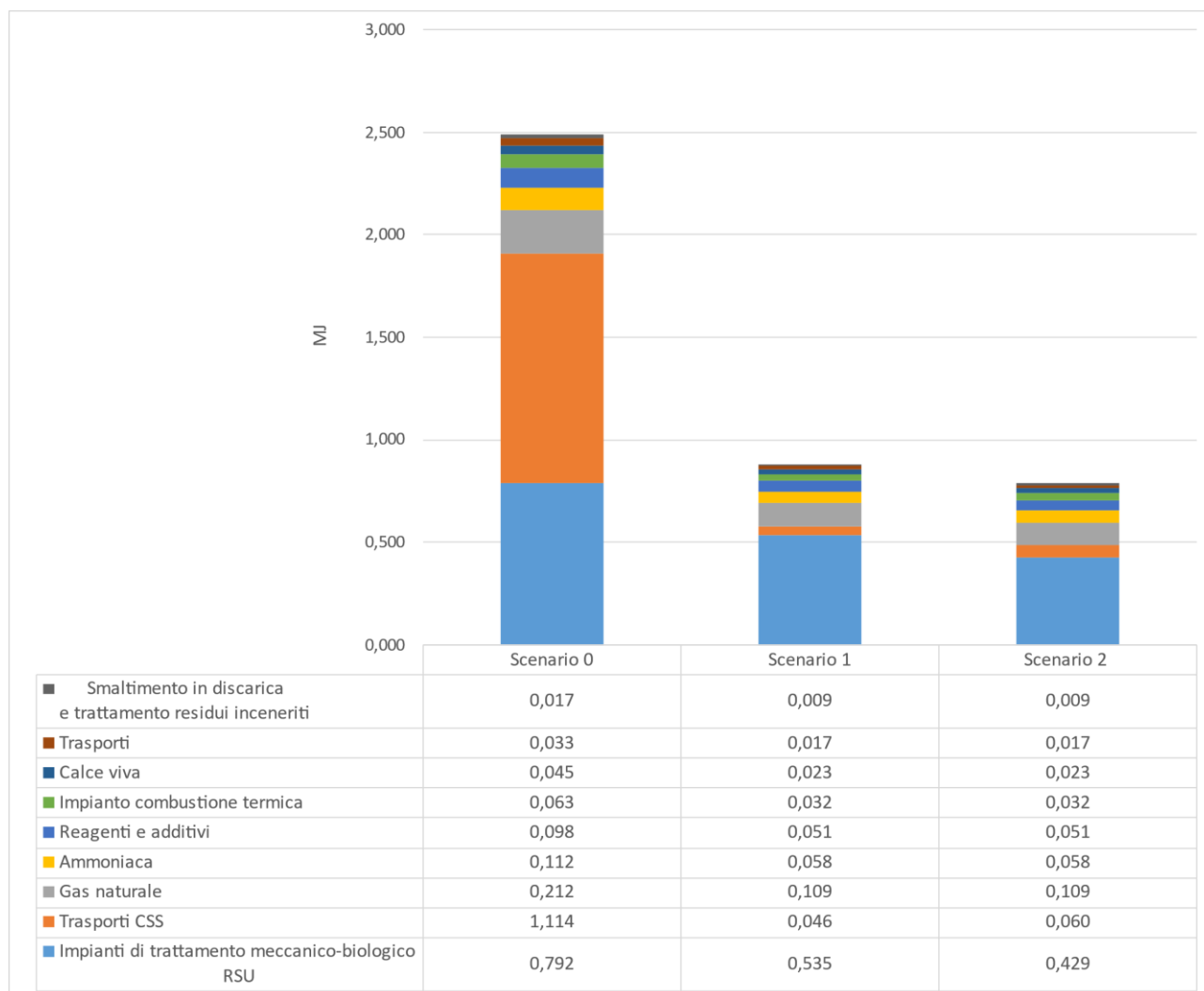


Figura 20 Metodo CED - ecoprofilo energia prodotta da combustione CSS (1 kWh prodotto) - Analisi di contributo all'impatto dei processi per la categoria Non renewable, fossil.

5. Interpretazione dei risultati

Parte 1

L'analisi degli impatti effettuata in termini di fabbisogno energetico cumulato evidenzia una potenziale propensione delle attenzioni verso lo scenario 2, consistente nell'ammodernamento degli impianti esistenti, a sfavore di uno scenario che prevede la realizzazione di una nuova sezione di trattamento in grado di selezionare ulteriormente il sovrappiù. Ad ogni modo, non è trascurabile l'opzione del mantenimento della situazione attuale (scenario 0) seppur tenendo a mente le assunzioni effettuate e i vincoli imposti dai dati disponibili. Difatti, in tal senso, lo scenario di riferimento, sembra essere rappresentativo per una soluzione di compromesso. In ogni caso, è bene evidenziare alcuni aspetti fondamentali per la corretta lettura dei risultati:

- Lo scenario 2, consistente nell'ammodernamento degli impianti esistenti è basato sui dati che sono stati resi disponibili e che consistono in stime sommarie sia della tipologia di intervento potenzialmente attuabile, sia delle prestazioni connesse a tali interventi e al grado di efficientamento realmente raggiungibile. Non è inoltre noto agli autori ad oggi se eventuali tecnologie basate su fonti rinnovabili potranno essere effettivamente implementate e in che entità.
- Le condizioni al contorno relative alla definizione dello scenario 1 sono condizionate da una generale mancanza di informazioni di dettaglio che avviene in maniera analoga allo scenario 2. In tale contesto i risultati che si ottengono portano banalmente ad una lettura ovvia, ovvero che l'aggiunta di un ulteriore impianto di trattamento meccanico inevitabilmente aumenta il fabbisogno energetico complessivo. Inoltre, allo stato attuale non è possibile effettuare previsioni e considerazioni in merito ai potenziali effetti positivi conseguenti all'adozione di fonti rinnovabili per l'alimentazione del nuovo impianto.
- Se si analizzano i risultati in termini ambientali sia a livello di indicatori di midpoint che di endpoint, la situazione generale che emerge è analoga a quella precedentemente descritta. A tal proposito si reputa che valgano le medesime considerazioni.

Se si analizzano i risultati dell'analisi di contributo condotta per le due categorie di impatto selezionate, emerge che:

- Il contributo agli impatti, sia energetici che ambientali conseguente all'analisi dei sistemi di trasporto è identico, dal momento che sono identiche le situazioni analizzate (stesso processo).
- Trattandosi di impianti alimentati da energia elettrica di rete, i contributi agli impatti ambientali ed energetici risultano essere quelli prevalenti. A tal proposito, occorrerebbe approfondire gli effetti di una variazione della composizione del mix energetico in termini di contributo agli impatti generati.
- Analogamente alle precedenti considerazioni, emerge un contributo significativo del combustibile utilizzato per l'autotrazione (diesel). Ad oggi non è possibile stimare le potenziali variazioni di impatto dovute all'adozione di una diversa tecnologia per l'autotrazione.
- In merito alla quota di impatti competenti ai trasporti di sovrappiù tra stabilimenti, occorre evidenziare come l'ammodernamento degli impianti possa giocare un ruolo positivo nella riduzione di tale contributo, mentre la realizzazione della nuova sezione di trattamento possa risentire di effetti negativi. A tal proposito, si ritiene opportuno evidenziare che ciò è imputabile principalmente alle differenze esistenti tra i diversi scenari che prevedono, ad esempio, che il processo di selezione

avvenga in più stabilimenti, di cui uno adiacente all’impianto di combustione a differenza della situazione in cui vi è una assenza di trasferimenti di sovralli tra impianti, in luogo di una maggiore distanza tra impianti di trattamento e impianto di combustione;

- Il contributo del gas naturale aumenta negli scenari 1 e 2 in funzione della necessità di calore richiesta per essiccare il RSU indifferenziato trattato;
- Il contributo dell’infrastruttura (stabilimento e macchinari) è contenuto ed aumenta solo nel caso scenario 1, in cui viene realizzata una nuova sezione di raffinazione.

Parte 2

Gli scenari analizzati, alternativi alla situazione attuale portano ad una riduzione visibile del fabbisogno complessivo di energia cumulativa. La scelta tra i due scenari, se basata meramente sui numeri e sulle assunzioni fatte, mette in risalto in maniera sensibile la riduzione dei fabbisogni che si può ottenere dal rinnovamento degli impianti contestualmente alla realizzazione di un nuovo impianto di combustione. L’esistenza di tale ridotta differenza tra i due scenari va in ogni caso analizzata non solo in termini energetici, ma anche ambientali ed economici. Inoltre, considerando l’analisi di contributo condotta per la categoria di impatto “Non renewable, fossil” si può notare il contributo dei trasporti esistenti per lo scenario 0 necessari per trasferire il CSS prodotto dagli stabilimenti all’impianto di combustione.

A livello di impatti ambientali di midpoint e di endpoint, sulla base dei risultati numerici ottenuti a partire dalle assunzioni modellistiche effettuate, la differenza esistente a livello di analisi energetica tra i due scenari alternativi a quello attuale si attenua significativamente per una buona parte delle categorie di impatto considerate. Considerando l’analisi di contributo condotta per la categoria di impatto “Global Warming Potential” si può notare il contributo significativo apportato dal processo di combustione presente in tutti gli scenari analizzati.

Inoltre, si evidenzia che i risultati ottenuti potrebbero modificarsi in maniera consistente se si potessero superare i vincoli modellistici imposti dalla qualità complessiva dei dati messi a disposizione che non consentono di poter considerare correttamente gli effetti conseguenti all’introduzione nel modello di calcolo di un processo di essiccazione in grado di migliorare il PCI del CSS. Tale aspetto potrebbe interessare in particolar modo il caso dello scenario 2, caso in cui si verifica l’essiccazione di una maggiore quantità di CSS.

In ogni caso si evidenzia in maniera rilevante la differenza insistente tra la situazione attuale e gli scenari alternativi di intervento.

Se si analizzano infine i risultati dell’analisi di contributo condotta per le due categorie di impatto selezionate, emerge che:

- La pressoché totalità del contributo all’indicatore GWP per tutti gli scenari è dovuta alle emissioni dirette in atmosfera connesse al processo di combustione. Le differenze esistenti tra i tre casi riprendono lo stesso andamento descritto per la situazione generale, ovvero di evidente riduzione percentuale dell’impatto degli scenari 1 e 2 rispetto alla situazione attuale.
- A differenza di quanto visibile dai risultati dell’analisi di ecoprofilo della tonnellata trattata (scenario 1 più impattante a livello di trattamento del RSU indifferenziato), la disponibilità di un miglior impianto di combustione fa sì che la differenza esistente venga colmata totalmente in fase di combustione. Tale differenza è comune ad entrambe le categorie di impatto approfondite.

- A livello di fabbisogno di energia cumulativo si evidenziano i contributi significativi, per tutti gli scenari considerati, relativi alla fase di trattamento meccanico del RSU indifferenziato. Limitatamente allo scenario 0, per via della distanza media esistente tra gli impianti di trattamento e di combustione, emerge il contributo del trasporto. Tale risultato porta a considerare che in caso di mantenimento della situazione inalterata occorrerà comunque intervenire per razionalizzare i trasporti.

6. Conclusioni, limitazioni e suggerimenti per eventuali sviluppi futuri

Conclusioni

A valle dello studio effettuato, emerge che, se in generale a livello di processo di trattamento del RSU indifferenziato lo scenario attuale è potenzialmente competitivo con almeno un'alternativa, a livello di valorizzazione del CSS prodotto, mostra una evidente differenza che lascia propendere verso una necessità di intervento. In ogni caso, per una valutazione approfondita degli scenari occorre disporre di un maggior livello di dettaglio in linea con le limitazioni sotto riportate. In tal senso, si pone l'attenzione sia sulla necessità di approfondimento dello stato dell'arte, sia delle proposte progettuali, soprattutto in termini tecnologici e prestazionali.

Limiti

Lo studio presenta una serie di limiti che condizionano significativamente i risultati e costringono al ricorso a ipotesi di rilievo, parzialmente dovute alla natura del Piano stesso in quanto strumento di pianificazione e di programmazione di area vasta. In particolare, la carenza di informazioni puntuali e dettagliate relative ai processi coinvolti è uno dei vincoli principali e la complessità degli scambi di materia che avvengono sia all'interno dell'impianto, sia tra i diversi stabilimenti, contribuisce a limitare la valutazione.

In particolare, si evidenzia che:

- la caratterizzazione merceologica del CSS è limitata a singole analisi puntuali, che potrebbero non essere rappresentative per la composizione media dell'anno 2019;
- le caratteristiche tecnico/prestazionali dell'impianto di combustione ipotizzato di riferimento per lo scenario 0 sono, per necessità modellistiche e di confronto tra scenari alternativi, ipotetiche e descrittive di una situazione media che in realtà non si verifica dal momento che la maggior parte dei materiali selezionati viene inviata a fine vita al di fuori dei confini regionali mentre il CSS viene valorizzato anche all'interno di cementifici per i quali i gestori non hanno messo a disposizione dati primari;
- le caratteristiche tecnico/prestazionali della nuova sezione di raffinazione non essendo oggetto di specifica da parte del Piano costringono a ricorrere a dati di letteratura medi che potrebbero non essere rappresentativi in caso di proposta esecutiva di attuazione dello scenario di Piano da parte di un soggetto terzo;
- le caratteristiche tecnico/prestazionali per il rinnovamento degli impianti di selezione e le modalità di intervento di efficientamento, non essendo oggetto di specifica da parte del Piano, costringono a ricorrere a stime che potrebbero non essere rappresentative in caso di proposta esecutiva di attuazione dello scenario di Piano da parte di un soggetto terzo;

- le caratteristiche tecnico/prestazionali del nuovo impianto di combustione non essendo oggetto di specifica da parte del Piano costringono a ricorrere a dati di letteratura medi che potrebbero non essere rappresentativi in caso di proposta esecutiva di attuazione dello scenario di Piano da parte di un soggetto terzo;
- la semplificazione modellistica effettuata sul nuovo impianto di combustione ha limitato gli autori all'analisi delle potenziali implicazioni ambientali del vettore energetico identificato dalla committenza come quello di maggiore interesse.

Suggerimenti

Si suggerisce di attivare i gestori e gli Enti competenti affinché pianifichino campagne di monitoraggio della produzione di CSS al fine di migliorare la qualità del dato medio utilizzato per descrivere il CSS stesso.

Si suggerisce di attivare i gestori degli impianti affinché mettano a disposizione informazioni di maggiore dettaglio relativi ai consumi degli impianti stessi.

Nel caso in cui si opti per il mantenimento della situazione attuale (Scenario 0), si suggerisce di approfondire ulteriormente le implicazioni ambientali ricercando e stimolando ulteriormente la partecipazione degli attori della filiera del fine vita ubicati oltre i confini regionali al fine di ottenere dati primari specifici di maggior dettaglio rispetto a quelli condivisi per lo sviluppo del presente studio.

Si suggerisce di approfondire gli aspetti ambientali conseguenti alla realizzazione degli interventi di ammodernamento degli impianti esistenti in accordo con il soggetto realizzatore per tenere conto delle specificità del progetto esecutivo proposto.

Si suggerisce di approfondire gli aspetti ambientali conseguenti alla realizzazione del nuovo impianto di combustione in accordo con il soggetto realizzatore, sia per tenere conto delle specificità del progetto esecutivo proposto, sia dei possibili reimpieghi dei vettori energetici generati, anche diversi dall'energia elettrica.

A livello di ottimizzazione dei processi di trasformazione, trattandosi di impianti alimentati prevalentemente da energia elettrica di rete che presentano potenziali contributi agli impatti ambientali ed energetici rilevanti, si suggerisce di approfondire opportunamente, ad esempio in sede di attuazione del Piano, gli effetti conseguenti ad una variazione della composizione del mix energetico.

A livello di output dei processi di selezione, la bozza di Piano si concentra prioritariamente sulla valorizzazione energetica in ottica di economia circolare del rifiuto solido indifferenziato prodotto all'interno dei confini regionali. Tale obiettivo porta a due conseguenze che andrebbero approfondite in futuri studi: l'inclusione nell'analisi LCA dei processi di fine vita che coinvolgono i flussi di materiali diversi dal CSS, oggetto di esclusione da parte del presente studio.

Bibliografia

- Asadi, F., 2016. Drying of Refuse-Derived Fuel (RDF). University College of Southeast Norway Faculty of Technology, Norway.
- Blengini, G.A., Genon, G., 2008. LCA del sistema integrato dei RSU nella Provincia di Torino. Analisi energetico ambientale con metodologia LCA ed analisi economica dell'attuazione del Piano Provinciale di Gestione dei Rifiuti alla luce dei nuovi obiettivi di Raccolta Differenziata introdotti dal D.lgs. 152/06.
- Doka, G., 2003. Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. ecoinvent report No. 13. (No. 13). Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- eplca.jrc.ec.europa.eu, 2010. URL eplca.jrc.ec.europa.eu (accessed 9.6.21).
- European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2011. International reference life cycle data system (ILCD) handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. Publications Office, Luxembourg.
- European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2010. International reference life cycle data system (ILCD) handbook: Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment. Publications Office, Luxembourg.
- Gabor Doka, 2021. Calculation manual for LCI calculation tools for regionalised waste treatment - Updated calculation Manual (No. Extended and updated version). Doka Life Cycle Assessments, Zurich.
- Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., van Zelm, R., 2017. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *Int J Life Cycle Assess* 22, 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Laurent, A., Clavreul, J., Bernstad, A., Bakas, I., Niero, M., Gentil, E., Christensen, T.H., Hauschild, M.Z., 2014. Review of LCA studies of solid waste management systems – Part II: Methodological guidance for a better practice. *Waste Management* 34, 589–606. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.12.004>
- Rabl, A., Benoist, A., Dron, D., Peuportier, B., Spadaro, J.V., Zoughaib, A., 2007. How to account for CO2 emissions from biomass in an LCA. *Int J Life Cycle Assess* 12, 281–281. <https://doi.org/10.1065/lca2007.06.347>
- Rigamonti, L., Borghi, G., Martignon, G., Ciceri, G., Grosso, M., 2019. Analisi dei costi del ciclo di vita di filiere di produzione di energia dal rifiuto urbano indifferenziato basate sul pretrattamento meccanico biologico. *IdA* 6, 30–42. <https://doi.org/10.32024/ida.v6i1.205>

Allegati

I. Elaborazioni bilancio di massa

La Tabella 26 rappresenta il bilancio dei flussi di rifiuto in ingresso (RT) e dei flussi in uscita (DR) per il sistema degli impianti TM della Regione. Poiché l'output del processo di selezione, in conseguenza delle assunzioni effettuate ai fini dello studio, risulta maggiore dell'input, è stato necessario compensare e aggiungere 4230 tonnellate al flusso denominato "Altro", al fine di bilanciare nuovamente i flussi in ingresso e in uscita. Si è utilizzato come riferimento per l'entità della compensazione la perdita dovuta a evaporazione presente in Net (1,6%), l'impianto che presenta meno commistione dei flussi e più chiaramente interpretabile.

COMPLESSIVO						
RT		q.tà [t]	%	% PER ELAB		
		200301 (Comuni e altri)	83.789,69	60,57%	73,23%	
	19 DA RU (ALTRI)	17.514,43	12,66%			
	Altro	37.038,77	26,77%			
	SOMMA	138.342,89	100,00%			
		q.tà [t]	%		q.ta da 200301 [t] (q.tà * 0,7323)	
19 DR	CSS - R1	72.330,27	53,2%		52965	
	191212 x R12	6289,307	4,6%		4605	
	191212 x D10	8890,601	6,5%		6510	
	Carta x R3	0,00	0,0%		0	
	Metalli ferrosi x R3	4.118,68	3,0%		3016	
	Metalli non ferrosi x R3	171,22	0,1%		125	
	Plastica x R3	1.076,55	0,8%		788	
	Legno x R3	2.894,62	2,1%		2120	
	191212 x D1	40.278,99	29,6%		29495	
		TOTALE RIFIUTI IN USCITA	136.050,24	100,00%		99625
		PERDITE	-	-		1679

Tabella 26 Rappresentazione complessiva dei flussi in ingresso nel sistema e in uscita, costruita sulla base delle elaborazioni dei tecnici regionali e sulle assunzioni dello studio (Arpa, 2019).

Bilancio di massa per lo scenario 0

Categoria	FLUSSI IN INGRESSO		FLUSSI IN USCITA				
	200301 [t]	191212 [t]	CSS [t]	A riciclo [t]	191212 x R12 [t]	Perdite evap. [t]	191212 x D10/D1 [t]
Altro-Residuo	2,230	0	0	0	101	0	2,129
Carta	12,951	0	11,335	0	589	0	1,028
Inerti	3,505	18	53	0	160	0	3,310
Legno	2,090	2,995	2,648	2,120	231	0	86
Metalli	3,291	263	53	3,141	162	0	198
Organico	13,643	18	530	0	621	1,679	10,831
Pericolosi	732	0	0	0	33	0	699
Plastica	17,132	14,222	29,131	788	1,425	0	9
RAEE	1,020	0	0	0	46	0	974
Tessili	25,105	0	9,216	0	1,141	0	14,748
Vetro	2,090	0	0	0	95	0	1,995
Totale [t]	101,304		101,304				

Tabella 27 Rappresentazione del bilancio di massa elaborato in relazione allo scenario 2.

Nell'elaborazione dei dati ai fini dello studio, alla somma dei flussi di 200301 e di 191212 (materiale in ingresso) sono stati sottratti i flussi noti, o derivanti da assunzioni, di materiali in uscita: CSS, a riciclo, 191212 x R12 e le perdite per evaporazione; in tal modo è stato ricavato per differenza il 191212 diretto a discarica.

Il bilancio di massa, effettuato sulla base delle sopracitate assunzioni, ha evidenziato una richiesta di materiale plastico maggiore di quanto presente nel flusso in ingresso. Per tale motivo è stato necessario compensare definendo una composizione del 191212 in ingresso ricca di materiale plastico.

Le composizioni dei flussi per il 191212 destinato a D1-D10 è rappresentata in Tabella 28.

Composizione del 191212 destinato a operazioni D1, D10 - scenario 0	
Categoria	[%]
Altro-Residuo	6%
Carta	3%
Inerti	9%
Legno	0%
Metalli	1%
Organico	30%
Pericolosi	2%
Plastica	0%
RAEE	3%
Tessili	41%
Vetro	6%

Tabella 28 Rappresentazione in termini percentuali della composizione del flusso di 191212 destinato alle operazioni D1 e D10.

Bilancio di massa per lo scenario 1.

Categoria	FLUSSI IN INGRESSO		FLUSSI IN USCITA				
	200301 [t]	191212 [t]	CSS [t]	A riciclo [t]	191212 x R12 [t]	Perdite evap. [t]	191212 x D10/D1 [t]
Altro-Residuo	2,230	0	0		0	0	2,230
Carta	12,951	0	11,815	1,000	0	0	136
Inerti	3,505	18	55		0	0	3,468
Legno	2,090	2,995	2,761	2,120	0	0	205
Metalli	3,291	263	55	3,400	0	0	99
Organico	13,643	18	552		0	6,129	6,979
Pericolosi	732	0	0		0	0	732
Plastica	17,132	14,222	30,366	900	0	0	87
RAEE	1,020	0	0		0	0	1,020
Tessili	25,105	0	9,607		0	0	15,498
Vetro	2,090	0	0		0	0	2,090
Somma frazioni	83,790	17,514	55,211	7,420	0	6,129	32,545
Totale [t]	101,304		101,304				

Tabella 29 Rappresentazione del bilancio di massa elaborato in relazione allo scenario 2.

Composizione del 191212 destinato a operazioni D1, D10 - scenario 1	
Materiale	[%]
Altro-Residuo	7%
Carta	0%
Inerti	11%
Legno	1%
Metalli	0%
Organico	21%
Pericolosi	2%
Plastica	0%
RAEE	3%
Tessili	48%
Vetro	6%

Tabella 30 Rappresentazione in termini percentuali della composizione del flusso di 191212 destinato alle operazioni D1 e D10.

Bilancio di massa per lo scenario 2

Categoria	FLUSSI IN INGRESSO		FLUSSI IN USCITA				
	200301 [t]	191212 [t]	CSS [t]	A riciclo [t]	191212 x R12 [t]	Perdite evap. [t]	191212 x D10/D1 [t]
Altro-Residuo	2,230	0	0		0	0	2,230
Carta	12,951	0	11,815	1,000	0	0	136
Inerti	3,505	18	55		0	0	3,468
Legno	2,090	2,995	2,761	2,120	0	0	205
Metalli	3,291	263	55	3,400	0	0	99
Organico	13,643	18	552		0	10,129	2,979
Pericolosi	732	0	0		0	0	732
Plastica	17,132	14,222	30,366	900	0	0	87
RAEE	1,020	0	0		0	0	1,020
Tessili	25,105	0	9,607		0	0	15,498
Vetro	2,090	0	0		0	0	2,090
Somma frazioni	83,790	17,514	55,211	7,420	0	10,129	28,545
Totale [t]	101,304		101,304				

Tabella 31 Rappresentazione del bilancio di massa elaborato in relazione allo scenario 2.

Composizione del 191212 destinato a operazioni D1, D10 - scenario 2	
Materiale	[%]
Altro-Residuo	8%
Carta	0%
Inerti	12%
Legno	1%
Metalli	0%
Organico	10%
Pericolosi	3%
Plastica	0%
RAEE	4%
Tessili	54%
Vetro	7%

Tabella 32 Rappresentazione in termini percentuali della composizione del flusso di 191212 destinato alle operazioni D1 e D10.

II. Calcolo dei consumi

Impianto	Energia [kWh]	Acqua [m ³]	Gasolio per mezzi [l]	Metano [l]
Net (2020)	1730185	3104	27000	0
Eco Sinergie	1572314	4755	61396	0
S.N.U.A.	3863901	678	354800	13994000

Tabella 33 Consumi totali per degli impianti per l'anno 2020, così come comunicati dalla Direzione Regionale.

Per la determinazione dei consumi dei diversi impianti si sono rielaborati i dati messi a disposizione in modo da evidenziare i valori riferiti alle quote riferite al trattamento dei soli materiali di codice 200301 e 191212. In tal senso la sommatoria dei flussi è stata rapportata al totale delle tonnellate trattate negli impianti escludendo la materia destinata a giacenza.

NET

MUD scheda RIF	Operazioni	R12	R3
	Quantità [t]	46332	9999
RSU indifferenziati destinati a R12	CER	200301	
	t	46156	
Consumo attribuito al RSU indifferenziato [%]		82%	

Tabella 34 Elaborazione dei dati relativi ai materiali trattati nell'impianto Net, per la stima della quota dei consumi corrispondente al trattamento del rifiuto indifferenziato.

S.N.U.A.

MUD scheda RIF	Operazioni	R12	R3
	Quantità [t]	56432,05	8346,63
MUD scheda IMB	Operazioni	R12	R3
	Quantità [t]	14989,01	0,9
RSU indifferenziati destinati a R12	CER	200301	191212
	t	15086	21156
Consumo attribuito al RSU indifferenziato [%]		45%	

Tabella 35 Elaborazione dei dati relativi ai materiali trattati nell'impianto S.N.U.A., per la stima della quota dei consumi corrispondente al trattamento del rifiuto indifferenziato.

ECO SINERGIE

MUD scheda RIF	Operazioni	R12	R3
	Quantità [t]	50726,11	1763,02
MUD scheda IMB	Operazioni	R12	R3
	Quantità [t]	12355,33	8633,06
RSU indifferenziati destinati a R12	CER	200301	191212
	t	22549	8905
Consumo attribuito al RSU indifferenziato [%]		43%	

Tabella 36 Elaborazione dei dati relativi ai materiali trattati nell'impianto Eco Sinergie, per la stima della quota dei consumi corrispondente al trattamento del rifiuto indifferenziato.

Impianto	Energia [kWh]	Acqua [m ³]	Gasolio per mezzi [l]	Metano [l]
Net (2020)	1417663,788	2543	22123	0
S.N.U.A.	1755521,88	308	161200	244784
Eco Sinergie	673070,6828	2036	26282	0
Somma	3846256,354	4887	209605	244784

Tabella 37 Consumi del sistema degli impianti TM elaborati in modo da evidenziare la quota dei consumi corrispondente al trattamento del solo rifiuto indifferenziato.

Impianti SCENARIO 0	Energia [kWh/t]	Acqua [m ³ /t]	Gasolio per mezzi [l/t]	Metano [l/t]
Consumi unitari (1 t)	37,97	0,05	2,07	2,42

Tabella 38 Elaborazione per il calcolo dei consumi relativi ad una tonnellata trattata.

Consumo per t di RSU	U.M.	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2
Energia elettrica	kWh	37,97	46,30	34,17
Acqua	kg	48,24	73,45	43,42
Gasolio per mezzi	l	2,07	2,39	1,86
Metano	MJ	2,42	41,69	76,99
Impianti	Item	$\left(\frac{3}{T * 50}\right)$	$\left(\frac{4}{T * 50}\right)$	$\left(\frac{3}{T * 50}\right)$
Trasporti	kg*km	109,4*64,07	40*432,9	-
Legenda: T=tonnellate rifiuto indifferenziato trattato nel 2019, 50=numero anni di funzionamento impianto				

Tabella 39 Tabella di input dell'analisi di inventario condotta per il processo di trattamento per i tre scenari.

III. Analisi di inventario del processo di incenerimento elaborato da “waste tool 2021” di Doka LCA.

Input - Flusso	U.M.	Quantità
ammonia, anhydrous, liquid	kg	0,0015927
cationic resin	kg	2,0644E-6
cement, unspecified	kg	0,0029201
chemical, inorganic	kg	2,1367E-4
chemical, organic	kg	9,0517E-6
chromium oxide, flakes	kg	2,0365E-6
heat, district or industrial, natural gas	MJ	0,29784
hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	kg	2,4712E-4
hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state	kg	4,8603E-4
iron (III) chloride, without water, in 40% solution state	kg	2,0399E-5
municipal waste incineration facility	Item(s)	2,5E-10
Oxygen	kg	0
process-specific burdens, residual material landfill	kg	0,0073004
process-specific burdens, slag landfill	kg	0,03583
quicklime, milled, packed	kg	0,006227
residual material landfill	Item(s)	1,5209E-11
slag landfill	Item(s)	6,3698E-11
sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	kg	0,0018948
titanium dioxide	kg	9,9787E-5
transport, freight train	t*km	0,01356
transport, freight, lorry, unspecified	t*km	0,0091649
water, decarbonised	kg	2,533

Tabella 40 Tabella di input dell'analisi di inventario condotta per il processo di incenerimento di 1 kg di CSS. Fonte: Elaborazione da “Updated location- and waste-specific life cycle inventories of waste treatment”.

Output - Flusso	U.M.	Quantità
Aluminium	kg	1,2403E-9
Aluminium	kg	0,0012301
Aluminium	kg	9,9867E-8
Ammonia	kg	1,8726E-6
Antimony	kg	1,5357E-11
Antimony	kg	7,8251E-6
Antimony	kg	3,7677E-6
Arsenic	kg	5,5994E-9
Arsenic, ion	kg	4,358E-7
Arsenic, ion	kg	2,6681E-7
Barium	kg	2,9191E-7
Barium	kg	5,6332E-5
Barium	kg	3,1862E-8
Benzene	kg	2,125E-8
Benzene, hexachloro-	kg	4,4433E-11
Benzene, pentachloro-	kg	1,1227E-10

Benzo(a)pyrene	kg	4,7289E-13
Beryllium	kg	1,6639E-7
Beryllium	kg	1,1034E-10
BOD5, Biological Oxygen Demand	kg	0,001339
BOD5, Biological Oxygen Demand	kg	4,1098E-4
Boron	kg	1,8417E-6
Boron	kg	2,31E-8
Bromine	kg	1,8797E-8
Bromine	kg	1,9508E-6
Bromine	kg	3,4918E-5
Cadmium	kg	1,9533E-8
Cadmium, ion	kg	6,1507E-6
Cadmium, ion	kg	6,8148E-9
Calcium	kg	1,4255E-5
Calcium, ion	kg	0,0015162
Calcium, ion	kg	3,2521E-5
Carbon	kg	0,001783
Carbon dioxide, fossil	kg	1,4192
Carbon dioxide, non-fossil	kg	0,59407
Carbon monoxide, fossil	kg	2,5464E-5
Carbon monoxide, non-fossil	kg	1,0659E-5
Chloride	kg	0,001533
Chloride	kg	0,010337
Chromium	kg	2,4197E-8
Chromium VI	kg	1,5142E-6
Chromium VI	kg	4,1718E-7
Chromium, ion	kg	3,5975E-9
Cobalt	kg	2,0471E-8
Cobalt	kg	9,8455E-6
Cobalt	kg	1,8522E-9
COD, Chemical Oxygen Demand	kg	0,0040937
COD, Chemical Oxygen Demand	kg	4,1997E-4
Copper	kg	1,2006E-8
Copper, ion	kg	1,3944E-4
Copper, ion	kg	1,1894E-8
Cyanide	kg	2,773E-5
Dinitrogen monoxide	kg	1,2907E-4
Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	kg	4,2498E-14
DOC, Dissolved Organic Carbon	kg	0,0016199
DOC, Dissolved Organic Carbon	kg	1,8318E-4
electricity from CSS	kWh	1
Fluoride	kg	7,1039E-6
Fluoride	kg	3,099E-6
Heat, waste	MJ	18,894
Heat, waste	MJ	4,7704
Hydrogen chloride	kg	6,9448E-6

Hydrogen fluoride	kg	7,1837E-8
Iodide	kg	5,36E-10
Iodine	kg	3,0525E-13
Iron	kg	3,6945E-9
Iron, ion	kg	0,001279
Iron, ion	kg	4,2998E-8
Lead	kg	1,5477E-8
Lead	kg	1,3977E-4
Lead	kg	1,293E-8
Magnesium	kg	5,7174E-7
Magnesium	kg	5,3472E-4
Magnesium	kg	4,218E-6
Manganese	kg	6,8898E-9
Manganese	kg	2,8602E-5
Manganese	kg	4,4062E-9
Mercury	kg	1,1549E-8
Mercury	kg	9,5277E-8
Mercury	kg	2,4294E-9
Methane, fossil	kg	2,247E-7
Methane, non-fossil	kg	9,4056E-8
Molybdenum	kg	1,4678E-9
Molybdenum	kg	8,6005E-7
Molybdenum	kg	1,8561E-7
Nickel	kg	1,5261E-8
Nickel, ion	kg	1,3863E-5
Nickel, ion	kg	9,2785E-9
Nitrate	kg	3,1039E-4
Nitrate	kg	1,1118E-4
Nitrogen oxides	kg	5,93E-4
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	kg	9,6709E-7
Particulates, < 2.5 um	kg	2,5371E-6
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	kg	1,2749E-8
Phenol, pentachloro-	kg	9,2542E-12
Phosphate	kg	6,263E-6
Phosphate	kg	1,0369E-7
Phosphorus	kg	7,077E-8
Potassium	kg	5,699E-6
Potassium, ion	kg	8,277E-4
Potassium, ion	kg	3,128E-4
Selenium	kg	8,9431E-9
Selenium	kg	5,7527E-7
Selenium	kg	1,4936E-7
Silicon	kg	4,1224E-9
Silicon	kg	1,5824E-4
Silicon	kg	5,5159E-7
Sodium	kg	4,9752E-6

Sodium, ion	kg	3,966E-4
Sodium, ion	kg	1,9942E-4
spent activated carbon with mercury	kg	2,1573E-4
Strontium	kg	3,1381E-9
Strontium	kg	3,1347E-5
Strontium	kg	2,0516E-8
Sulfate	kg	6,0769E-4
Sulfur dioxide	kg	1,5814E-5
Thallium	kg	1,4184E-10
Thallium	kg	1,0851E-7
Thallium	kg	1,0038E-10
Tin	kg	6,1219E-12
Tin, ion	kg	6,8663E-6
Tin, ion	kg	8,4822E-9
Titanium	kg	2,9418E-7
Titanium, ion	kg	1,0612E-4
Titanium, ion	kg	7,2188E-8
TOC, Total Organic Carbon	kg	0,0016199
TOC, Total Organic Carbon	kg	1,8318E-4
Toluene	kg	4,2501E-8
Vanadium	kg	2,1677E-6
Vanadium, ion	kg	3,0085E-5
Vanadium, ion	kg	1,1871E-7
waste cement, hydrated	kg	0,0073004
Waste in bioactive landfill	kg	0,04313
Water	m3	0
Water	m3	0
Zinc	kg	2,2265E-7
Zinc, ion	kg	1,6156E-4
Zinc, ion	kg	2,0661E-8

Tabella 41 Tabella di output dell'analisi di inventario condotta per il processo di incenerimento di 1 kg di CSS. Fonte: Elaborazione da "Updated location- and waste-specific life cycle inventories of waste treatment".

IV. Analisi di inventario delle emissioni associate alla produzione di 1 kWh attraverso la combustione del CSS.

Input - Flusso	U.M.	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2
ammonia, anhydrous, liquid	kg	0,0025	0,0013	0,0013
cationic resin	kg	0,0000	0,0000	0,0000
cement, unspecified	kg	0,0045	0,0023	0,0023
chemical, inorganic	kg	0,0003	0,0002	0,0002
chemical, organic	kg	0,0000	0,0000	0,0000
chromium oxide, flakes	kg	0,0000	0,0000	0,0000
CSS Scenario 0	kg	1,5422	0,7962	0,7962
heat, district or industrial, natural gas	MJ	0,4593	0,2371	0,2371
hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	kg	0,0004	0,0002	0,0002
hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state	kg	0,0007	0,0004	0,0004
iron (III) chloride, without water, in 40% solution state	kg	0,0000	0,0000	0,0000
municipal waste incineration facility	Item(s)	0,0000	0,0000	0,0000
Oxygen	kg	0,0000	0,0000	0,0000
process-specific burdens, residual material landfill	kg	0,0113	0,0058	0,0058
process-specific burdens, slag landfill	kg	0,0553	0,0285	0,0285
quicklime, milled, packed	kg	0,0096	0,0050	0,0050
residual material landfill	Item(s)	0,0000	0,0000	0,0000
slag landfill	Item(s)	0,0000	0,0000	0,0000
sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	kg	0,0029	0,0015	0,0015
titanium dioxide	kg	0,0002	0,0001	0,0001
transport, freight train	t*km	0,0209	0,0108	0,0108
transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4	kg*km	426,8810	17,6756	22,8509
transport, freight, lorry, unspecified	t*km	0,0141	0,0073	0,0073
Trattamento di 1 t di RSU indifferenziata in 1 anno	kg	1,5680	0,8474	0,8854
water, decarbonised	kg	3,9064	2,0168	2,0168

Tabella 42 Tabella di input dell'analisi di inventario condotta per il processo di produzione di 1 kWh di energia elettrica tramite combustione del CSS, per tutti gli scenari analizzati.

Output - Flusso	U.M.	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2
Aluminium	kg	1,91E-09	9,88E-10	9,88E-10
Aluminium	kg	1,90E-03	9,79E-04	9,79E-04
Aluminium	kg	1,54E-07	7,95E-08	7,95E-08
Ammonia	kg	2,89E-06	1,49E-06	1,49E-06
Antimony	kg	2,37E-11	1,22E-11	1,22E-11
Antimony	kg	1,21E-05	6,23E-06	6,23E-06
Antimony	kg	5,81E-06	3,00E-06	3,00E-06
Arsenic	kg	8,64E-09	4,46E-09	4,46E-09
Arsenic, ion	kg	6,72E-07	3,47E-07	3,47E-07
Arsenic, ion	kg	4,11E-07	2,12E-07	2,12E-07
Barium	kg	4,50E-07	2,32E-07	2,32E-07
Barium	kg	8,69E-05	4,49E-05	4,49E-05
Barium	kg	4,91E-08	2,54E-08	2,54E-08

Benzene	kg	3,28E-08	1,69E-08	1,69E-08
Benzene, hexachloro-	kg	6,85E-11	3,54E-11	3,54E-11
Benzene, pentachloro-	kg	1,73E-10	8,94E-11	8,94E-11
Benzo(a)pyrene	kg	7,29E-13	3,77E-13	3,77E-13
Beryllium	kg	2,57E-07	1,32E-07	1,32E-07
Beryllium	kg	1,70E-10	8,79E-11	8,79E-11
BOD5, Biological Oxygen Demand	kg	2,07E-03	1,07E-03	1,07E-03
BOD5, Biological Oxygen Demand	kg	6,34E-04	3,27E-04	3,27E-04
Boron	kg	2,84E-06	1,47E-06	1,47E-06
Boron	kg	3,56E-08	1,84E-08	1,84E-08
Bromine	kg	2,90E-08	1,50E-08	1,50E-08
Bromine	kg	3,01E-06	1,55E-06	1,55E-06
Bromine	kg	5,39E-05	2,78E-05	2,78E-05
Cadmium	kg	3,01E-08	1,56E-08	1,56E-08
Cadmium, ion	kg	9,49E-06	4,90E-06	4,90E-06
Cadmium, ion	kg	1,05E-08	5,43E-09	5,43E-09
Calcium	kg	2,20E-05	1,13E-05	1,13E-05
Calcium, ion	kg	2,34E-03	1,21E-03	1,21E-03
Calcium, ion	kg	5,02E-05	2,59E-05	2,59E-05
Carbon	kg	2,75E-03	1,42E-03	1,42E-03
Carbon dioxide, fossil	kg	2,19E+00	1,13E+00	1,13E+00
Carbon dioxide, non-fossil	kg	9,16E-01	4,73E-01	4,73E-01
Carbon monoxide, fossil	kg	3,93E-05	2,03E-05	2,03E-05
Carbon monoxide, non-fossil	kg	1,64E-05	8,49E-06	8,49E-06
Chloride	kg	2,36E-03	1,22E-03	1,22E-03
Chloride	kg	1,59E-02	8,23E-03	8,23E-03
Chromium	kg	3,73E-08	1,93E-08	1,93E-08
Chromium VI	kg	2,34E-06	1,21E-06	1,21E-06
Chromium VI	kg	6,43E-07	3,32E-07	3,32E-07
Chromium, ion	kg	5,55E-09	2,86E-09	2,86E-09
Cobalt	kg	3,16E-08	1,63E-08	1,63E-08
Cobalt	kg	1,52E-05	7,84E-06	7,84E-06
Cobalt	kg	2,86E-09	1,47E-09	1,47E-09
COD, Chemical Oxygen Demand	kg	6,31E-03	3,26E-03	3,26E-03
COD, Chemical Oxygen Demand	kg	6,48E-04	3,34E-04	3,34E-04
Copper	kg	1,85E-08	9,56E-09	9,56E-09
Copper, ion	kg	2,15E-04	1,11E-04	1,11E-04
Copper, ion	kg	1,83E-08	9,47E-09	9,47E-09
Cyanide	kg	4,28E-05	2,21E-05	2,21E-05
Dinitrogen monoxide	kg	1,99E-04	1,03E-04	1,03E-04
Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	kg	6,55E-14	3,38E-14	3,38E-14
DOC, Dissolved Organic Carbon	kg	2,50E-03	1,29E-03	1,29E-03
DOC, Dissolved Organic Carbon	kg	2,83E-04	1,46E-04	1,46E-04
electricity from CSS	kWh	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
Fluoride	kg	1,10E-05	5,66E-06	5,66E-06

Fluoride	kg	4,78E-06	2,47E-06	2,47E-06
Heat, waste	MJ	2,91E+01	1,50E+01	1,50E+01
Heat, waste	MJ	7,36E+00	3,80E+00	3,80E+00
Hydrogen chloride	kg	1,07E-05	5,53E-06	5,53E-06
Hydrogen fluoride	kg	1,11E-07	5,72E-08	5,72E-08
Iodide	kg	8,27E-10	4,27E-10	4,27E-10
Iodine	kg	4,71E-13	2,43E-13	2,43E-13
Iron	kg	5,70E-09	2,94E-09	2,94E-09
Iron, ion	kg	1,97E-03	1,02E-03	1,02E-03
Iron, ion	kg	6,63E-08	3,42E-08	3,42E-08
Lead	kg	2,39E-08	1,23E-08	1,23E-08
Lead	kg	2,16E-04	1,11E-04	1,11E-04
Lead	kg	1,99E-08	1,03E-08	1,03E-08
Magnesium	kg	8,82E-07	4,55E-07	4,55E-07
Magnesium	kg	8,25E-04	4,26E-04	4,26E-04
Magnesium	kg	6,50E-06	3,36E-06	3,36E-06
Manganese	kg	1,06E-08	5,49E-09	5,49E-09
Manganese	kg	4,41E-05	2,28E-05	2,28E-05
Manganese	kg	6,80E-09	3,51E-09	3,51E-09
Mercury	kg	1,78E-08	9,20E-09	9,20E-09
Mercury	kg	1,47E-07	7,59E-08	7,59E-08
Mercury	kg	3,75E-09	1,93E-09	1,93E-09
Methane, fossil	kg	3,47E-07	1,79E-07	1,79E-07
Methane, non-fossil	kg	1,45E-07	7,49E-08	7,49E-08
Molybdenum	kg	2,26E-09	1,17E-09	1,17E-09
Molybdenum	kg	1,33E-06	6,85E-07	6,85E-07
Molybdenum	kg	2,86E-07	1,48E-07	1,48E-07
Nickel	kg	2,35E-08	1,22E-08	1,22E-08
Nickel, ion	kg	2,14E-05	1,10E-05	1,10E-05
Nickel, ion	kg	1,43E-08	7,39E-09	7,39E-09
Nitrate	kg	4,79E-04	2,47E-04	2,47E-04
Nitrate	kg	1,71E-04	8,85E-05	8,85E-05
Nitrogen oxides	kg	9,15E-04	4,72E-04	4,72E-04
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	kg	1,49E-06	7,70E-07	7,70E-07
Particulates, < 2.5 um	kg	3,91E-06	2,02E-06	2,02E-06
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	kg	1,97E-08	1,02E-08	1,02E-08
Phenol, pentachloro-	kg	1,43E-11	7,37E-12	7,37E-12
Phosphate	kg	9,66E-06	4,99E-06	4,99E-06
Phosphate	kg	1,60E-07	8,26E-08	8,26E-08
Phosphorus	kg	1,09E-07	5,63E-08	5,63E-08
Potassium	kg	8,79E-06	4,54E-06	4,54E-06
Potassium, ion	kg	1,28E-03	6,59E-04	6,59E-04
Potassium, ion	kg	4,82E-04	2,49E-04	2,49E-04
Selenium	kg	1,38E-08	7,12E-09	7,12E-09
Selenium	kg	8,87E-07	4,58E-07	4,58E-07

Selenium	kg	2,30E-07	1,19E-07	1,19E-07
Silicon	kg	6,36E-09	3,28E-09	3,28E-09
Silicon	kg	2,44E-04	1,26E-04	1,26E-04
Silicon	kg	8,51E-07	4,39E-07	4,39E-07
Sodium	kg	7,67E-06	3,96E-06	3,96E-06
Sodium, ion	kg	6,12E-04	3,16E-04	3,16E-04
Sodium, ion	kg	3,08E-04	1,59E-04	1,59E-04
spent activated carbon with mercury	kg	3,33E-04	1,72E-04	1,72E-04
Strontium	kg	4,84E-09	2,50E-09	2,50E-09
Strontium	kg	4,83E-05	2,50E-05	2,50E-05
Strontium	kg	3,16E-08	1,63E-08	1,63E-08
Sulfate	kg	9,37E-04	4,84E-04	4,84E-04
Sulfur dioxide	kg	2,44E-05	1,26E-05	1,26E-05
Thallium	kg	2,19E-10	1,13E-10	1,13E-10
Thallium	kg	1,67E-07	8,64E-08	8,64E-08
Thallium	kg	1,55E-10	7,99E-11	7,99E-11
Tin	kg	9,44E-12	4,87E-12	4,87E-12
Tin, ion	kg	1,06E-05	5,47E-06	5,47E-06
Tin, ion	kg	1,31E-08	6,75E-09	6,75E-09
Titanium	kg	4,54E-07	2,34E-07	2,34E-07
Titanium, ion	kg	1,64E-04	8,45E-05	8,45E-05
Titanium, ion	kg	1,11E-07	5,75E-08	5,75E-08
TOC, Total Organic Carbon	kg	2,50E-03	1,29E-03	1,29E-03
TOC, Total Organic Carbon	kg	2,83E-04	1,46E-04	1,46E-04
Toluene	kg	6,55E-08	3,38E-08	3,38E-08
Vanadium	kg	3,34E-06	1,73E-06	1,73E-06
Vanadium, ion	kg	4,64E-05	2,40E-05	2,40E-05
Vanadium, ion	kg	1,83E-07	9,45E-08	9,45E-08
waste cement, hydrated	kg	1,13E-02	5,81E-03	5,81E-03
Waste in bioactive landfill	kg	6,65E-02	3,43E-02	3,43E-02
Water	m3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Water	m3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Zinc	kg	3,43E-07	1,77E-07	1,77E-07
Zinc, ion	kg	2,49E-04	1,29E-04	1,29E-04
Zinc, ion	kg	3,19E-08	1,65E-08	1,65E-08

Tabella 43 Tabella di output dell'analisi di inventario condotta per il processo di produzione di 1 kWh di energia elettrica tramite combustione del CSS, per tutti gli scenari analizzati.