

ANALISI DEL CICLO DI VITA AI SENSI DELLA ISO 14040 DEL CLORURO FERRICO E FERROSO DA RECUPERO ACIDI DI DECAPAGGIO



Redazione

Ecol Studio S.p.A.

Rachele Cerchi

Ilaria Minardi

Approvazione

Ageco Due S.p.A

Data di emissione: 07/03/2025

Revisione 00

Indice

1	Introduzione	5
2	La metodologia LCA (Life Cycle Assessment)	6
3	Scopo e campo di applicazione dello studio	12
3.1	Obiettivo dello studio	12
3.2	Caratteristiche del cloruro ferrico e cloruro ferroso	12
3.3	Unità funzionale	13
3.4	Confini del sistema	13
3.5	Descrizione del ciclo produttivo	14
3.5.1	Produzione di cloruro ferroso	14
3.5.2	Produzione di cloruro ferrico	15
3.6	Allocazione	16
3.7	Criteri di esclusione e <i>cut off</i>	16
3.8	Tipologia di dati e requisiti di qualità	16
3.9	Categorie di impatto	17
3.10	Assunzioni e limitazioni	21
4	Analisi dell'inventario	22
4.1	Modalità di raccolta dati	22
4.2	Soluzione di decappaggio e materie prime	22
4.3	Consumi energetici e di acqua	22
4.4	Rifiuti	23
4.5	Emissioni in atmosfera	24
4.6	Calcolo del mix energetico nazionale	24
4.7	Modellizzazione dei processi	27
5	Valutazione degli impatti	31
5.1	Cloruro ferrico	31
5.2	Cloruro ferroso	35
6	Analisi dell'incertezza	39
7	Conclusioni	44
8	Bibliografia - Sitografia	46

Indice delle Tabelle

Tabella 3.1 Cloruro ferrico: specifiche di prodotto	12
Tabella 3.2 Allocazione fisica: produzione di cloruro ferrico e ferroso per l'anno 2023	16
Tabella 3.3 Elenco dei dati primari e secondari utilizzati all'interno dello studio LCA	16
Tabella 3.4 Categorie d'impatto	20
Tabella 4.1 Anno 2023: rifiuti e materie prime in ingresso	22
Tabella 4.2 Consumi di energia elettrica per l'anno 2023	22
Tabella 4.3 Anno 2023: rifiuti prodotti	23
Tabella 4.4 Sintesi delle emissioni autorizzate implementate nello studio LCA	24
Tabella 4.5 Mix energetico 'Totale Supplier' italiano per l'anno 2023 – Dati AIB	25
Tabella 4.6 Mix energetico con percentuali di 'altre fonti rinnovabili' e 'altre fonti non rinnovabili' ridistribuite	25
Tabella 4.7 Composizione del mix energetico in Ecoinvent 3.10	26
Tabella 4.8 Processo di produzione del cloruro ferrico: dai di input, unità di misura, quantità rapportata all'unità funzionale e processo di Ecoinvent 3.10 selezionato.	28
Tabella 4.9 Processo di produzione del cloruro ferroso: dai di input, unità di misura, quantità rapportata all'unità funzionale e processo di Ecoinvent 3.10 selezionato.	29
Tabella 5.1 Cloruro Ferrico. Emissioni in aria: kg emessi dei composti rilasciati in maggiore quantità	31
Tabella 5.2 Produzione di cloruro ferrico: indicatori di impatto riferiti all'Unità Funzionale (U.F.: 1 kg di cloruro ferrico)	32
Tabella 5.3 Cloruro Ferrico: individuazione delle Categorie di Impatto più critiche	32
Tabella 5.4 Cloruro ferroso: emissioni in aria: kg emessi dei composti rilasciati in maggiore quantità	35
Tabella 5.5 Produzione di cloruro ferroso: indicatori di impatto riferiti all'Unità Funzionale (U.F.: 1 kg di cloruro ferroso)	36
Tabella 6.1 Fattori di incertezza per calcolo deviazione standard (Frischknecht Jungbluth 2004)	39
Tabella 6.2 Valori assegnati ai criteri di incertezza – Processo di produzione di cloruro ferrico	40
Tabella 6.3 Valori assegnati ai criteri di incertezza – Processo di produzione del cloruro ferroso	40
Tabella 6.4 Risultati della simulazione Monte Carlo	41

Indice delle Figure

Figura 2.1 Fasi della metodologia LCA	6
Figura 3.1 Confini di sistema	13
Figura 3.2 Flowchart di processo per la produzione di cloruro ferroso	14
Figura 3.3 Flowchart di processo per la produzione di cloruro ferroso	15
Figura 4.1 Quadro riassuntivo delle emissioni e dei limiti ai sensi del D.Lgs 152/2006.	24
Figura 5.1 Cloruro Ferrico. Categorie d'impatto normalizzate e ponderate secondo il metodo EF (UE)	33
Figura 5.2 Contributo al valore di carbon footprint del cloruro ferrico.	34
Figura 5.3 Carbon Footprint: confronto tra i risultati di questo studio ed il database Ecoinvent 3.10.	35
Figura 5.4 Cloruro ferroso: categorie d'impatto normalizzate e ponderate secondo il metodo EF (UE)	37
Figura 5.5 Contributo al valore di carbon footprint del cloruro ferroso.	37
Figura 5.6 Cloruro ferroso. Carbon Footprint: confronto tra i risultati di questo studio ed il database Ecoinvent 3.10.	38
Figura 6.1 Analisi Monte Carlo: grafico raffigurante i valori compresi in un range accettabile e quelli identificati come outlier, a sinistra il cloruro ferrico e a destra il cloruro ferroso.	42
Figura 6.2 Analisi Monte Carlo: istogramma dei risultati ottenuti, a sinistra il cloruro ferrico e a destra il cloruro ferroso.	43

1 Introduzione

Il presente documento costituisce lo studio del ciclo di vita (Life Cycle Assessment LCA) del cloruro ferrico e del cloruro ferroso prodotto da soluzione esausta di decappaggio presso l'impianto Ageco Due spa, in modo da identificare gli impatti di entrambi i processi lungo tutta la catena del valore.

Lo studio è stato commissionato da Ageco Due spa ad Ecol Studio S.p.A. ed è stato svolto secondo i principi e i requisiti dei seguenti Standard internazionali:

- **UNI EN ISO 14040:2021** Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Principi e quadro di riferimento;
- **UN EN ISO 14044:2021** Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida;
- **UNI EN ISO 14067:2018** Greenhouse gases – carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification.

Nei paragrafi successivi sono descritti nel dettaglio:

- le metodologie di valutazione del ciclo di vita e degli impatti ambientali, tra cui la metodologia PEF;
- lo scopo ed il campo di applicazione dello studio;
- la redazione e l'analisi dell'inventario;
- la valutazione degli impatti
- l'interpretazione dei risultati.

Lo studio è stato sviluppato implementando i dati relativi al processo di produzione di cloruro ferrico e ferroso raccolti per l'anno 2023 all'interno del software OpenLCA 2.2.0 che utilizza il database Ecoinvent più aggiornato, ovvero la versione 3.10.

2 La metodologia LCA (Life Cycle Assessment)

Nell'attuale contesto di produzione e consumo orientato ad una maggiore attenzione all'ambiente e al concetto di sostenibilità, la disponibilità di informazioni accurate e affidabili relative agli impatti ambientali di prodotti ed organizzazioni è essenziale per supportare decisioni consapevoli sia da parte delle aziende che dei consumatori. È necessario quindi adottare una prospettiva sistemica e in questo contesto il pensiero del Life Cycle Assessment (LCA) offre una base metodologica solida e flessibile, consentendo un'analisi completa degli impatti ambientali associati ad un prodotto, processo o servizio lungo tutto il suo ciclo di vita. Il metodo LCA permette di avere una visione olistica delle possibili implicazioni legate alle decisioni, tenendo conto di ogni fase coinvolta.

La metodologia dell'LCA si distingue per le seguenti caratteristiche molto specifiche:

- focus sul ciclo di vita: vengono considerate tutte le fasi del ciclo di vita di prodotti e servizi, dall'estrazione delle materie prime, alla lavorazione e produzione, alla distribuzione, all'uso e al fine vita;
- analisi multi-criteriale: nell'analisi vengono incluse più categorie di impatto ambientale;
- metodologia quantitativa: gli indicatori che esprimono le categorie di impatto ambientale sono quantitativi e basati su modelli matematici che descrivono le relazioni causa-effetto;
- approccio comparativo: l'LCA è progettata anche per consentire la scelta dell'opzione migliore tra due o più scenari, data soprattutto la sua natura quantitativa.
- estensione globale: l'analisi può adattarsi a sistemi estesi dalla scala locale a quella globale, catturandone le peculiarità in relazione alla variabilità spaziale.

L'LCA fornisce un quadro metodologico ben definito, che include diverse fasi, quali: la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione, la raccolta di dati per l'inventario, la valutazione degli impatti e l'interpretazione dei risultati.

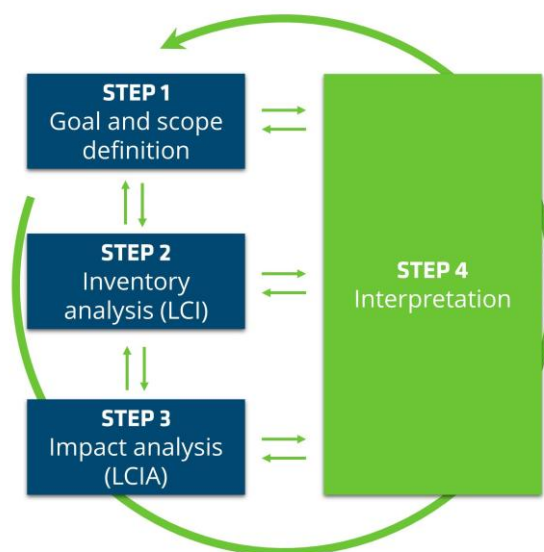


Figura 2.1 Fasi della metodologia LCA

Questa metodologia è standardizzata dalle normative UNI EN ISO 14040:2021 e UNI EN ISO 14044:2021, entrambe parte della famiglia delle UNI EN ISO 14000, che descrivono principi, quadro di riferimento, requisiti e linee guida di uno studio LCA. Altri standard di gestione ambientale sono collegati alle UNI EN ISO 14040-44, come la UNI EN ISO 14064:2019 per la valutazione dell'impronta di carbonio delle organizzazioni e la UNI EN ISO 14067:2018 per l'impronta di carbonio dei prodotti.

Seguendo l'approccio LCA, l'Unione Europea, nello specifico la Direzione Generale per l'Ambiente (DG Environment) con il supporto scientifico del Joint Research Centre (JRC), ha sviluppato la metodologia dell'Environmental Footprint (EF).

L'EF fornisce indicazioni precise, pratiche e armonizzate inerenti alla modellazione, al calcolo e alla rendicontazione degli impatti ambientali del ciclo di vita di prodotti (Product Environmental Footprint – PEF) e organizzazioni (Organisation Environmental Footprint – OEF).

Nello specifico la metodologia Product Environmental Footprint (PEF), adottata all'interno di questo studio, fornisce un quadro metodologico standardizzato per la valutazione del ciclo di vita di un prodotto, inclusi beni e servizi; tale metodo si concentra sulla riduzione degli impatti lungo tutta la catena di fornitura dei prodotti, dall'estrazione delle materie prime alla gestione dei rifiuti. Fornisce requisiti specifici per la modellazione dei flussi materiali, delle emissioni e dei flussi dei rifiuti, consentendo una comprensione e una gestione approfondite degli impatti ambientali.

Di seguito si riportano le fasi fondamentali per lo sviluppo della PEF ed il riferimento delle stesse all'interno di questo documento.

È necessario partire definendo:

- **obiettivi e campo di applicazione dello studio** (Capitolo 3.1): è importante identificare le applicazioni previste e il grado di profondità analitica e rigore dello studio. La definizione dell'obiettivo secondo la metodologia PEF deve includere l'individuazione dei motivi per cui viene eseguito lo studio, il destinatario, il commissario e l'identità del verificatore;
- **confini del sistema di riferimento** (Capitolo 3.4): definiscono quali parti del ciclo di vita del prodotto e quali fasi e processi del ciclo di vita associati appartengono al sistema analizzato, ossia quali sono necessari per svolgere la sua funzione come definito dall'unità funzionale. I confini del sistema devono essere definiti seguendo una logica generale della catena di fornitura, includendo tutte le fasi dall'acquisizione delle materie prime e dalla preelaborazione, alla produzione del prodotto principale, alla distribuzione e allo stoccaggio del prodotto, alla fase di utilizzo e al trattamento di fine vita del prodotto, se necessario. I co-prodotti, i sottoprodotti e i flussi di rifiuti di almeno il sistema in primo piano devono essere chiaramente identificati. In generale viene anche elaborato un diagramma dei confini del sistema (o diagramma di flusso) che rappresenta uno schema del sistema analizzato. Deve indicare chiaramente le attività o i processi inclusi e quelli esclusi dall'analisi;
- **unità funzionale** (Capitolo 3.3): è la prestazione quantificata di un sistema di prodotto, da utilizzare come unità di riferimento rispetto alla quale vado a riferire tutti gli input e gli output del processo e di conseguenza anche gli impatti ambientali che si ottengono. È quindi una

misura quantitativa che definisce la funzione del sistema in esame e rappresenta la base per i calcoli ed eventualmente il confronto tra diversi prodotti o sistemi; serve, quindi, a standardizzare la valutazione del ciclo di vita. L'unità funzionale secondo la metodologia del PEF è definita secondo gli aspetti del 'cosa?' (la funzione o il servizio fornito), 'quanto?' (l'estensione della funzione o del servizio), 'quanto bene?' (il livello di qualità previsto) e 'quanto a lungo?' (la durata di vita del prodotto);

La fase successiva prevede **la raccolta dati e un inventario (LCI, Life Cycle Inventory)** di tutti i flussi di input e output, elementari (risorse, emissioni) e non elementari (energia, rifiuti, materiali) che deve essere effettuato per tutti i processi inclusi nella catena del valore (Capitolo 4). Tutti i flussi devono essere modellati fino al livello di flusso elementare per calcolare l'impatto associato sul ciclo di vita del prodotto.

Le fasi obbligatorie da considerare nell'acquisizione dei dati ed incluse in uno studio PEF sono:

- acquisizione e preelaborazione delle materie prime: ad esempio, estrazione delle risorse, preelaborazione di tutti i materiali (inclusi i materiali riciclati), agricoltura, silvicoltura, produzione di imballaggi e trasporto associati a queste attività;
- produzione: tutti i processi che si svolgono all'interno dei confini del sistema, precedentemente definiti (ad esempio, lavorazione chimica, produzione, assemblaggio);
- distribuzione: trasporto e stoccaggio del/i prodotto/i finito/i, inclusi i consumi delle attività di refrigerazione e magazzino;
- fase di utilizzo: utilizzo del/i prodotto/i per la funzione e la durata definite, inclusi tutti gli input necessari (ad esempio, energia, materiali di manutenzione, refrigerante);
- fine vita: tutte le attività che si verificano dal momento in cui il/i prodotto/i cessano di svolgere la propria funzione e vengono smaltiti o riciclati. Ciò include ad esempio, raccolta e trasporto, smantellamento, smistamento, trasformazione in materiale riciclato, discarica, incenerimento.

I dati che vengono raccolti durante questa fase possono essere di due tipologie:

- dati primari: quelli che vengono forniti e raccolti direttamente dall'azienda e risultano quindi specifici del sito. Il metodo PEF fornisce una matrice dei bisogni per valutare i requisiti dei dati di tutti i processi modellati nel sistema, in base al livello di influenza che l'azienda ha sul processo;
- dati secondari: sono ottenuti da database o da letteratura specifici del settore e sono utilizzati per modellare processi inclusi nei confini del sistema per i quali i dati primari non risultano disponibili.

Durante la fase di raccolta dati e valutazione dei flussi di input e output, è necessario valutare secondo la metodologia LCA l'eventuale multifunzionalità del sistema in esame, e quindi la presenza di coprodotti. L'allocazione è l'approccio che viene utilizzato per trattare la multifunzionalità; secondo la normativa UNI EN ISO 14040:2021, essa si riferisce alla "suddivisione

dei flussi di input o output di un processo o di un sistema di prodotto tra il sistema di prodotto in esame e uno o più altri sistemi di prodotto”.

Segue la fase di **valutazione degli impatti ambientali** (Capitolo 5), i quali vengono valutati attraverso degli indicatori che sono espressione delle varie categorie di impatto. Infatti, lo scopo della valutazione dell'impatto del ciclo di vita di un prodotto è raggruppare e aggregare le informazioni raccolte durante la fase di costruzione dell'inventario e valutare i rispettivi contributi per ciascuna categoria d'impatto. I passaggi risultano essere: classificazione, caratterizzazione, normalizzazione e ponderazione; i risultati di uno studio che segue la PEF devono, perciò, essere calcolati come classificati, caratterizzati, normalizzati e ponderati per ciascuna categoria di impatto.

Al fine di garantire una valutazione completa del ciclo di vita del prodotto, vengono affrontate 16 categorie d'impatto, aggiornate periodicamente per incorporare le più recenti conoscenze scientifiche. Tali aggiornamenti sono supportati dalle discussioni all'interno dei gruppi della Commissione Europea. Le categorie d'impatto analizzate secondo la metodologia PEF sono riportate nel Capitolo 3.9.

La prima fase della valutazione degli impatti è la *classificazione*; essa richiede l'assegnazione degli input/output di materia/energia, che sono stati oggetto della fase di inventario, alla categoria d'impatto pertinente. Ad esempio, tutti gli input/output che determinano l'emissione di gas serra vengono assegnati alla relativa categoria di impatto del cambiamento climatico; analogamente quelli che determinano emissioni di sostanze che impoveriscono l'ozono vengono classificati nella categoria di riduzione dello strato di ozono. Generalmente, un input/output può contribuire, e quindi essere assegnato, a più categorie d'impatto.

Affinché la classificazione sia completa è importante che tutti gli input e gli output, inventariati durante la fase di raccolta dati, siano assegnati alle categorie di impatto a cui contribuiscono.

Successivamente è necessaria la fase di *caratterizzazione*, la quale si riferisce al calcolo dell'entità del contributo di ogni input e output, classificati nelle rispettive categorie di impatto, e all'aggregazione dei vari contributi all'interno di ciascuna categoria. Ciò viene effettuato moltiplicando i valori nell'LCI per il fattore di caratterizzazione pertinente per ciascuna categoria di impatto e specifico per sostanza o risorsa. I fattori di caratterizzazione rappresentano l'intensità di impatto di una sostanza rispetto a una sostanza di riferimento comune per una categoria di impatto, definita indicatore di categoria di impatto. Ad esempio, nel caso del calcolo degli impatti associati alla categoria del cambiamento climatico, tutte le emissioni di gas serra inventariate nell'LCI vengono ponderate in termini di intensità di impatto rispetto all'anidride carbonica, che è la sostanza di riferimento per questa categoria. Ciò consente l'aggregazione dei potenziali di impatto e l'espressione in termini di una singola sostanza equivalente (in questo caso, equivalenti di CO₂) per ciascuna categoria di impatto. A tutti gli input e output, classificati in ciascuna categoria di impatto dell'impronta ambientale, devono essere assegnati fattori di caratterizzazione che rappresentano il contributo per unità di input o output alla categoria, utilizzando i fattori di caratterizzazione stessi forniti. I risultati della valutazione dell'impatto dell'impronta ambientale devono essere successivamente calcolati per ciascuna categoria di impatto dell'impronta ambientale stessa, moltiplicando la quantità di ciascun input/output per il suo fattore di

caratterizzazione e sommando i contributi di tutti gli input/output all'interno di ciascuna categoria per ottenere una singola misura, espressa nelle unità di riferimento appropriate.

La valutazione degli impatti ambientali risulta completata con le fasi di normalizzazione e ponderazione.

La *normalizzazione* è la fase in cui i risultati della valutazione dell'impatto del ciclo di vita, e ottenuti dopo la caratterizzazione, vengono moltiplicati per i fattori di normalizzazione, relativi a ciascuna categoria d'impatto, per calcolare e confrontare l'entità dei loro contributi alle categorie d'impatto rispetto ad un'unità di riferimento e per dar loro un significato relativo. Di conseguenza si ottengono dei risultati normalizzati e adimensionali, che riflettono gli oneri attribuibili ad un prodotto rispetto all'unità di riferimento. All'interno della metodologia PEF, i fattori di normalizzazione sono espressi pro capite in base ad un valore globale. Tuttavia, i risultati normalizzati dell'impronta ambientale non indicano la gravità o la rilevanza dei rispettivi impatti.

Nella fase di *ponderazione* i risultati normalizzati vengono moltiplicati per un set di fattori ponderati ed espressi in percentuale, che riflettono l'importanza relativa percepita delle categorie di impatto del ciclo di vita considerate. Di conseguenza, i risultati ponderati di diverse categorie d'impatto possono essere confrontati, così da poterne valutare l'importanza relativa. Possono anche essere aggregati tra le diverse categorie d'impatto del ciclo di vita per ottenere un singolo punteggio complessivo.

In conclusione, si ha la fase finale di ***interpretazione dei risultati***. Questo step ha due scopi principali:

- garantire che le prestazioni della metodologia PEF corrispondano agli obiettivi e ai requisiti di qualità dello studio;
- ricavare conclusioni e raccomandazioni solide all'analisi, a supporto, ad esempio, dei miglioramenti ambientali.

Per svolgere una completa interpretazione dei risultati è necessario valutare preliminarmente la robustezza del metodo PEF, ossia verificare la misura in cui le scelte metodologiche, come il confine del sistema, le fonti dei dati e le scelte di allocazione, influenzano i risultati analitici.

Gli strumenti che dovrebbero essere utilizzati per valutare la robustezza del metodo PEF includono:

- controlli di completezza: valutare i dati dell'inventario del ciclo di vita per garantire che siano completi rispetto agli obiettivi definiti, all'ambito, al confine del sistema e ai criteri di qualità. Ciò include la completezza della copertura del processo (vale a dire che sono stati inclusi tutti i processi in ogni fase della catena di fornitura considerata) e la copertura di input/output (ovvero che sono stati inclusi tutti gli input e le emissioni di materia o energia associati a ciascun processo);
- controlli di sensibilità: valutare la misura in cui i risultati sono determinati da specifiche scelte metodologiche e l'impatto dell'implementazione di scelte alternative laddove queste siano identificabili. È utile strutturare i controlli di sensibilità per ogni fase dello studio PEF, inclusa la definizione di obiettivo e ambito, l'inventario del ciclo di vita e la valutazione degli impatti;

- controlli di consistenza: valutare la misura in cui ipotesi, metodi e considerazioni sulla qualità dei dati sono stati applicati in modo coerente durante lo studio PEF.

Successivamente, una volta che l'utente del metodo PEF si assicura che il modello sia robusto e conforme a tutti gli aspetti definiti nelle fasi di definizione dell'obiettivo e dell'ambito, devono essere identificati i principali elementi che contribuiscono ai risultati, ossia quelli che vengono definiti 'hotspot'.

In particolare, si procede andando ad individuare quanto segue:

- l'hotspot relativo alle categorie d'impatto;
- l'hotspot relativo alle fasi del ciclo di vita;
- l'hotspot relativo ai processi;
- l'hotspot relativo ai flussi elementari.

Per individuare l'hotspot relativo alle categorie d'impatto è necessario basarsi sui risultati normalizzati e ponderati; le categorie d'impatto più rilevanti devono essere identificate come tutte quelle categorie di impatto che contribuiscono cumulativamente ad almeno l'80% dell'impatto ambientale totale. Inoltre, devono essere almeno tre le categorie d'impatto identificate come le più rilevanti.

Analogamente, anche le fasi del ciclo di vita più rilevanti sono quelle che insieme contribuiscono almeno all'80% di una qualsiasi delle categorie d'impatto più rilevanti. In particolare, se la fase di utilizzo rappresenta più del 50% dell'impatto totale, la procedura di valutazione delle fasi più rilevanti verrà eseguita nuovamente, escludendo però la fase stessa di utilizzo.

Inoltre, ogni categoria d'impatto più rilevante deve essere ulteriormente esaminata identificando i processi più rilevanti utilizzati per modellare il prodotto in quel determinato ambito. Anche in questo caso i processi più rilevanti sono quelli che contribuiscono collettivamente ad almeno l'80% di una qualsiasi delle categorie d'impatto più rilevanti. Processi identici che si svolgono in fasi diverse del ciclo di vita devono essere contabilizzati separatamente, mentre quelli identici che si svolgono nella stessa fase del ciclo di vita devono essere considerati insieme.

Infine, i flussi elementari più rilevanti sono, analogamente a quanto visto fino ad ora, quei flussi che contribuiscono cumulativamente almeno all'80% dell'impatto totale per ogni processo più rilevante; questa analisi deve essere ripetuta e riportata separatamente per ogni categoria d'impatto più rilevante.

3 Scopo e campo di applicazione dello studio

3.1 Obiettivo dello studio

Lo scopo dello studio è quello di definire l'impatto ambientale associato alla produzione di cloruro ferrico e ferroso dal recupero di "acidi esausti da decappaggio".

L'analisi si concentrerà sulla quantificazione degli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita di entrambi i prodotti, considerando sia le fasi di produzione che le attività a monte (upstream) e a valle (downstream) del processo.

Per garantire un'analisi dettagliata e accurata, i processi di produzione del cloruro ferrico e ferroso verranno esaminati separatamente. Questo approccio permetterà di identificare le specifiche fonti di impatto associate a ciascun prodotto, evidenziando le differenze nei flussi di materia ed energia e fornendo informazioni utili per ottimizzare la sostenibilità del processo produttivo.

I risultati dello studio forniranno un quadro chiaro dell'impatto ambientale del recupero degli acidi esausti per la produzione di cloruri di ferro, supportando così strategie di miglioramento del processo e promuovendo un'economia circolare più efficiente e sostenibile.

3.2 Caratteristiche del cloruro ferrico e cloruro ferroso

La soluzione di cloruro ferrico è un coagulante allo stato liquido basato sullo ione di ferro trivalente (Fe^{3+}) che trova impiego nelle seguenti applicazioni: condizionamento fanghi, controllo dei solfati o struvite e trattamento dei reflui industriali in genere. Il cloruro ferroso è una soluzione ad alta concentrazione che agisce come coagulante e viene anch'esso impiegata nel trattamento delle acque reflue.

Entrambi i prodotti sono quindi destinati alla depurazione delle acque sia civili che industriali, utilizzati come coagulanti chimici che, attraverso un processo di neutralizzazione della carica idrostatica delle particelle contenute negli scarichi, ne consentono l'avvicinamento e la successiva formazione di fiocchi che vengono separati per gravità in idonei sedimentatori.

Di seguito si riporta la descrizione tecnica di entrambi i prodotti secondo le specifiche comunicata da Ageco Due spa (

Tabella 3.1).

Tabella 3.1 Cloruro ferrico: specifiche di prodotto

	Cloruro ferrico	Cloruro ferroso
Codice prodotto	0001	0003
Aspetto	Liquido bruno	Liquido bruno - verde
Ferro (Fe_{tot})	12.4 ± 0.3 [%]	
Ferro (Fe^{2+})	< 0.5 [%]	10 ± 0.5 [%]
FeCl_3	$35 - 37$ [%]	
FeCl_2		22.7 ± 1.1 [%]
Acidità libera (HCl)	0.5 [%]	< 0.5 [%]
Densità	1.42 ± 0.04 [g/cm ³]	1.24 ± 0.04 [g/cm ³]

3.3 Unità funzionale

L'unità funzionale, ovvero l'unità di riferimento di questo studio per il calcolo degli indicatori ambientali, è la produzione 1 kg di cloruro ferrico ed 1 Kg di cloruro ferroso presso l'impianto Ageco Due spa di Salanetti (Capannori) ed il trasporto al cliente finale.

3.4 Confini del 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.

Il presente studio prende in considerazione le fasi *upstream*, *core* e *downstream* del processo di produzione del cloruro ferrico e del cloruro ferroso, considerando l'impatto dovuto alla produzione ed al trasporto al cliente. L'anno di riferimento dello studio è il 2023, in cui sono state prodotte 7742 tonnellate di cloruro ferrico e 3590 tonnellate di cloruro ferroso.

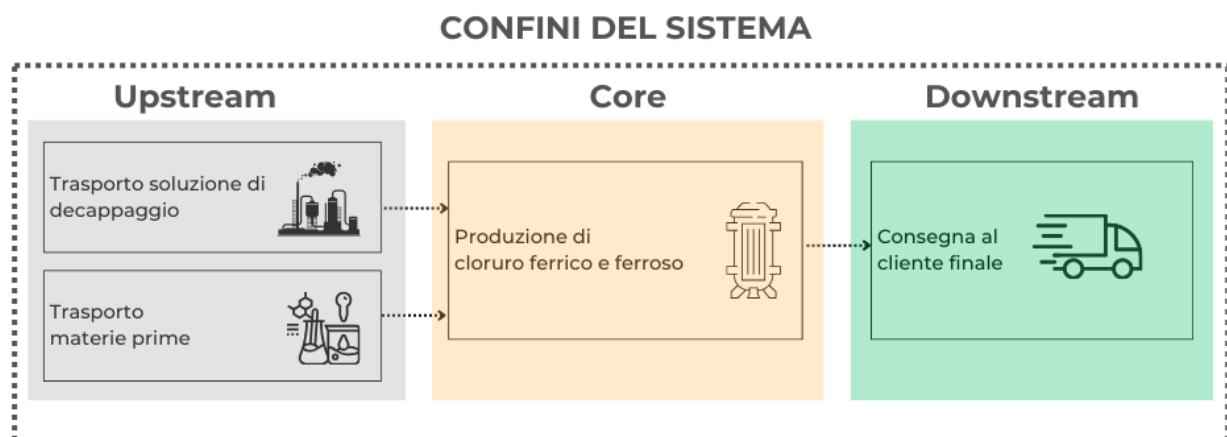


Figura 3.1 Confini di sistema

Per la fase upstream è stata considerata la produzione delle materie prime necessarie per il processo produttivo ed il trasporto presso l'impianto di Salanetti, così come il trasporto del rifiuto (CER 110105). La fase core del processo consiste nella produzione di cloruro ferrico e ferroso. La fase downstream è stato considerato il trasporto al cliente, non si è quindi tenuto conto del fine del prodotto.

Si ricorda inoltre che, trattandosi di un impianto di trattamento di rifiuti, il carico ambientale dei rifiuti in ingresso al processo è stato considerato nullo adottando 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 et al., 2012).

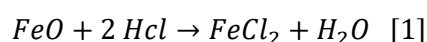
3.5 Descrizione del ciclo produttivo

3.5.1 Produzione di cloruro ferroso

Il processo di trattamento per la produzione del cloruro ferroso è un processo esotermico di tipo discontinuo (carico – reazione – scarico), viene condotto nei reattori R1 o R4 con temperatura di reazione compresa tra 70 / 100°C.

La prima operazione consiste nel carico del reattore, prelevando l'acido esausto, che entra come rifiuto (CER 110105) da uno dei serbatoi di deposito, successivamente tramite condotte si introduce la scaglia di laminazione.

La reazione [1] si innesca con la prima quantità di ossido e progredisce con le successive, giungendo a completamento dopo circa 2 ore con temperature comprese tra 70 / 100°C.



I reattori di trattamento sono tenuti sotto aspirazione, a valle è installato l'impianto di trattamento emissioni realizzato con scrubber di lavaggio con soluzione di NaOH al 5%.

Il prodotto finito, ovvero il cloruro ferroso, viene trasferito dai reattori di trattamento con pompe di trasferimento e condotte aeree, nei serbatoi di deposito. Dai serbatoi di stoccaggio il cloruro ferroso viene trasferito con pompe e via tubazioni aeree nelle autobotti predisposte per la consegna ai clienti. I reattori di trattamento vengono lavati per allontanare il "non reagito" (0,17% sul prodotto finito) con frequenza mensile, raccogliendo sul fondo del bacino di contenimento il residuo del lavaggio.

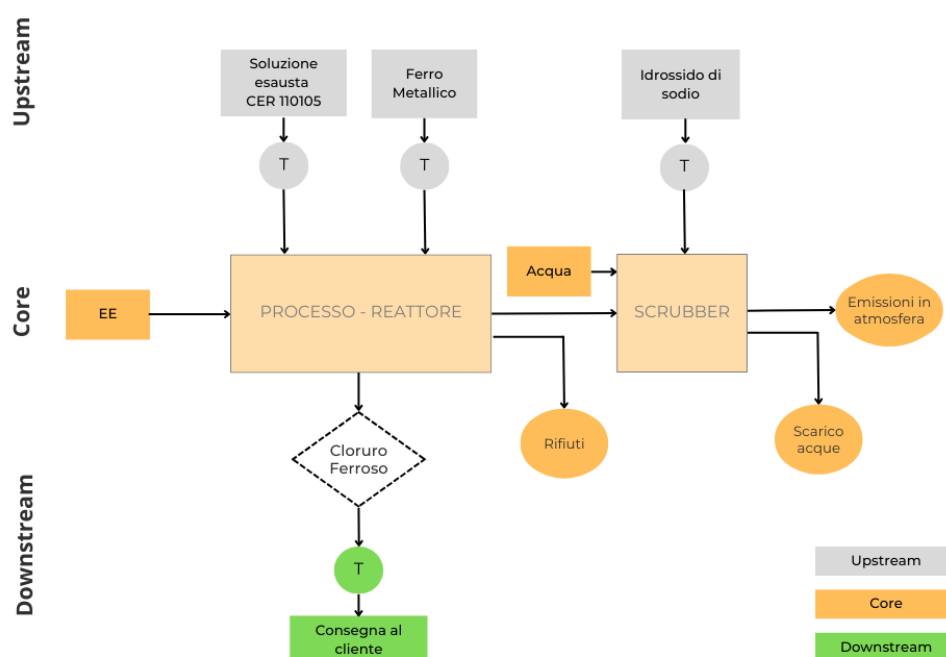


Figura 3.2 Flowchart di processo per la produzione di cloruro ferroso

In Figura 3.2 è schematizzato il processo produttivo del cloruro ferroso suddiviso per fasi upstream, core e downstream, all'interno del diagramma è schematizzato anche il contributo del trasporto.

3.5.2 Produzione di cloruro ferrico

La produzione del cloruro ferrico viene effettuata nei reattori R1 e R4 in due fasi di lavorazione, la prima ha carattere discontinuo, la seconda ha carattere semicontinuo. La fase ossidativa consiste nell'esaurimento dell'acidità residua presente nell'esausto cloridrico finalizzato alla produzione di cloruro ferrico secondo la reazione [2]



L'esausto cloridrico viene prelevato da uno dei serbatoi di deposito e a mezzo elettropompa e via condotta aerea viene caricato nel reattore di trattamento, se necessario aggiunto acido cloridrico prelevato dal deposito e sempre con elettropompa via tubazioni aeree viene immesso nel reattore. Successivamente viene introdotto manualmente la quantità necessaria di ossidante in rapporto stechiometrico con il ferro presente, la reazione è debolmente esotermica e si conclude rapidamente. La seconda fase operativa prevede la concentrazione per evaporazione del semilavorato cloruro ferrico secondo le seguenti operazioni:

1. Carico del prodotto semilavorato nell'evaporatore
2. Riscaldamento a 75 – 80 °C effettuato in due scambiatori di calore
3. Fase di evaporazione e condensazione del cloruro ferrico
4. Stoccaggio.

Il processo sopra descritto è schematizzato nel flow chart di Figura 3.3.

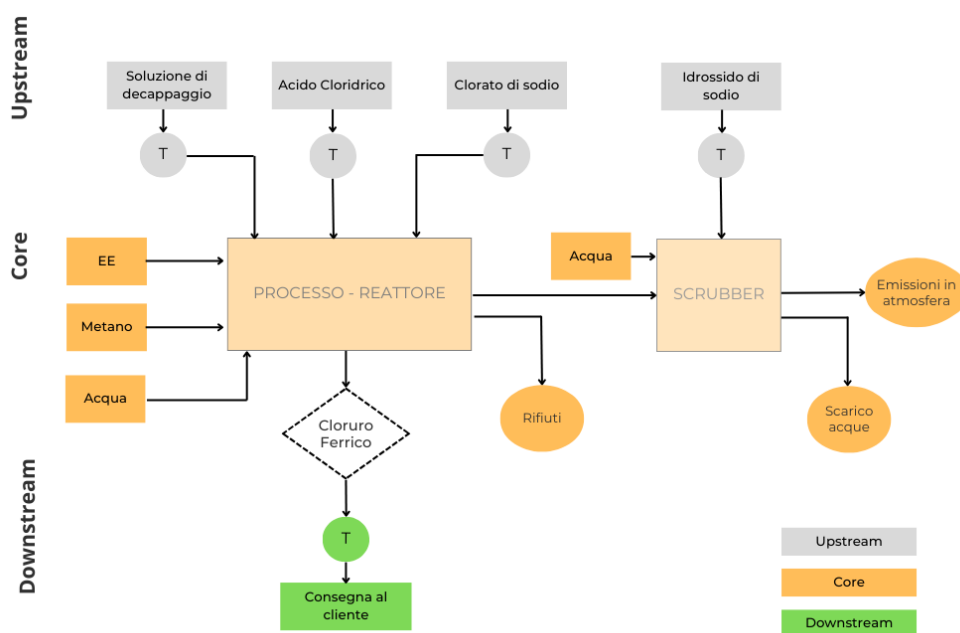


Figura 3.3 Flowchart di processo per la produzione di cloruro ferroso

3.6 Allocazione

Per allocazione s'intende la "ripartizione dei flussi in ingresso o in uscita di un processo tra il sistema di prodotto allo studio o uno e diversi altri sistemi di prodotto (coprodotti)". Nel caso di Ageco Due spa è stata necessaria effettuare un'allocazione fisica per quanto concerne i consumi di energia elettrica ed i consumi di acqua. Tali consumi sono stati quindi allocati al cloruro ferrico o ferroso secondo la % del prodotto nell'anno 2023 sul totale della produzione, intesa come quantità di ferrico e ferroso

Tabella 3.2 Allocazione fisica: produzione di cloruro ferrico e ferroso per l'anno 2023

Prodotto	kg	%
Cloruro ferroso	3 590 280	31.68%
Cloruro ferrico	7 742 830	68.32%

3.7 Criteri di esclusione e cut off

All'interno dell'analisi LCA non sono state applicate procedure di *Cut Off* relativamente alla quantificazione degli elementi in ingresso per i quali è stato possibile raccogliere le informazioni necessarie (dati primari), ovvero le quantità in input al processo. Non sono state pertanto applicate esclusioni.

3.8 Tipologia di dati e requisiti di qualità

All'interno del presente studio sono stati utilizzati prioritariamente dati primari, ovvero ottenuti da misurazioni dirette o stime effettuate da dati rilevati; laddove questo non fosse possibile si è fatto ricorso al database Ecoinvent 3.10.

I dati primari utilizzati all'interno di questo studio si riferiscono all'anno 2023.

In Tabella 3.3 si riporta un elenco della tipologia dei dati utilizzati mentre per il dettaglio dei quantitativi in ingresso e dei processi di Ecoinvent selezionati si rimanda al Capitolo 4.

Tabella 3.3 Elenco dei dati primari e secondari utilizzati all'interno dello studio LCA

Dati primari (Raccolti tramite scheda – questionario)	Dati secondari (Database Ecoinvent 3.10)
Trasporto dei rifiuti in ingresso all'impianto	Processi di estrazione e lavorazione delle materie prime
Trasporto di materie prime in ingresso all'impianto	Processi di combustione dei mezzi di trasporto delle materie prime, dei rifiuti, dei prodotti
Consumi elettrici	Stima del mix energetico <i>Location based</i> modificato secondo i dati forniti da AIB per l'anno 2023
Consumi di gas	Processi di smaltimento dei rifiuti
Consumi di acqua	
Produzione di rifiuti	
Scarichi idrici	
Emissioni in atmosfera	

Dati primari (Raccolti tramite scheda – questionario)	Dati secondari (Database Ecoinvent 3.10)
Trasporto rifiuti a smaltimento	
Trasporto prodotto al cliente finale	

I dati sopra elencati rispettano i seguenti requisiti di qualità:

- **Copertura temporale:** i dati primari riportati in questo studio sono riferiti all'anno 2023 e si intendono relativi al periodo gennaio – dicembre.
- **Copertura geografica:** i dati primari si riferiscono all'impianto di produzione di cloruro ferrico e ferroso di Ageco Due spa situato in via dei Salinetti, Lunata. I processi del database Ecoinvent 3.10 relativi alle materie prime utilizzate sono stati selezionati previa analisi del luogo di provenienza, andando a selezionare quelli relativi alle zone geografiche più idonee.
- **Copertura tecnologica:** i dati raccolti fanno riferimento alle tecnologie attualmente utilizzate per la produzione delle materie prime.
- **Precisione:** i dati primari fanno riferimento ai consumi relativi all'anno 2023 e sono stati ottenuti da misurazioni dirette.
- **Completezza:** si può supporre che la percentuale dei quantitativi misurati o stimati sia pari al 99%.
- **Rappresentatività:** i dati raccolti si riferiscono all'impianto Ageco Due spa, ovvero al sito di produzione oggetto del presente studio; pertanto, la rappresentatività si può ritenere essere elevata.
- **Coerenza:** la metodologia dello studio è stata applicata in maniera uniforme alle differenti componenti delle analisi.
- **Riproducibilità:** i dati sono stati raccolti attraverso utilizzo di schede compilate direttamente da tecnici di Ageco Due, all'interno delle stesse è riportata la fonte del dato, ovvero l'ufficio di competenza per la specifica informazione o la documentazione di sistema in cui è contenuta (Controllo di Gestione, Ufficio Energia, Ecos, etc.). All'interno del file di raccolta dati sono contenute tutte le informazioni che consentono di riprodurre i risultati dello studio.
- **Fonte dei dati:** i dati derivano da fonte primarie laddove possibile, altrimenti si è fatto uso della banca dati Ecoinvent 3.10.
- **Incertezza dell'informazione:** all'interno del presente studio è stata effettuata un'analisi dell'incertezza i cui risultati sono consultabili nel Paragrafo 6.

3.9 Categorie di impatto

La metodologia scelta per valutare i potenziali impatti ambientali dovuti alla produzione di cloruro ferrico e cloruro ferroso è quella dell'Environmental Footprint EF. Nello specifico il metodo

implementato all'interno del software OpenLCA è l'EF v 3.1 e le categorie di impatti selezionate sono:

- **Cambiamenti climatici** [kg CO_{2,e}]: i cambiamenti climatici possono provocare effetti negativi sulla salute degli ecosistemi, sulla salute umana e sul benessere materiale. Il cambiamento climatico è legato alle emissioni di gas serra nell'aria e come queste provochino un aumento della temperatura globale. Il modello di caratterizzazione utilizzato è quello sviluppato dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). I fattori di caratterizzazione sono espressi come potenziale di riscaldamento globale in un periodo di riferimento pari a 100 anni (GWP100), in kg di anidride carbonica/kg di emissioni. L'ambito geografico di questo indicatore è su scala globale. È suddiviso in tre sottocategorie, in base alla fonte di emissione: risorse fossili, risorse di origine biologica e cambiamento nell'uso del suolo; è la somma di questi tre contributi a definire il cambiamento climatico totale.
- **Eutrofizzazione delle acque dolci** [kg PO₄^{3-,e}] - **Eutrofizzazione marina** [kg N_e] - **Eutrofizzazione terrestre** [mol N equivalente]: l'eutrofizzazione comprende tutti gli impatti dovuti a livelli eccessivi di macronutrienti nell'ambiente causati dalle emissioni di sostanze nutritive nell'aria, nell'acqua e nel suolo. In particolare, l'eutrofizzazione rappresenta la frazione di nutrienti che raggiungono il compartimento terminale di acqua dolce, marino e l'ecosistema terrestre rispettivamente; la prima è causata dall'emissione di fosforo mentre le altre due dalle emissioni di composti contenenti azoto.
- **Uso delle risorse, minerali e metalli** [kg Sb_e] – **Uso delle risorse, fossili** [MJ]: questa categoria di impatto riguarda la protezione del benessere umano, della salute umana e della salute degli ecosistemi e l'estrazione di minerali e combustibili fossili. Rappresenta l'esaurimento delle risorse sia naturali non di origine fossile nel primo caso che di origine fossile nel secondo. Il fattore di esaurimento abiotico viene determinato per ciascuna estrazione di minerali e metalli [kg di antimonio equivalenti/kg di estrazione] e combustibili fossili [MJ/kg di estrazione], sulla base delle riserve e al tasso di de-accumulazione. L'ambito geografico di questo indicatore è su scala globale.
- **Riduzione dello strato di ozono** [kg CFC 11_e]: questa categoria riguarda l'esaurimento dell'ozono stratosferico a causa di emissioni in aria di gas che provocano la distruzione dello strato di ozono stratosferico che protegge dalla radiazioni ultraviolette pericolose e che può avere effetti nocivi sulla salute umana, sulla salute degli animali, sugli ecosistemi terrestri e acquatici, sui cicli biochimici e sui materiali. Il modello di caratterizzazione utilizzato è quello sviluppato dall'Organizzazione meteorologica (WMO) che definisce il potenziale di riduzione dell'ozono di diversi gas [CFC-11_e/kg di emissione]. L'ambito geografico di questo indicatore è su scala globale.
- **Formazione di ozono fotochimico** [kg NMVOC_e]: la formazione foto-ossidante è la formazione di sostanze reattive (principalmente ozono) che sono nocive per la salute umana e gli ecosistemi e che possono anche danneggiare le colture. Questo problema è indicato anche con "smog estivo". Lo smog invernale non rientra nell'ambito di questa categoria. Il potenziale di creazione di ozono fotochimico (POCP) per l'emissione di sostanze nell'aria è calcolato secondo quanto riportato in Van Zelm et al, 2008 ed espresso in kg equivalenti di NMVOC/kg di emissioni.

- **Utilizzo delle risorse idriche** [m^3 world equivalenti deprived]: l'indicatore misura il Relative Available Water REmaining (AWARE), ovvero la quantità di acqua rimanente in un bacino, dopo che la domanda di risorsa idrica per le attività umane e degli ecosistemi è stata soddisfatta (Boulay et al. 2018). Questo indicatore valuta il potenziale di deprivazione della risorsa idrica, sia per gli umani che per gli ecosistemi, partendo dall'assunzione che meno acqua rimane disponibile, più è probabile che un ulteriore utilizzatore, sia esso un umano o un ecosistema, ne venga deprivato (Boulay et al., 2016).
- **Acidificazione** [mol H^+ equivalente]: il relativo indicatore è l'eccedenza accumulata, che rappresenta la potenziale acidificazione di aria, acqua e suolo dovuta al rilascio di gas quali ossidi di azoto e zolfo, e dovuta principalmente a processi di combustione nella produzione di elettricità, riscaldamento e trasporto.
- **Tossicità umana, cancerogena** [CTUh]: l'indicatore CTUh rappresenta l'unità tossica comparativa per l'uomo e valuta l'impatto sugli esseri umani di sostanze tossiche e cancerogene emesse nell'ambiente. Il CTUh è il numero stimato di casi di malattie (o mortalità) per unità di esposizione a una determinata sostanza; essa tiene conto sia della gravità della tossicità delle sostanze sia del livello di esposizione umana, consentendo di quantificare e confrontare i rischi tossicologici legati a vari scenari o prodotti.
- **Tossicità umana, non cancerogena** [CTUh]: analoga alla categoria sopra descritta, con la differenza che questa valuta l'impatto sugli esseri umani di sostanza non cancerogene emesse in ambiente.
- **Ecotossicità, acqua dolce** [CTUe]: il corrispondente indicatore è il CTUe, cioè l'unità tossica comparativa per gli ecosistemi; questa categoria indica il potenziale impatto tossico sugli ecosistemi d'acqua dolce a seguito dell'esposizione a sostanze chimiche. L'unità di misura CTUe rappresenta la frazione stimata di specie in un ecosistema d'acqua dolce che può essere potenzialmente affetta, in termini di mortalità o riduzione della popolazione, per unità di esposizione ad una sostanza tossica; essa permette di quantificare e confrontare gli impatti ecotossicologici di diverse sostanze, tenendo conto della loro tossicità e del livello di rilascio in ambiente.
- **Uso del suolo** [-]: rappresenta una misura adimensionale della qualità del suolo e quindi le possibili variazioni della stessa, dovute alla produzione biotica, alla resistenza all'erosione, alla filtrazione meccanica o al rifornimento delle falde acquifere.
- **Radiazioni ionizzanti** [kBq U235 -equivalente]: l'indicatore corrispondente è l'efficienza dell'esposizione umana relativa all'uranio-235. Le radiazioni ionizzanti si riferiscono all'energia emessa da materiali radioattivi, che può causare effetti negativi sulla salute umana e sugli ecosistemi qualora se ne entri in contatto. Il kBq U235 -equivalente, ossia il kilobecquerel di equivalenti di uranio-235, rappresenta l'attività radioattiva potenziale riferita all'uranio-235, un isotopo comunemente utilizzato come riferimento per il confronto degli impatti da radiazioni ionizzanti. L'uso di questa unità permette di quantificare e confrontare il potenziale impatto ambientale e sanitario delle emissioni radioattive generate da diverse attività, come la produzione di energia nucleare o l'estrazione di materiali radioattivi.

- **Emissioni di particolato** [incidenza delle malattie]: il relativo indicatore rappresenta l'impatto sulla salute umana, ossia la potenziale incidenza di malattie, dovuta all'emissione di particolato. La presenza di particolato può dipendere da diverse fonti, come i processi industriali, la combustione di combustibili fossili, le attività agricole o il traffico veicolare. Si misura come incidenza della malattia.

Quanto descritto sopra è schematizzato in Tabella 3.4.

Tabella 3.4 Categorie d'impatto

Categoria di impatto	Dettaglio	UdM
Climate change - global warming potential (GWP100)	Forzante radiativo come potenziale di riscaldamento globale (GWP 100)	kg CO _{2,e}
Climate change: biogenic - global warming potential (GWP100)	Forzante radiativo come potenziale di riscaldamento globale (GWP 100)	kg CO _{2,e}
Climate change: fossil - global warming potential (GWP100)	Forzante radiativo come potenziale di riscaldamento globale (GWP 100)	kg CO _{2,e}
Climate change: land use and land use change - global warming potential (GWP100)	Forzante radiativo come potenziale di riscaldamento globale (GWP 100)	kg CO _{2,e}
Energy resources: non-renewable - abiotic depletion potential (ADP): fossil fuels	Impoverimento delle risorse abiotiche dovuto al prelievo di combustibili fossili	MJ, net calorific value
Eutrophication: freshwater - fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)	Frazione di nutrienti che raggiunge il comparto finale acque dolci	kg PO ₄ ³⁻ ,e
Eutrophication: marine - fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)	Frazione di nutrienti che raggiunge il comparto finale acque marine	kg N _e
Eutrophication: terrestrial - accumulated exceedance (AE)	Superamento accumulato	mol N _e
Material resources: metals/minerals - abiotic depletion potential (ADP): elements (ultimate reserves)	Impoverimento delle risorse abiotiche (ADP riserve finali)	kg Sb _e
Ozone depletion - ozone depletion potential (ODP)	Potenziale di riduzione dell'ozono (OPD)	kg CFC-11 _e
Photochemical ozone formation: human health - tropospheric ozone concentration increase	Aumento della concentrazione di ozono troposferico	kg NMVOC _e
Water use - user deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)	Potenziale mancanza d'acqua per l'utilizzatore (consumo di acqua ponderato in funzione della mancanza)	m ³ world eq. deprived
Acidification	Potenziale acidificazione di aria, acqua e suolo	mol H ⁺ _e
Human toxicity: carcinogenic	Impatto sugli esseri umani di sostanze tossiche e cancerogene emesse nell'ambiente	CTUh
Human toxicity: non-carcinogenic	Impatto sugli esseri umani di sostanze non cancerogene emesse nell'ambiente	CTUh
Ecotoxicity: freshwater	Potenziale impatto tossico sugli ecosistemi d'acqua dolce a seguito dell'esposizione a sostanze chimiche	CTUe
Land use	Qualità del suolo e quindi le possibili variazioni della stessa, dovute alla produzione biotica, alla resistenza all'erosione, alla filtrazione meccanica o al rifornimento delle falde acquifere	-
Ionizing radiation: human health	Energia emessa da materiali radioattivi, che può causare effetti negativi sulla salute umana e sugli ecosistemi qualora se ne entri in contatto	kBq U235 _e
Particulate matter formation	Potenziale incidenza di malattie, dovuta all'emissione di particolato	disease incidence

3.10 Assunzioni e limitazioni

All'interno del presente studio sono stati considerati:

- i quantitativi di materie prime e rifiuto in ingresso al processo di produzione;
- i consumi energetici;
- i trasporti dei rifiuti in ingresso al processo;
- la produzione di eventuali rifiuti;
- le emissioni in atmosfera e nelle acque superficiali;
- il trasporto del prodotto al cliente finale.

Sono stati esclusi dalla valutazione del ciclo di vita la realizzazione, manutenzione e dismissioni delle infrastrutture intese come edifici e macchinari (qualora non fossero già presenti all'interno del dataset di Ecoinvent).

4 Analisi dell'inventario

La fase di analisi di inventario consiste nella raccolta, quantificazione e normalizzazione dei dati relativi all'ingresso ed uscita relative al sistema esaminato, in questo caso il processo di produzione del cloruro ferrico e ferroso. Questa fase è fondamentale per la corretta valutazione dell'impatto ambientale e per identificare i punti critici del ciclo di vita del prodotto analizzato.

Di seguito sono riportate le informazioni necessarie alla stesura dell'inventario secondo le norme UNI EN ISO 14040:2021.

4.1 Modalità di raccolta dati

La fase di raccolta dati è avvenuta mediante condivisione di una scheda (file Excel) all'interno della quale sono stati inseriti i dati di input e output relativi all'intero ciclo produttivo. La compilazione del file è stata effettuata da tecnici Ageco Due e le informazioni sono state inserite separatamente per cloruro ferrico e ferroso.

4.2 Soluzione di decappaggio e materie prime

In Tabella 4.1 sono riportati i quantitativi di esausto di decappaggio e di materie prime in ingresso al processo di produzione del cloruro ferrico e ferroso nell'anno 2023.

Tabella 4.1 Anno 2023: rifiuti e materie prime in ingresso

Materie prime [ton]	Cloruro ferrico	Cloruro ferroso
Esausto cloridrico da decappaggio	10 170	3 459
Ferro metallico	-	14
Acido cloridrico	447	-
Idrossido di sodio	8	2
Clorato di sodio	263	-

4.3 Consumi energetici e di acqua

In Tabella 4.2 sono riportati i consumi energetici dell'impianto CC, CSS, di riciclo e di depurazione per l'anno 2023, mentre la descrizione del mix energetico utilizzato per il calcolo degli impatti dovuti alla produzione di energia è descritta nel dettaglio al Paragrafo 4.6. I consumi di energia elettrica ed acqua sono stati definiti per allocazione fisica, attribuendo quindi il 31.68% alla produzione di cloruro ferroso ed il 68.32% al ferrico.

Tabella 4.2 Consumi di energia elettrica per l'anno 2023

Fasi del processo	UdM	Cloruro ferrico	Cloruro ferroso
Consumi elettrici	kWh	23 7929	11 0325
Consumi di metano	m³	186 341	-
Consumi di acqua	m³	3 695	1 713

4.4 Rifiuti

In Tabella 4.3 sono elencati i rifiuti prodotti per l'anno 2023. Ai fini dello studio LCA:

- è stato considerato il trasporto del rifiuto presso l'impianto di destino finale
- per i rifiuti a smaltimento è stato considerato l'impatto dovuto al processo di trattamento del rifiuto (discarica o incenerimento).

Tabella 4.3 Anno 2023: rifiuti prodotti

Codice rifiuto	Nome rifiuto	Quantità (ton)	Destinazione rifiuto
150103	imballaggi in legno	0.944	R13
160213	Apparecchiature fuori uso, contenenti componenti pericolosi (2) diversi da quelli di cui alle voci 16 02 09 e 16 02 12	0.023	R13
170203	plastica	0.108	D15
170405	ferro e acciaio	0.131	R13
60313	Sali e loro soluzioni, contenenti metalli pesanti	0.11	R13
150110	imballaggi contenenti residui di sostanze pericolose o contaminati da tali sostanze	0.918	D14
150202	assorbenti, materiali filtranti (inclusi filtri dell'olio non specificati altrimenti), stracci e indumenti protettivi, contaminati da sostanze pericolose	0.271	R13
110105	acidi di decappaggio	24.56	R4
110105	acidi di decappaggio	19.7	R4
110105	acidi di decappaggio	4.44	R4
161002	rifiuti liquidi acquosi, diversi da quelli di cui alla voce 16 10 01	10.42	D9
170904	rifiuti misti dell'attività di costruzione e demolizione, diversi da quelli di cui alle voci 17 09 01, 17 09 02 e 17 09 03	2.58	R13
150103	imballaggi in legno	0.44	R13
150202	assorbenti, materiali filtranti (inclusi filtri dell'olio non specificati altrimenti), stracci e indumenti protettivi, contaminati da sostanze pericolose	0.103	R13
160506	sostanze chimiche di laboratorio contenenti o costituite da sostanze pericolose, comprese le miscele di sostanze chimiche di laboratorio	0.007	D15
160709.02	rifiuti contenenti altre sostanze pericolose	0.337	R13
170405	ferro e acciaio	0.291	R13
170904	rifiuti misti dell'attività di costruzione e demolizione, diversi da quelli di cui alle voci 17 09 01, 17 09 02 e 17 09 03	0.238	R13
200121	tubi fluorescenti ed altri rifiuti contenenti mercurio	0.007	R13
170405	ferro e acciaio	1.36	R13
150110	imballaggi contenenti residui di sostanze pericolose o contaminati da tali sostanze	0.68	D14
190205	fanghi prodotti da trattamenti chimico-fisici, contenenti sostanze pericolose	14.76	R13
170203	plastica	0.408	R13
170405	ferro e acciaio	0.387	R13
160709	rifiuti contenenti altre sostanze pericolose	13.86	D15
160709	rifiuti contenenti altre sostanze pericolose	23.92	D15

Ai rifiuti sono stati allocati al processo di produzione del cloruro ferrico o del cloruro ferroso secondo l'allocazione fisica (Paragrafo 3.6) ad eccezione del CER 190205, che è proprio del ferroso e del CER 160709 che deriva dalla produzione del ferrico.

4.5 Emissioni in atmosfera

Le emissioni in atmosfera sono riconducibili essenzialmente a:

- Emissione puntiforme relativa all'impianto di scrubber (E1) che tratta gli sfiati acidi di serbatoi, reattori, apparecchiature.
- Emissioni puntiforme relativa a alla caldaia a metano (CT1)
- Emissione puntiforme relativa alla cappa del laboratorio (EP3)
- Emissione puntiforme relativa alla torre evaporativa (EP2)
- Emissione puntiforme relativa allo sfiato di emergenza della caldaia (EP1)

Le emissioni puntiformi EP1, EP2, EP3 sono, come da A.I.A. attualmente vigente, non significative, non soggette ad autorizzazione ai sensi dell'art. 269 punto 14 co. i) del D.Lgs. n.

152/2006 e smi. Le emissioni E1 e CT1 sono autorizzate con Decreto Dirigenziale n.17473 del 08/10/2021, secondo il quadro riassuntivo sotto riportato (Figura 4.1)

Sigla	Origine	Portata	Sez.	Velocità	Temp.	Altezza	Durata		Impianto di abbattimento	Inquinanti Emessi e Limiti		
		Nm ³ /h	m ²	m/s	°C	m	h/g	g/a		Inquinante	Unità di misura	Note
E1	Sfiato reattori Sfiato serbatoi (scrubber)	1.200	0,03	17,0	amb.	9,6	24	365	Scrubber	HCl	5 mg/Nm ³	(4)
										Aldeidi	20 mg/Nm ³ o 100 g/h	(5)
CT1	Centrale termica a metano (pot. 1,163 MW _e)	2.000	0,1	10	230	11	24	365	---	NO _x CO	100 mg/Nm ³ 60 mg/Nm ³	(2), (3),

Figura 4.1 Quadro riassuntivo delle emissioni e dei limiti ai sensi del D.Lgs 152/2006.

In Tabella 4.4 è riportata la sintesi delle emissioni implementate all'interno di questo studio, calcolate in base ai risultati delle analisi semestrali effettuate per ciascun punto emissivo nell'anno 2023.

Tabella 4.4 Sintesi delle emissioni autorizzate implementate nello studio LCA

Emissione	Parametro	Portata volumetrica [Nm ³ /anno]	Portata massica [gr/anno]
CT1	Ossidi di azoto, NO _x	17520000	1329768
CT1	Ossidi di carbonio, CO	17520000	231264
E1	Acido cloridrico, HCl	10512000	2628
E1	Carbonio organico totale, TOC	10512000	21024

4.6 Calcolo del mix energetico nazionale

Il calcolo del fattore di emissione per la produzione ed il consumo di energia elettrica è stato effettuato utilizzando un approccio *Location Based*.

Per stabilire il mix energetico medio italiano sono stati utilizzati i seguenti dati:

- le percentuali riferite alla composizione dell'energia elettrica emessa in rete fornite da AIB per l'anno 2023 (Tabella 4 a pagina 18 del documento "European Residual Mixes 2023 – Association of Issuing Bodies");
- i fattori di emissione presenti in Ecoinvent 3.10 "electricity, high voltage, production mix | electricity, high voltage | Cutoff, U".

- le informazioni relative alle perdite di rete dalla Tabella 2.2 a pagina 53 del documento SNPA 363/2022.

In Tabella 4.5 è riportato il mix energetico Total Supplier italiano, ottenuto dalla Tabella 4 dell'“European Residual Mixes” per l'anno 2023, utilizzato all'interno di questo studio.

Tabella 4.5 Mix energetico ‘Totale Supplier’ italiano per l'anno 2023 – Dati AIB

Mix Energetico “Total Supplier” italiano per l'anno 2023 – Dati AIB	
Fonte di produzione	Percentuale [%]
Fonte rinnovabile, di cui:	20.14
Biomasse	2.73
Solare	7.51
Geotermico	0.34
Eolico	4.26
Idroelettrico	5.29
Altre rinnovabili	0.01
Nucleare	3.79
Fonti non rinnovabili, di cui:	76.07
Carbone	19.57
Lignite	0.04
Gas naturale	50.15
Prodotti petroliferi	3.24
Altre non rinnovabili	3.07

Relativamente alla quota parte di energia elettrica prodotta da altre fonti non rinnovabili (3.07%) e da altre fonti rinnovabili (0.01%), si è scelto di redistribuire tale percentuale su tutte le rispettive fonti termoelettriche e rinnovabili presenti nel mix energetico, ottenendo le percentuali in Tabella 4.6.

Tabella 4.6 Mix energetico con percentuali di ‘altre fonti rinnovabili’ e ‘altre fonti non rinnovabili’ redistribute

Mix Energetico “Total Supplier” italiano per l'anno 2023 – Dati AIB	
Fonte di produzione	Percentuale [%]
Fonte rinnovabile, di cui:	20.20
Biomasse	2.74
Solare	7.54
Geotermico	0.34
Eolico	4.27
Idroelettrico	5.31
Nucleare	3.79
Fonti non rinnovabili, di cui:	76.07
Carbone	20.39

Lignite	0.05
Gas naturale	52.26
Prodotti petroliferi	3.37

Le perdite di rete sono state ottenute dalla Tabella 2.2 del documento ISPRA n 363/2022. ISPRA quantifica le perdite da rete di distribuzione per l'anno 2021 (dato disponibile più aggiornato) pari al 6.39% della produzione lorda annua di energia elettrica.

Il mix energetico è stato quindi ricostruito utilizzando i processi contenuti nel database Ecoinvent 3.10 (Tabella 4.7). In particolare, per la caratterizzazione del contributo di energia elettrica nucleare sono stati considerati i principali paesi dai quali l'Italia importa il vettore energetico, ottenuti dal portale Eurostat riferiti all'anno 2021 (ultimo anno disponibile).

Tabella 4.7 Composizione del mix energetico in Ecoinvent 3.10

Processi Ecoinvent 3.10	kWh
Electricity production, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - IT	0.20
Electricity production, deep geothermal electricity, high voltage Cutoff, U - IT	3.36E-03
Electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore electricity, high voltage Cutoff, U - IT	0.03
Electricity production, wind, >3MW turbine, onshore electricity, high voltage Cutoff, U - IT	3.66E-03
Electricity production, hydro, pumped storage electricity, high voltage Cutoff, U - IT	2.10E-03
Electricity production, hydro, reservoir, alpine region electricity, high voltage Cutoff, U - IT	0.03
Electricity production, hydro, run-of-river electricity, high voltage Cutoff, U - IT	0.02
Heat and power co-generation, hard coal electricity, high voltage Cutoff, U - IT	1.13E-03
Heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical electricity, high voltage Cutoff, U - IT	0.10
Electricity production, wind, <1MW turbine, onshore electricity, high voltage Cutoff, U - IT	0.01
Electricity production, oil electricity, high voltage Cutoff, U - IT	4.30E-03
Electricity production, natural gas, combined cycle power plant electricity, high voltage Cutoff, U - IT	0.19
Heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 electricity, high voltage Cutoff, U - IT	7.11E-03
Heat and power co-generation, biogas, gas engine electricity, high voltage Cutoff, U - IT	0.02
Heat and power co-generation, oil electricity, high voltage Cutoff, U - IT	0.03
Electricity production, natural gas, conventional power plant electricity, high voltage Cutoff, U - IT	0.05
Treatment of coal gas, in power plant electricity, high voltage Cutoff, U - IT	1.90E-03
Heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical electricity, high voltage Cutoff, U - IT	0.17
Electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si electricity, low voltage Cutoff, U - IT	0.08
Electricity production, nuclear, pressure water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - FR	0.02
Electricity production, nuclear, boiling water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - DE	4.11E-03
Electricity production, nuclear, boiling water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - ES	3.66E-03
Electricity production, nuclear, boiling water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - SE	3.20E-03
Electricity production, nuclear, pressure water reactor electricity, high voltage Cutoff, U - BE	3.20E-03
Market for electricity, high voltage electricity, high voltage Cutoff, U - IT	0.02
Electricity production, lignite electricity, high voltage Cutoff, U - IT	4.70E-04

4.7 Modellizzazione dei processi

In Tabella 4.8 e Tabella 4.9 sono riportati i dati di input implementati per l'analisi del ciclo di vita rispettivamente per il processo di produzione del cloruro ferrico e ferroso.

Nello specifico in tabella è esplicitato:

- La fase del processo cui si riferisce il dato di input
- La quantità in input e output riferita all'unità funzionale
- L'unità di misura
- Il processo Ecoinvent 3.10 utilizzato come dato secondario all'interno dello studio.

Tabella 4.8 Processo di produzione del cloruro ferrico: dai di input, unità di misura, quantità rapportata all'unità funzionale e processo di Ecoinvent 3.10 selezionato.

Fase del Processo	INPUT	UdM	Quantità per Kg di cloruro ferrico	Processo Ecoinvent 3.10
Upstream	Esausto cloridrico da decappaggio delle acciaierie (CER 110105)	kg	1.31	-
Upstream	Acido cloridrico	kg	0.06	hydrochloric acid production, from the reaction of hydrogen with chlorine hydrochloric acid, without water, in 30% solution state Cutoff, U - RER
Upstream	Clorato di sodio	kg	0.03	sodium chlorate production, powder sodium chlorate, powder Cutoff, U - RER
Upstream	Idrossido di sodio	kg	1.00E-03	sodium hydroxide to generic market for neutralising agent neutralising agent, sodium hydroxide-equivalent Cutoff, U - RER
Upstream	Trasporto a monte, merci, camion 3.5-7.5 metric ton, EURO4 - idrossido di sodio	ton * km	1.95E-05	transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER
Upstream	Trasporto a monte, merci, camion 16-32 metric ton, EURO4 - acido cloridrico	ton * km	6.70E-03	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER
Upstream	Trasporto a monte, merci, camion 16-32 metric ton, EURO4 - esausto cloridrico	ton * km	0.46	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER
Upstream	Trasporto a monte, merci, camion 16-32 metric ton, EURO4 - clorato di sodio	ton * km	0.07	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER
Core	Energia Elettrica EE	kWh	0.03	MIX ENERGETICO AIB TOTAL SUPPLIER 2023 - IT
Core	Gas naturale	Smc	0.02	market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, U - IT
Core	Acqua prelevata da pozzo	m³	4.77E-04	flusso elementare : Water, well, in ground
Downstream	Trasporto, merci, veicolo commerciale leggero - rifiuti prodotti	ton * km	3.90E-05	transport, freight, light commercial vehicle transport, freight, light commercial vehicle Cutoff, U - Europe without Switzerland
Downstream	Trasporto, merci, camion 7.5-16 metric ton, EURO4 - rifiuti prodotti	ton * km	8.96E-05	transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER
Downstream	Trasporto, merci, camion 16-32 metric ton, EURO4 - rifiuti prodotti	ton * km	3.98E-03	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER
Downstream	Trasporto, merci, camion 3.5-7.5 metric ton, EURO4 - cloruro ferrico	ton * km	4.69E-05	transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER
Downstream	Trasporto, merci, camion 7.5-16 metric ton, EURO4 - cloruro ferrico	ton * km	2.83E-03	transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER
Downstream	Trasporto, merci, camion 16-32 metric ton, EURO4 - cloruro ferrico	ton * km	0.41	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER
OUTPUT		UdM	Quantità per Kg di cloruro ferrico	Processo Ecoinvent 3.10
Cloruro ferrico		kg	1.00	UNITA' FUNZIONALE

Core	Acqua scaricata	m3	5.14E-04	market for wastewater, average wastewater, average Cutoff, U - Europe without Switzerland
Core	Emissioni in atmosfera - Ossidi di azoto NOx	g	0.12	flusso elementare: Nitrogen oxides, IT - Elementary flows/Emission to air/unspecified
Core	Emissioni in atmosfera - Ossidi di carbonio CO	g	0.02	flusso elementare: Carbon monoxide, fossil - Elementary flows/Emission to air/unspecified
OUTPUT		UdM	Quantità per Kg di cloruro ferrico	Processo Ecoinvent 3.10
Core	Emissioni in atmosfera - Acido cloridrico HCl	g	2.32E-04	flusso elementare: Hydrochloric acid - Elementary flows/Emission to air/unspecified
Core	Emissioni in atmosfera - Carbonio Totale Organico TOC	g	1.86E-03	flusso elementare: TOC, Total Organic Carbon - Elementary flows/Emission to water/unspecified
Core	Rifiuti a smaltimento discarica (CER 161002)	kg	9.19E-04	treatment of inert waste, sanitary landfill inert waste Cutoff, U - RER
Core	Smaltimento CER 160709 - CER 150110 - CER 160506	kg	5.02E-03	treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration hazardous waste, for incineration Cutoff, U - Europe without Switzerland
Core	Smaltimento CER 170203	kg	9.53E-06	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration waste plastic, mixture Cutoff, U - GLO

Tabella 4.9 Processo di produzione del cloruro ferroso: dai di input, unità di misura, quantità rapportata all'unità funzionale e processo di Ecoinvent 3.10 selezionato.

Fase del Processo	INPUT	UdM	Quantità per Kg di cloruro ferrico	Processo Ecoinvent 3.10
Upstream	Esausto cloridrico da decappaggio delle acciaierie (CER 110105)	kg	0.963	-
Upstream	Ferro metallico	kg	3.90E-03	iron pellet production iron pellet Cutoff, U – RoW
Upstream	Idrossido di sodio	kg	5.12E-04	sodium hydroxide to generic market for neutralising agent neutralising agent, sodium hydroxide-equivalent Cutoff, U - RER
Upstream	Trasporto a monte, merci, camion 3.5-7.5 metric ton, EURO4 - idrossido di sodio	ton * km	9.99E-06	transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER
Upstream	Trasporto a monte, merci, camion 7.5-16 metric ton, EURO4 - ferro metallico	ton * km	6.99E-03	transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER
Upstream	Trasporto a monte, merci, camion 16-32 metric ton, EURO4 - esausto cloridrico da decappaggio	ton * km	0.34	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER
Core	Energia Elettrica EE	kWh	0.03	MIX ENERGETICO AIB TOTAL SUPPLIER 2023 - IT
Core	Acqua prelevata da pozzo	m³	4.77E-04	flusso elementare : Water, well, in ground
Core	Trasporto a valle, merci, veicolo commerciale leggero - rifiuti prodotti	ton * km	3.90E-05	transport, freight, light commercial vehicle transport, freight, light commercial vehicle Cutoff, U - Europe without Switzerland
Core	Trasporto a valle, merci, camion 7.5-16 metric ton, EURO4 - rifiuti prodotti	ton * km	1.31E-03	transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER

Analisi del Ciclo di Vita (LCA): Cloruro Ferrico e Ferroso

Core	Trasporto a valle, merci, camion 16-32 metric ton, EURO4 - rifiuti prodotti	ton * km	4.05E-05	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER
Downstream	Trasporto a valle, merci, camion 16-32 metric ton, EURO4 - cloruro ferroso	ton * km	0.13	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER
Downstream	Trasporto a valle, merci, camion 3.5-7.5 metric ton, EURO4 - cloruro ferroso	ton * km	3.89E-03	transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER
Downstream	Trasporto a valle, merci, camion 7.5-16 metric ton, EURO4 - cloruro ferroso	ton * km	0.00E+00	transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 Cutoff, U - RER
OUTPUT		UdM	Quantità per Kg di cloruro ferrico	Processo Ecoinvent 3.10
Cloruro ferroso		kg	1.00	UNITA' FUNZIONALE
Core	Acqua scaricata	m3	5.14E-04	market for wastewater, average wastewater, average Cutoff, U - Europe without Switzerland
Core	Emissioni in atmosfera - Ossidi di azoto NOx	g	0.12	flusso elementare: Nitrogen oxides, IT - Elementary flows/Emission to air/unspecified
Core	Emissioni in atmosfera - Ossidi di carbonio CO	g	0.02	flusso elementare: Carbon monoxide, fossil - Elementary flows/Emission to air/unspecified
Core	Emissioni in atmosfera - Acido cloridrico HCl	g	2.32E-04	flusso elementare: Hydrochloric acid - Elementary flows/Emission to air/unspecified
Core	Emissioni in atmosfera - Carbonio Totale Organico TOC	g	1.86E-03	flusso elementare: TOC, Total Organic Carbon - Elementary flows/Emission to water/unspecified
Core	Rifiuti a smaltimento discarica (CER 161002)	kg	9.19E-04	treatment of inert waste, sanitary landfill inert waste Cutoff, U - RER
Core	Rifiuti a smaltimento incenerimento (CER 150110 - CER 160506)	kg	1.42E-04	treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration hazardous waste, for incineration Cutoff, U - Europe without Switzerland
Core	Rifiuti a smaltimento incenerimento (CER 170203)	kg	9.53E-06	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration waste plastic, mixture Cutoff, U - GLO

5 Valutazione degli impatti

5.1 Cloruro ferrico

Di seguito è riportata la valutazione degli impatti relativa alla produzione e trasporto al cliente finale di 1 kg di cloruro ferrico.

Il software utilizzato per il calcolo della *Carbon Footprint* è OpenLCA 2.2.0, implementato con il database Ecoinvent 3.10; il metodo di calcolo utilizzato per la valutazione degli impatti è l' EF 3.1 che permette di calcolare gli indicatori Midpoint relativi al Global Warming Potential a 100 anni GWP100) con l'AR6, suddivisi in:

- GWP100 Fossil, che calcola il contributo delle sole fonti fossili;
- GWP100 Biogenic, che quantifica la CO₂ biogenica prodotta dal processo;
- GWP100 Land Use, relativo alle emissioni ed assorbimento dovute al suolo o al cambiamento nell'uso del suolo;
- GWP100 Total, che è dato dalla somma dei tre indicatori sopra elencati.

Si ricorda che l'indicatore GWP100 corrisponde alla *Carbon Footprint*, in questo caso riferita al cloruro ferrico prodotto presso l'impianto Ageco Due spa e trasportato al cliente finale.

Nell'ambito di uno studio LCA di un prodotto, il processo di valutazione degli impatti inizia con un'analisi dettagliata dei risultati dell'inventario.

I risultati dell'inventario, in particolare, vengono espressi sia in termini di sostanze in ingresso al sistema, sia in termini di sostanze emesse, ossia i flussi in uscita rilasciati nell'ambiente: aria, acqua e suolo.

Globalmente il processo impatta oltre il 91% in atmosfera e per l'8% nelle acque.

In Tabella 5.1 si riporta l'impatto relativo alla produzione del cloruro ferrico nella componente atmosfera da cui si evince che i composti rilasciati in maggiore quantità sono la CO₂, sia di origine fossile che non fossile. In quest'ultima non sono stati riportati i composti presenti con una percentuale inferiore allo 0.5%.

Tabella 5.1 Cloruro Ferrico. Emissioni in aria: kg emessi dei composti rilasciati in maggiore quantità

Composto	Quantità [kg]
CO ₂ – fossile	0.317
CO ₂ – non fossile	0.019
Idrogeno	0.002
Metano	0.001

In Tabella 5.2 si riporta gli indicatori di impatto relativi alla produzione e trasporto di cloruro ferrico ai sensi del metodo dell'Environmental Footprint.

Tabella 5.2 Produzione di cloruro ferrico: indicatori di impatto riferiti all'Unità Funzionale (U.F.: 1 kg di cloruro ferrico)

Categoria d'impatto	Unità di misura	Risultato
Acidificazione	mol H ⁺ -Eq	0.001
Cambiamenti climatici	kg CO₂-Eq	0.361
Cambiamenti climatici: biogenico	kg CO ₂ -Eq	0.001
Cambiamenti climatici: fossile	kg CO ₂ -Eq	0.359
Cambiamenti climatici: uso del suolo	kg CO ₂ -Eq	0.000
Ecotossicità: acqua dolce	CTUe	1.910
Ecotossicità: acqua dolce, inorganici	CTUe	1.428
Ecotossicità: acqua dolce, organici	CTUe	0.482
Risorse energetiche: non rinnovabili	MJ, net calorific value	6.314
Eutrofizzazione: acqua dolce	kg P-Eq	1.14E-04
Eutrofizzazione: marina	kg N-Eq	4.20E-04
Eutrofizzazione: terrestre	mol N-Eq	0.004
Tossicità umana: cancerogena	CTUh	2.25E-09
Tossicità umana: non cancerogena	CTUh	3.64E-09
Radiazioni ionizzanti: salute umana	kBq U235-Eq	0.058
Uso del suolo	dimensionless	2.174
Risorse materiali: metalli/minerali	kg Sb-Eq	3.29E-06
Assottigliamento dell'ozono	kg CFC-11-Eq	9.88E-09
Formazione di particolato	disease incidence	1.89E-08
Formazione di ossidanti fotochimici: salute umana	kg NMVOC-Eq	0.002
Uso dell'acqua	m ³ world Eq deprived	0.201

Successivamente sono state identificate le categorie d'impatto più rilevanti adottando i fattori di caratterizzazione e ponderazione¹ riportati in Tabella 5.3 ed in Figura 5.1.

Tabella 5.3 Cloruro Ferrico: individuazione delle Categorie di Impatto più critiche

Categoria di impatto	Fattori di normalizzazione	Fattori di ponderazione	Rilevanza
Acidificazione	55.540337	6.20%	4.29%
Cambiamenti climatici	7758.22	21.06%	25.97%
Ecotossicità: acqua dolce	11814.18859	1.92%	8.22%
Risorse energetiche: non rinnovabili	65256.27063	8.32%	21.33%
Eutrofizzazione: acqua dolce	2.552245251	2.80%	3.30%
Eutrofizzazione: marina	28.27771727	2.96%	1.16%
Eutrofizzazione: terrestre	176.9170004	3.71%	2.37%
Tossicità umana: cancerogena	3.85076E-05	2.13%	3.30%
Tossicità umana: non cancerogena	0.000474889	1.84%	0.37%
Radiazioni ionizzanti: salute umana	4220.159813	5.01%	1.84%
Uso del suolo	1334460.832	7.94%	0.34%

¹ European Platform on LCA EPLCA – Developer Environmental Footprint (EF) – EF reference package 3.1

Categoria di impatto	Fattori di normalizzazione	Fattori di ponderazione	Rilevanza
Risorse materiali: metalli/minerali	0.05786056	7.55%	11.39%
Assottigliamento dell'ozono	0.023354856	6.31%	0.07%
Formazione di particolato	0.000636667	8.96%	7.04%
Formazione di ossidanti fotochimici: salute umana	40.60390173	4.78%	5.05%
Uso dell'acqua	11468.70864	8.51%	3.95%

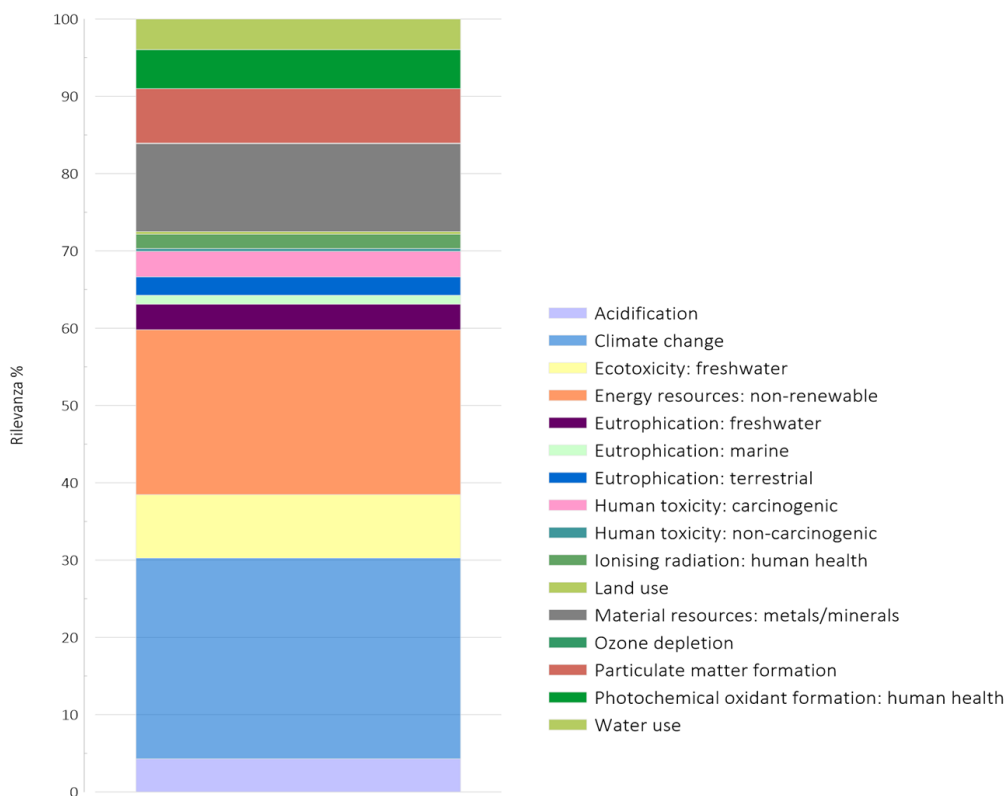


Figura 5.1 Cloruro Ferrico. Categorie d'impatto normalizzate e ponderate secondo il metodo EF (UE)

Secondo la definizione data dall'Unione Europea le categorie di impatto più critiche sono quelle che, in base ai risultati normalizzati e ponderati, cumulativamente contribuiscono all'impatto ambientale totale per l'80%. In base a questa definizione le categorie più critiche relativamente alla produzione di cloruro ferrico essere quelle evidenziate in Tabella 5.3, ossia:

- il cambiamento climatico (26%)
- Utilizzo di risorse non rinnovabili (21%)
- Utilizzo di metalli e minerali (11%)
- Ecotossicità delle acque dolci (8%)
- l'emissione di particolato (7%)
- Ossidazione fotochimica (5%)
- l'acidificazione (4%)

Relativamente al parametro Climate Change, ovvero la Carbon Footprint del prodotto, che risulta essere 0.361 Kg CO₂, in Figura 5.2 si riporta un'analisi dei contributi dei singoli processi che concorrono alla produzione del cloruro ferrico.

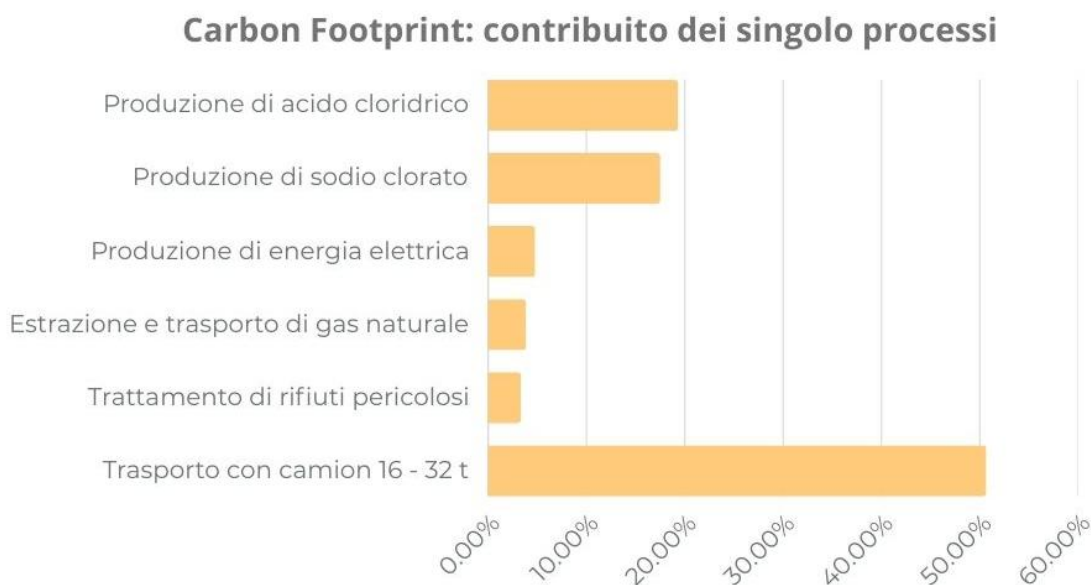


Figura 5.2 Contributo al valore di carbon footprint del cloruro ferrico.

Dall'analisi del diagramma a barre si osserva che il contributo maggiore, in termini di Kg CO₂, è dato dal trasporto su gomma, relativo sia alla soluzione esausta in ingresso sia alla fase di trasporto e smaltimento dei rifiuti derivati dal processo (50.66%). Secondariamente l'impatto sulla carbon footprint è dovuto alla produzione di acido cloridrico (19.33%) e di sodio clorato (17.51%).

La produzione e l'utilizzo di energia elettrica contribuisce per il 5%, mentre l'utilizzo di metano per il 3.84% e lo smaltimento di rifiuti pericolosi derivati dal processo per il 3.34%.

Il valore di Carbon Footprint ottenuto in questo studio è stato confrontato con il dato di letteratura fornito dal Database Ecoinvent 3.10. All'interno del database per il cloruro ferrico è riportato il processo "*Iron(III) chloride production, product in 40% solution state*", che rappresenta la produzione di 1 kg di cloruro ferrico come soluzione acquosa commerciale con una concentrazione del 40% in peso di cloruro ferrico. Tra le materie prime è comunque compreso l'utilizzo di soluzioni acide di decappaggio. Il valore di Carbon Footprint relativo al processo citato come riferimento per un confronto con questo studio è di 0.848 Kg CO₂, e, circa il doppio del valore relativo al processo Ageco Due.

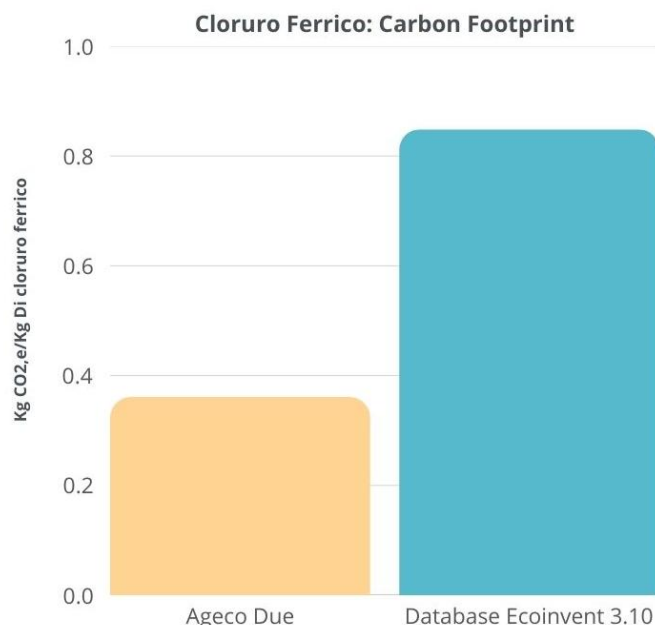


Figura 5.3 Carbon Footprint: confronto tra i risultati di questo studio ed il database Ecoinvent 3.10.

5.2 Cloruro ferroso

In modo analogo si riportano i risultati dello studio LCA relativo alla produzione di cloruro ferroso, il cui processo impatta oltre il 96% in atmosfera e per l'4% nelle acque.

In Tabella 5.4 si riporta l'impatto relativo alla produzione del cloruro ferroso nella componente atmosfera da cui si evince che, come per il ferrico, i composti rilasciati in maggiore quantità sono la CO₂, sia di origine fossile che non fossile.

Tabella 5.4 Cloruro ferroso: emissioni in aria: kg emessi dei composti rilasciati in maggiore quantità

Composto	Quantità [kg]
CO ₂ – fossile	0.0995
CO ₂ – non fossile	0.0017
Metano	0.0004

In Tabella 5.5 si riporta gli indicatori di impatto relativi alla produzione e trasporto di cloruro ferroso ai sensi del metodo dell'Environmental Footprint.

Tabella 5.5 Produzione di cloruro ferroso: indicatori di impatto riferiti all'Unità Funzionale (U.F.: 1 kg di cloruro ferroso)

Categoria d'impatto	Unità di misura	Risultato
Acidificazione	mol H ⁺ -Eq	0.000
Cambiamenti climatici	kg CO ₂ -Eq	0.113
Cambiamenti climatici: biogenico	kg CO ₂ -Eq	6.59E-05
Cambiamenti climatici: fossile	kg CO ₂ -Eq	0.112
Cambiamenti climatici: uso del suolo	kg CO ₂ -Eq	3.38E-05
Ecotossicità: acqua dolce	CTUe	0.443
Ecotossicità: acqua dolce, inorganici	CTUe	0.274
Ecotossicità: acqua dolce, organici	CTUe	0.169
Risorse energetiche: non rinnovabili	MJ, net calorific value	1.591
Eutrofizzazione: acqua dolce	kg P-Eq	1.14E-05
Eutrofizzazione: marina	kg N-Eq	1.62E-04
Eutrofizzazione: terrestre	mol N-Eq	1.68E-03
Tossicità umana: cancerogena	CTUh	6.98E-10
Tossicità umana: non cancerogena	CTUh	9.86E-10
Radiazioni ionizzanti: salute umana	kBq U235-Eq	0.003
Uso del suolo	dimensionless	0.839
Risorse materiali: metalli/minerali	kg Sb-Eq	3.44E-07
Assottigliamento dell'ozono	kg CFC-11-Eq	2.20E-09
Formazione di particolato	disease incidence	7.94E-09
Formazione di ossidanti fotochimici: salute umana	kg NMVOC-Eq	0.001
Uso dell'acqua	m ³ world Eq deprived	0.010

Anche per il cloruro ferroso è stata effettuata una normalizzazione ed una ponderazione dei risultati (Figura 5.4), secondo quanto descritto al Paragrafo 5.1, per individuare i composti che concorrono all'impatto ambientale totale per l'80%, ovvero:

- il cambiamento climatico (31%)
- Utilizzo di risorse non rinnovabili (20%)
- l'emissione di particolato (11%)
- Ossidazione fotochimica (7.5%)
- Ecotossicità delle acque dolci (7.3%)
- l'acidificazione (5.1%)

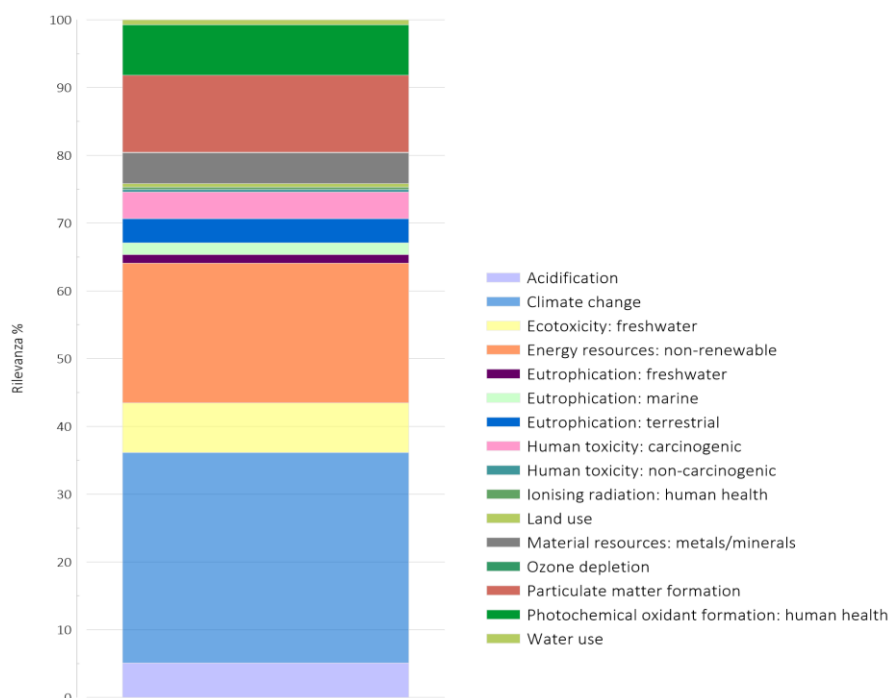


Figura 5.4 Cloruro ferroso: categorie d'impatto normalizzate e ponderate secondo il metodo EF (UE)

Relativamente al parametro Climate Change, ovvero la Carbon Footprint del prodotto, che risulta essere 0.113 Kg CO₂, in Figura 5.5 si riporta un'analisi dei contributi dei singoli processi che concorrono alla produzione del cloruro ferrico. Come si evince dal grafico anche per il cloruro ferroso l'impatto maggiore sulla carbon footprint è dato dal trasporto su strada.

Carbon Footprint: contributo dei singoli processi

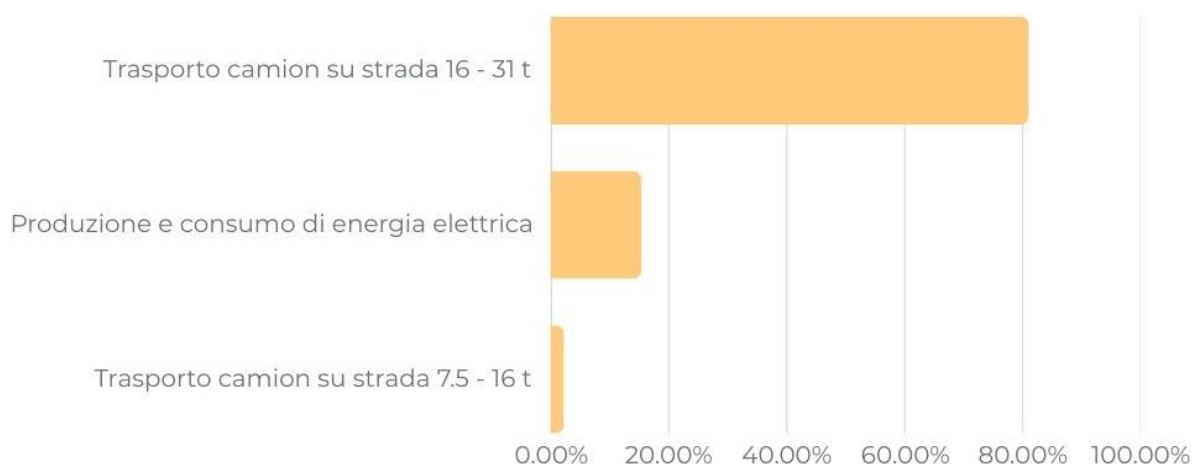


Figura 5.5 Contributo al valore di carbon footprint del cloruro ferroso.

Come per il ferrico, il valore della carbon footprint relativo al cloruro ferroso è stato confrontato con il dato di letteratura fornito dal Database Ecoinvent 3.10. All'interno del database per il cloruro ferrico è riportato il processo "*Iron(II) chloride production*". Il valore di Carbon Footprint relativo al processo citato come riferimento per un confronto con questo studio è di 0.222 Kg CO_{2,e}, circa il doppio del valore relativo al processo Ageco Due (Figura 5.6).

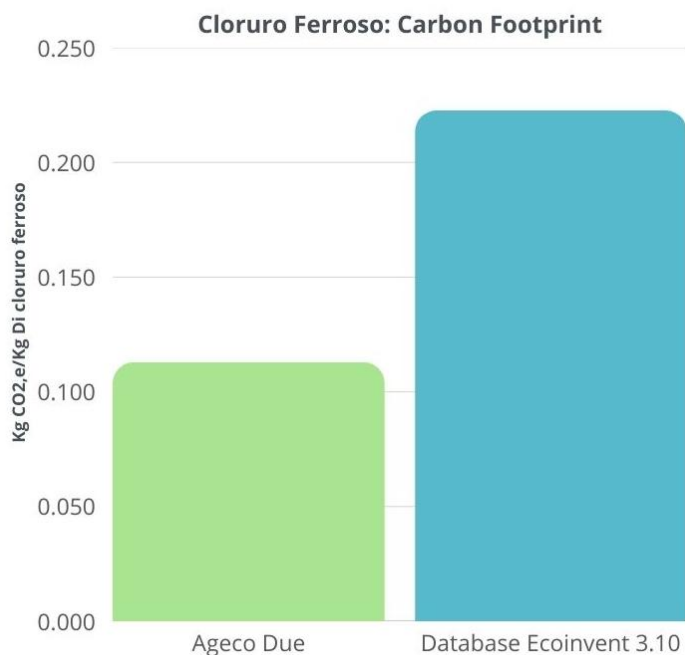


Figura 5.6 Cloruro ferroso. Carbon Footprint: confronto tra i risultati di questo studio ed il database Ecoinvent 3.10.

6 Analisi dell'incertezza

La stima dell'incertezza è una tematica ampiamente dibattuta e fondamentale nell'ambito LCA, indispensabile per individuare l'incidenza dell'incertezza relativa ai dati in ingresso al sistema. Spesso, infatti, l'incertezza legato ad uno studio LCA può assumere un ruolo importante, tanto che rappresentare i risultati come valori puntuali possa diventare fuorviante.

All'interno di uno studio LCA esistono due tipologie di incertezza:

- la normale incertezza legata alla determinazione del parametro all'interno del sistema, che può essere calcolata direttamente dai dati in input;
- la definizione del valore associato al parametro da modellare in un altro sistema simile (Steen B., 1997).

Spesso, a causa di un'unica sorgente di dati, può risultare difficile se non impossibile valutare quantitativamente l'incertezza di un dato.

Per questo il database Ecoinvent utilizza una procedura semplificata che associa valori quantitativi ad una valutazione qualitativa degli indicatori di quantità dei dati, attraverso una matrice di pedigree.

La *Pedigree Matrix* è stata introdotta nell'analisi dell'incertezza da Funtowicz e Racetz nel 1990 con il fine di trasformare un giudizio qualitativo in una serie di criteri specifici in scala numerica, con i criteri come colonne della matrice e i valori numerici come righe. I criteri considerati sono:

- affidabilità (U_1);
- completezza (U_2);
- correlazione temporale (U_3);
- correlazione geografica (U_4);
- ulteriori correlazioni tecnologiche (U_5).

In questo modo ad ogni singolo criterio viene assegnato dall'operatore un punteggio da 1 a 5.

Ad ogni punteggio è associato un fattore di incertezza (Tabella 6.1), utilizzato per il calcolo della deviazione standard secondo la formula presentata da Weidema et al. (1996).

Nella formula di calcolo è inoltre presente anche un fattore di incertezza di base. Tale fattore tiene conto dell'incertezza di base intrinseca che c'è nei dati: possono infatti esserci fluttuazioni nel tempo, errori di misura, ecc.

Tabella 6.1 Fattori di incertezza per calcolo deviazione standard (Frischknecht Jungbluth 2004)

Indicatore	1	2	3	4	5
Affidabilità (U_1)	1.00	1.05	1.10	1.20	1.50
Completezza (U_2)	1.00	1.02	1.05	1.10	1.20
Correlazione temporale (U_3)	1.00	1.03	1.10	1.20	1.50
Correlazione geografica (U_4)	1.00	1.01	1.02	---	1.10

Ulteriori correlazioni tecnologiche (U ₅)	1.00	---	1.20	1.50	2.00
---	------	-----	------	------	------

La formula di calcolo della deviazione standard geometrica (Weidema et al. 1996) viene applicata in Ecoinvent sotto l'assunzione che gli scambi elementari e intermedi siano distribuiti in modo log-normale.

In Tabella 6.2 si riportano i valori dei criteri assegnati per i fattori di caratterizzazione relativi al processo di produzione del cloruro ferrico.

Tabella 6.2 Valori assegnati ai criteri di incertezza – Processo di produzione di cloruro ferrico

Flusso	U1	U2	U3	U4	U5
electricity, high voltage	2	1	1	1	1
hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	1	1	1	1	1
natural gas, high pressure	1	1	1	1	1
neutralising agent, sodium hydroxide-equivalent	2	1	1	1	1
sodium chlorate, powder	1	1	1	1	1
transport, freight, light commercial vehicle	2	1	1	2	1
transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4	2	1	1	2	1
transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4	2	1	1	2	1

In Tabella 6.3 sono riportati i valori dei criteri assegnati ai fattori di caratterizzazione relativi al processo di produzione del cloruro ferroso.

Tabella 6.3 Valori assegnati ai criteri di incertezza – Processo di produzione del cloruro ferroso

Flow	U1	U2	U3	U4	U5
electricity, high voltage	2	1	1	1	1
iron pellet	1	1	1	1	1
neutralising agent, sodium hydroxide-equivalent	2	1	1	1	1
transport, freight, light commercial vehicle	2	1	1	2	1
transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4	2	1	1	2	1
transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4	2	1	1	2	1
transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4	2	1	1	2	1
Water, well, in ground	2	1	1	1	1
transport, freight, light commercial vehicle	2	1	1	1	1

Si procede poi con l'analisi quantitativa dell'incertezza che può essere effettuata attraverso un campionamento statistico o mediante formule analitiche basate sulla propagazione dell'errore. Esistono molti possibili approcci matematici per valutare la propagazione dell'incertezza dei dati o dei fattori di caratterizzazione, il cui più comune è l'analisi di Monte Carlo (Groen et al. 2014). Altri

approcci includono l'espansione in serie di Taylor e la "fuzzy interval arithmetic". In sostanza, questi metodi svolgono la stessa funzione, cioè, propagare l'incertezza dei parametri.

L'analisi di Monte Carlo è usata per trarre stime attraverso simulazioni basandosi su un algoritmo che genera una serie di numeri tra loro non correlati, che seguono la distribuzione di probabilità supposta per il fenomeno da indagare.

La simulazione Monte Carlo calcola una serie di realizzazioni possibili del fenomeno in esame, con il peso proprio della probabilità di tale evenienza, cercando di esplorare in modo denso tutto lo spazio dei parametri del fenomeno. Una volta calcolato questo campione casuale, la simulazione esegue delle 'misure' delle grandezze di interesse su tale campione. La simulazione Monte Carlo è ben eseguita se il valore medio di queste misure sulle realizzazioni del sistema converge al valore vero.

La simulazione di Monte Carlo è stata impostata:

- con un criterio di fermata a 1000 iterazioni per garantire equilibrio tra l'accuratezza della stima e il costo computazionale, così come il tempo impiegato per ottenerla;
- con un intervallo di copertura pari al 95%.

In Tabella 6.4 si riportano i valori ottenuti dalla simulazione Monte Carlo relativi alla categoria d'impatto climate change.

Tabella 6.4 Risultati della simulazione Monte Carlo

Categoria d'impatto	UdM	Mediana	5%	95%
Climate change (GWP100) – Cloruro Ferrico	kg CO _{2,e}	0.38	0.35	0.42
Climate change (GWP100) – Cloruro Ferroso	kg CO _{2,e}	0.11	0.10	0.13

Nell'elaborazione dei risultati ottenuti dalla simulazione Monte Carlo, è necessario innanzitutto eseguire una valutazione di quelli che vengono definiti 'outlier'.

Gli outlier rappresentano valori anomali o estremi che si discostano significativamente dalla distribuzione principale dei dati. In un contesto statistico o di simulazione Monte Carlo, possono indicare osservazioni rare o errori di misurazione e la loro identificazione è fondamentale al fine di garantire la qualità dell'analisi e l'interpretazione corretta dei risultati.

Un outlier è, quindi, comunemente definito come un dato che si trova al di fuori di un intervallo previsto o accettabile. Questo intervallo può essere determinato da metriche statistiche, quali la valutazione dei quartili, che nel caso in esame sono il 25° e il 75°, e dell'IQR, ossia l'interquartile range. L'outlier è un dato che si trova oltre 1.5 volte l'IQR rispetto ai quartili, quindi rispetto al 25° e al 75°. Valori inferiori a o superiori sono considerati outlier. La valutazione degli outlier aiuta a identificare fonti di variabilità nei risultati della simulazione e di conseguenza a migliorare la robustezza del modello.

In Figura 6.1 si riporta il grafico che riporta il box dei valori compresi tra il 25° e il 75° e i dati che si trovano tra 1.5 volte l'IQR rispetto ai quartili, con gli outlier che sono quei valori che invece si trovano oltre.

La valutazione degli outlier è quindi necessaria per identificare i risultati della simulazione che si trovano in un range accettabile, e con i quali è possibile costruire l'istogramma. In particolare, nel caso qua analizzato si registra una frequenza del 94.3% di intercettare un risultato che non sia un outlier.

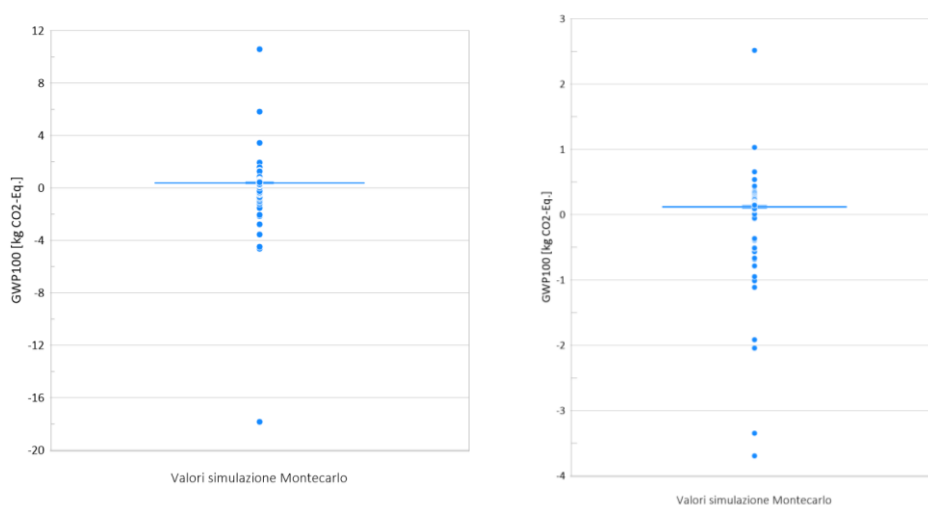


Figura 6.1 Analisi Monte Carlo: grafico raffigurante i valori compresi in un range accettabile e quelli identificati come outlier, a sinistra il cloruro ferrico e a destra il cloruro ferroso.

Identificati i risultati accettabili e che non sono quindi outlier, si procede con la costruzione dell'istogramma, riportato in Figura 6.2. L'istogramma è utilizzato per rappresentare la distribuzione dei risultati. Esso suddivide il range dei valori osservati in classi o intervalli (detti bin) e ne mostra la frequenza attraverso barre di altezza proporzionale al numero di osservazioni contenute in ciascun intervallo.

Sull'istogramma si vanno a rappresentare, inoltre, dei valori che offrono una visione statistica essenziale per comprendere la variabilità e la distribuzione dei dati.

In particolare, il valore medio (μ) rappresenta la tendenza 'centrale' della distribuzione dei dati e rappresenta un punto di riferimento per la distribuzione stessa. Esso indica il risultato tipico o atteso dal caso in esame.

La deviazione standard (σ) è una misura di dispersione, che quantifica quanto i dati, in media, si discostano dalla media stessa. Una deviazione standard elevata indica una maggiore dispersione dei dati rispetto alla media, mentre una deviazione standard bassa segnala una distribuzione più concentrata attorno al valore medio.

Nell'istogramma si riporta il valore medio ed inoltre il valore medio \pm deviazione standard: questo definisce il limite inferiore, nel caso di sottrazione, e il limite superiore, nel caso di somma,

di una regione intorno al valore medio che include molti dei risultati ottenuti, evidenziando il grado di variazione verso valori più bassi e più alti, rispettivamente.

Dalla Figura 6.2 è possibile verificare come il risultato del GWP100, per entrambi i processi, sia compreso nell'intervallo identificato da $\mu \pm 2.5 \sigma$, avvalorando la bontà dello studio.

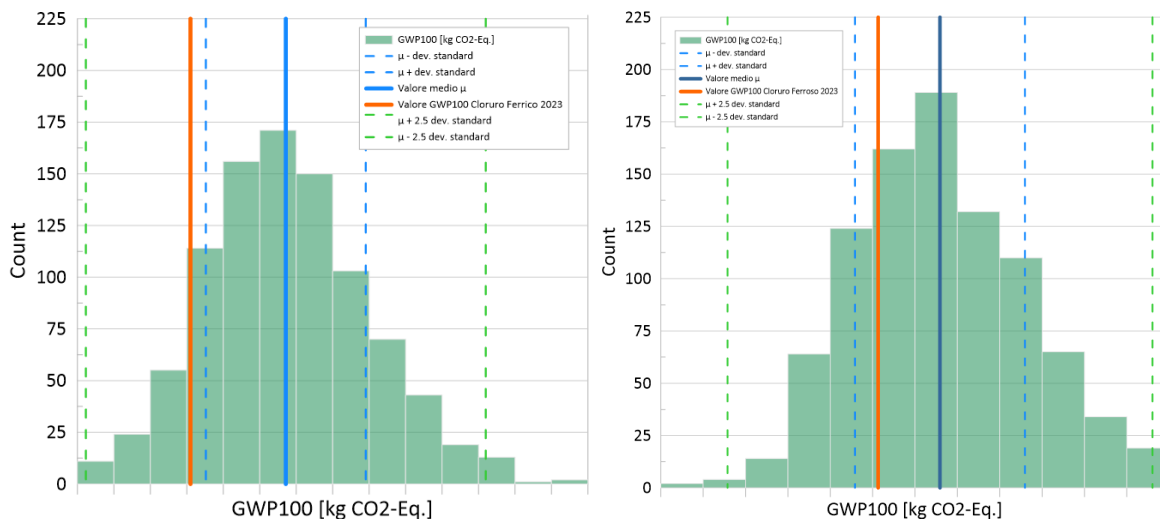


Figura 6.2 Analisi Monte Carlo: istogramma dei risultati ottenuti, a sinistra il cloruro ferrico e a destra il cloruro ferroso.

7 Conclusioni

Lo studio di Analisi del Ciclo di Vita (LCA) condotto su Ageco Due ha permesso di valutare l'impatto ambientale associato alla produzione del cloruro ferrico e ferroso dal recupero degli acidi esausti di decapaggio.

L'analisi è stata sviluppata seguendo gli standard internazionali UNI EN ISO 14040:2021 e UNI EN ISO 14044:2021, al fine di garantire un approccio metodologico rigoroso e una valutazione affidabile degli impatti ambientali.

Lo studio si inserisce in un contesto di economia circolare, con l'intento di ottimizzare la sostenibilità dei processi produttivi e ridurre l'impronta ecologica dell'azienda.

La metodologia adottata ha previsto la suddivisione del ciclo di vita in tre fasi: upstream (materie prime e trasporto dei rifiuti in ingresso), core (processo produttivo), e downstream (trasporto al cliente finale). I dati sono stati raccolti combinando informazioni primarie fornite da Ageco Due con dati secondari estratti dal database Ecoinvent 3.10. Il software OpenLCA 2.2.0 è stato utilizzato per elaborare i dati e calcolare gli indicatori di impatto ambientale, tra cui la Carbon Footprint espressa in kg CO₂e.

I risultati dello studio hanno evidenziato che la produzione del cloruro ferrico da parte di Ageco Due comporta un'impronta di carbonio significativamente inferiore rispetto ai valori riportati nella letteratura scientifica e nei database di riferimento. Nello specifico la Carbon Footprint del cloruro ferrico prodotto da Ageco Due è risultata pari a 0,361 CO₂e per kg di prodotto, contro lo 0,848 kg CO₂ registrato per processi analoghi presenti nel database Ecoinvent 3.10. Il contributo alle emissioni di CO₂e per il cloruro ferrico prodotto da Ageco Due è principalmente dovuto al trasporto su gomma delle materie prime e dei rifiuti, che incide per il 50,66% sull'impronta ambientale totale. Segue la produzione di acido cloridrico, responsabile del 19,33% delle emissioni, e la produzione di sodio clorato, che contribuisce per il 17,51%. Il consumo energetico ha invece un'incidenza minore, pari al 5%, tuttavia l'utilizzo di energia da fonti rinnovabili comporterebbe un'ulteriore riduzione degli impatti ambientali.

Per il cloruro ferroso il confronto con i dati di letteratura mostra risultati altrettanto significativi. La Carbon Footprint del cloruro ferroso prodotto da Ageco Due è risultata pari a 0,113 kg CO₂e, mentre il valore riportato nel database Ecoinvent per processi analoghi è di 0,222 kg CO₂. Questo significa che l'impatto del cloruro ferroso di Ageco Due è ridotto di oltre il 55% rispetto ai valori di riferimento, confermando l'efficienza del processo di recupero e la minore impronta ambientale rispetto ai metodi convenzionali.

Per il cloruro ferroso, le principali categorie di impatto ambientale si distribuiscono in maniera diversa rispetto al ferrico. Anche in questo caso, il trasporto delle materie prime e dei rifiuti costituisce la voce predominante, incidendo per circa il 45,12% sull'impronta di carbonio complessiva.

In conclusione, l'LCA ha confermato che la produzione di cloruro ferrico e ferroso presso Ageco Due rappresenta un modello di sostenibilità per l'industria chimica, contribuendo alla riduzione dell'impatto ambientale rispetto ai processi tradizionali basati su materie prime vergini.

I risultati dello studio offrono informazioni utili per ulteriori miglioramenti nei processi di produzione e logistica, promuovendo soluzioni più efficienti e nell'ottica di una riduzione degli impatti ed un miglioramento continuo delle performance ambientali.

8 Bibliografia - Sitografia

UNI EN ISO 14040:2021 Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines

UNI EN ISO 14044:2021 Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines

UNI EN ISO 14067:218 Gas ad effetto serra – Impronta climatica e dei prodotti (Carbon Footprint dei prodotti) – Requisiti e linee guida per la quantificazione.

Green Delta, February 2020 – openLCA 1.10 Comprehensive User Manual

Andrea Ciroth, May 2012 – Refining the pedigree matrix approach in ecoinvent

Weidema et al., 1996 – Data quality management for life cycle inventories – an example of using data quality indicators

Weidema et al., 2013 - Overview and methodology – Data quality guideline for Ecoinvent database versione 3

Groen et al., 2014 – Methods for uncertainty propagation in life cycle assessment

https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods_en

https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods/about-environmental-footprint-methods_en

Guide for EF compliant data sets – Version 2.0 – JRC Technical Report – 2020 – Fazio S., Zampori L., De Schryver A., Kusche O., Thellier L., Diaconu E.

https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods/pef-method_en

<https://ecochain.com/blog/impact-categories-lca/>

Understanding Product Environmental Footprint and Organisation Environmental Footprint methods – European Commission - 2021

Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method – JRC Technical Report – 2019 – Zampori L., Pant R.