POLITECNICO MILANO 1863

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

Recenti progetti del Gruppo di ricerca AWARE

(Assessment on WAste and REsources)

Dicembre 2024

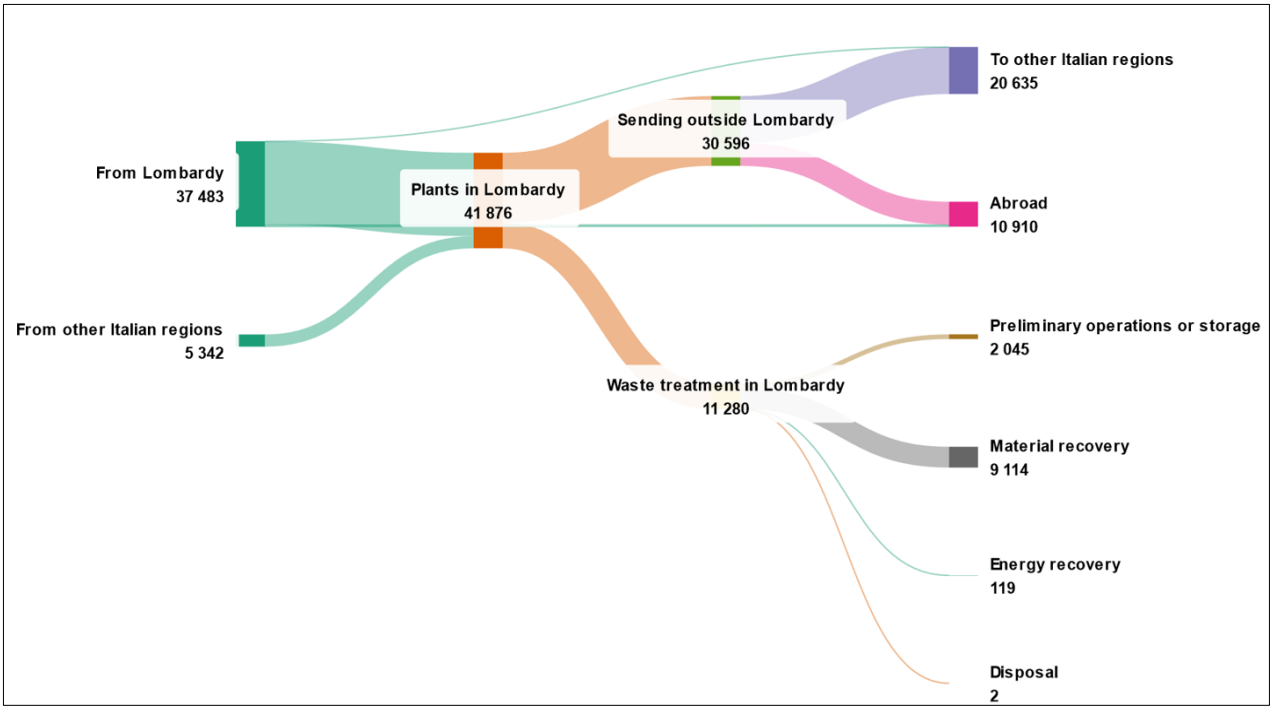
www.aware.polimi.it

Responsabili scientifici: Mario Grosso e Lucia Rigamonti

Gruppo di lavoro: Samuele Abagnato, Andrea Amadei, Gaia Brussa, Giulia Cavenago, Giuseppe Cecere, Giovanni Dolci, Stefano Puricelli, Camilla Tua, Francesca Villa, Paula Martina Barbato, Mary Jo Nichilo, Michelle Eid

Applicazione di Material Flow Analysis e Life Cycle Assessment alla filiera di gestione dei rifiuti tessili in Lombardia

Il progetto di ricerca rientra in un dottorato sostenuto da Regione Lombardia, con l'obiettivo di approfondire la conoscenza della filiera di gestione dei rifiuti tessili, e andando a stimare i potenziali impatti ambientali del sistema di gestione attraverso la metodologia LCA. È stata applicata una Material Flow Analysis (MFA) a diversi tipi di rifiuti tessili prodotti e gestiti in Lombardia. Sono poi state svolte analisi statistiche sulla quantità di rifiuti tessili urbani raccolti nei comuni della Lombardia dal 2017 al 2022. Infine, è in corso un focus sui rifiuti tessili post-consumo, per cui è stata stimata la composizione, applicando una MFA per lo scenario di gestione corrente. La metodologia LCA verrà utilizzata per stimare gli impatti ambientali dello scenario corrente, che saranno confrontati con uno scenario futuro, in cui si assumono una maggiore raccolta differenziata e una maggiore disponibilità di tecnologie di riciclo.



MFA per rifiuti tessili post-consumo prodotti e gestiti in Lombardia. Dati in tonnellate per l'anno 2021

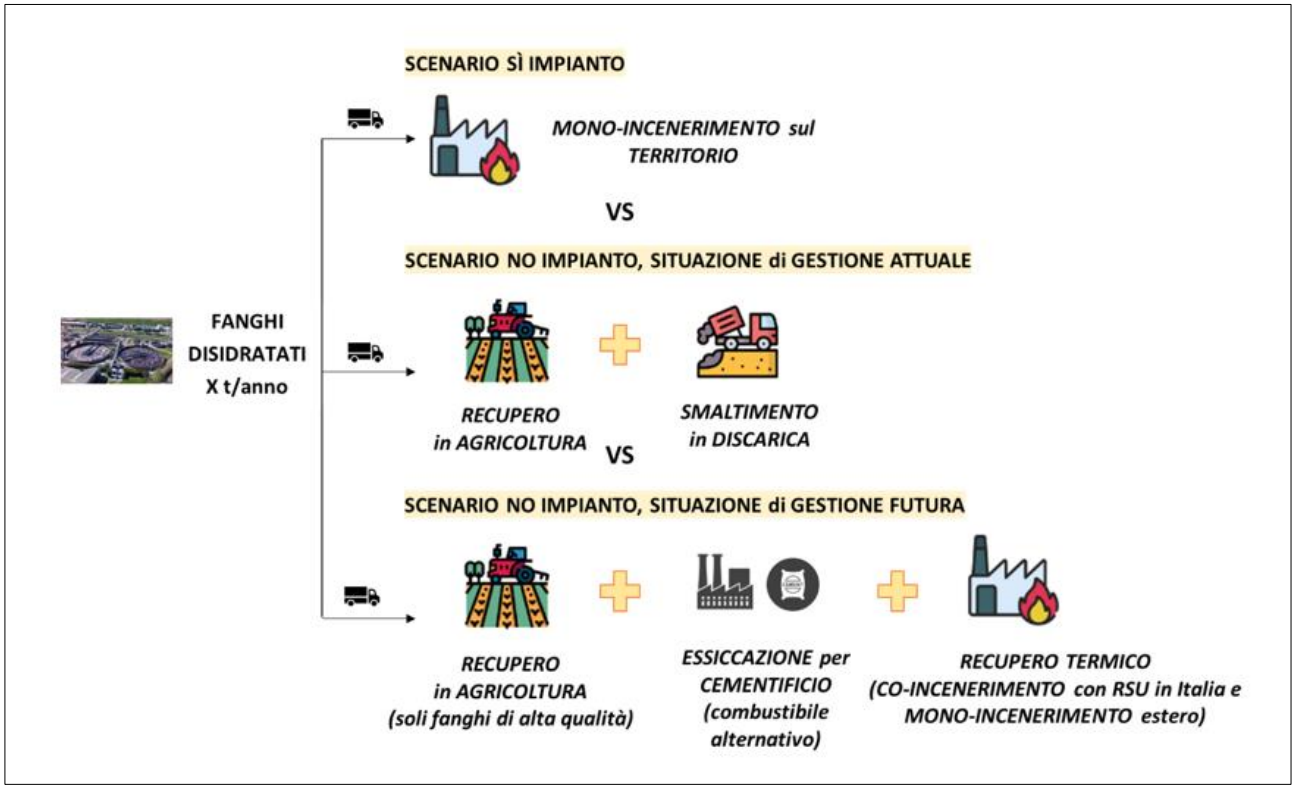
Abagnato, S., Grosso, M., Rigamonti, L., 2024. Analysis of textile waste streams for regional planning: the Lombardy region case study. Proceedings SIDISA 2024 - XII International Symposium on Environmental Engineering, pp. 834-837.

Impatti sociali nella valutazione della sostenibilità di tecnologie emergenti per il settore della gestione dei rifiuti

Il progetto di ricerca, sviluppato durante tre anni di dottorato, è incentrato sulla metodologia di Social Life Cycle Assessment (S-LCA) e su come introdurre i suoi risultati nelle valutazioni di Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA). La LCSA presenta difficoltà legate alla mancanza di metodi standardizzati per combinare le diverse dimensioni di analisi, portando a risultati molto diversificati. La ricerca evidenzia un'applicazione squilibrata tra le metodologie LCA, S-LCA e LCC nel settore della gestione dei rifiuti, dovuta principalmente alla relativa novità della S-LCA e alla difficoltà nel reperire i dati primari per portare avanti questo tipo di analisi. Per fornire delle linee guida nella standardizzazione applicativa della metodologia, soprattutto in fase di selezione degli indicatori da analizzare, sono stati utilizzati diversi strumenti al fine di rendere la prassi metodologica nel settore della gestione dei rifiuti più strutturata e coerente.

La metodologia LCA come supporto per la fase autorizzativa di nuovi impianti di trattamento rifiuti e reflui

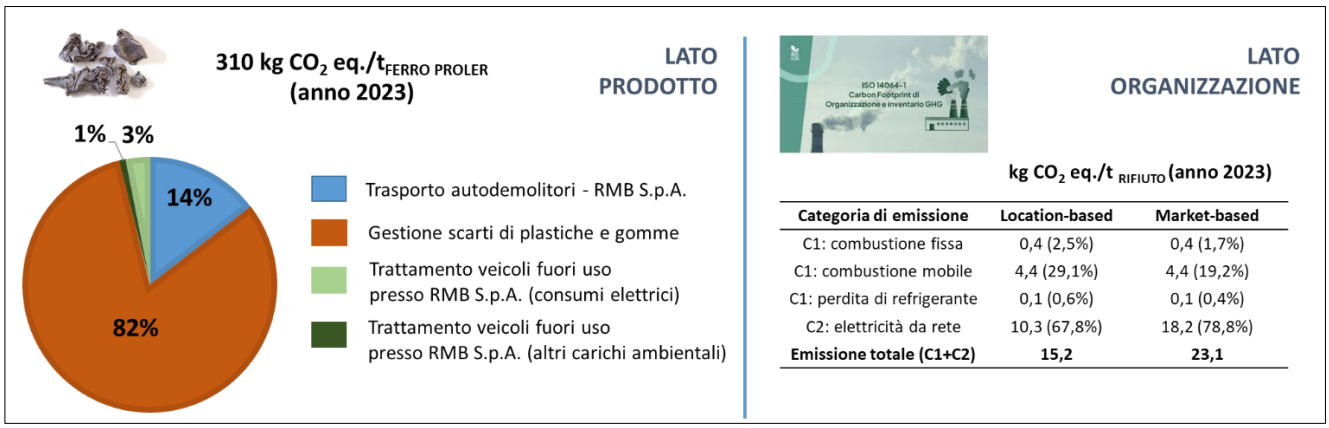
Recentemente il gruppo di ricerca AWARE ha utilizzato la metodologia LCA come strumento di supporto per quantificare e valutare le prestazioni ambientali di alcuni impianti di trattamento di rifiuti solidi urbani, fanghi da depurazione civile e reflui zootecnici in fase di autorizzazione nel Nord Italia. Le analisi svolte sono state impostate come LCA comparative andando a confrontare lo scenario di gestione di una certa tipologia di rifiuto/refluo presso l'impianto in fase autorizzativa con uno o più scenari alternativi che si focalizzano sulla gestione della medesima tipologia di rifiuto/refluo nel caso in cui l'opera non venisse realizzata. Il confronto tra gli scenari è avvenuto considerando la stessa quantità di scarto da gestire, rappresentata generalmente dalla capacità di trattamento dell'impianto richiesta in fase autorizzativa o dalla produzione annuale dello scarto nel contesto geografico in cui si dovrebbe andare a collocare l'impianto stesso.



Scenari e confini del sistema

LCA come strumento di supporto per un'azienda di trattamento rifiuti nel contesto dell'economia circolare

RMB S.p.A., una delle principali piattaforme europee per il trattamento finalizzato al recupero di rifiuti speciali, pericolosi e non (quali veicoli fuori uso - VFU e ceneri pesanti da incenerimento), ha in essere un contratto di ricerca con il gruppo AWARE per valutare e ottimizzare le performance ambientali dei propri prodotti e dell'organizzazione in un'ottica di economia circolare. In relazione ai prodotti, è in fase di svolgimento una Carbon Footprint finalizzata alla valutazione delle emissioni di gas ad effetto serra per due prodotti dell'azienda riconosciuti come End Of Waste e ottenuti dal trattamento di VFU (Ferro Proler e Resal). Parallelamente, è stata effettuata una Carbon Footprint di organizzazione secondo la norma ISO 14064-1. La valutazione ha riguardato il calcolo delle emissioni di categoria 1 (emissioni dirette) e 2 (emissioni indirette dall'importazione di energia elettrica) in accordo con l'approccio *location-based* e *market-based*.



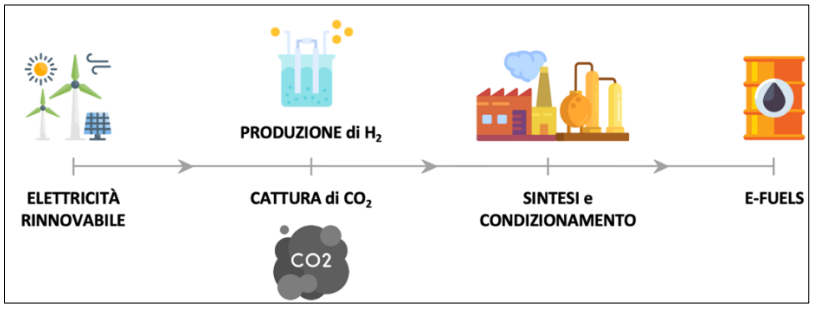
Categoria di emissione	Location-based	Market-based
C1: combustione fissa	0,4 (2,5%)	0,4 (1,7%)
C1: combustione mobile	4,4 (29,1%)	4,4 (19,2%)
C1: perdita di refrigerante	0,1 (0,6%)	0,1 (0,4%)
C2: elettricità da rete	10,3 (67,8%)	18,2 (78,8%)
Emissione totale (C1+C2)	**15,2**	**23,1**

Analisi di carbon footprint

Dolci G., Tua C., Crippa I., Grosso M., Rigamonti L. LCA studies to support a waste treatment company in the context of the circular economy. 32th CIRP Conference on Life Cycle Engineering (LCE 2025). Paper under review.

Il potenziale degli e-fuels nel settore automobilistico

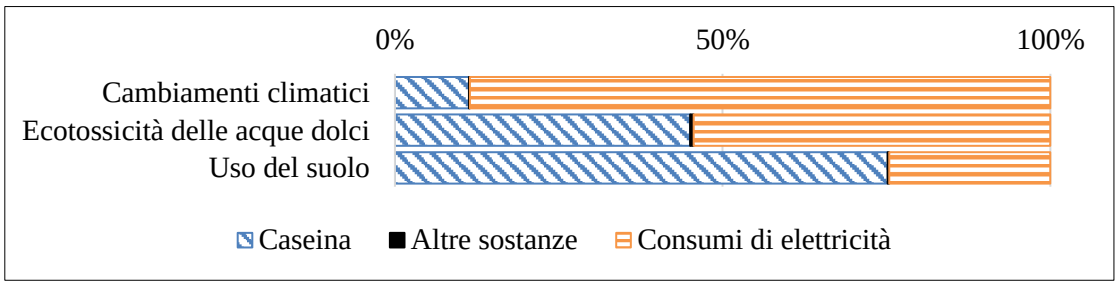
Negli ultimi anni, gli electrofuels (e-fuels) sono emersi come una soluzione promettente per la decarbonizzazione del settore automobilistico. Gli e-fuels sono carburanti sintetici prodotti a partire da idrogeno e carbonio mediante l'utilizzo di energia rinnovabile. Grazie alle loro proprietà fisico-chimiche, simili a quelle dei carburanti fossili convenzionali, possono essere utilizzati nelle infrastrutture esistenti senza richiedere modifiche significative. Tuttavia, la loro produzione su larga scala è fortemente limitata dalla domanda energetica elevata e dall'impiego di tecnologie ancora in fase di sviluppo. L'e-diesel e l'e-benzina sono essenzialmente privi di zolfo e azoto e presentano un contenuto minore di composti aromatici rispetto ai carburanti di origine fossile. Pertanto, la loro combustione nelle autovetture può generare gas di scarico meno dannosi per l'ambiente e per la salute umana. Il beneficio ambientale complessivo degli e-fuels, però, resta difficile da definire in maniera definitiva in quanto strettamente dipendente dal tipo di energia impiegata nella loro produzione. Questa ricerca è sviluppata all'interno di un percorso di dottorato in accordo con Innovhub - Stazioni Sperimentali per l'Industria S.r.l.



Rappresentazione schematica delle fasi principali della filiera produttiva degli e-fuels.

Valutazione degli impatti ambientali di film biodegradabili a base di caseina

Il gruppo AWARE ha condotto un'analisi LCA di film biodegradabili a base di caseina, sviluppati nel progetto PNRR Ecosister. I risultati hanno mostrato come il contributo principale agli impatti ambientali derivi dall'elettricità necessaria per produrre i film, seguita dalla caseina e infine dalle altre sostanze aggiunte. Un'eccezione è stata osservata nella categoria d'impatto *uso del suolo*, dove la caseina rappresenta il contributo dominante: il suo impatto ambientale è guidato dalla produzione di latte, che richiede suolo, grano e fertilizzanti. Nella categoria *ecotossicità delle acque dolci* il consumo di elettricità supera invece minimamente il contributo della caseina. Le analisi di sensibilità hanno evidenziato come l'impatto ambientale dei film potrebbe ridursi (con aumento dei benefici superiore al 50% per tutte le categorie) producendo caseina da latte scaduto e ottimizzando i consumi elettrici delle procedure sperimentali passando dalla scala di laboratorio alla vasta scala.

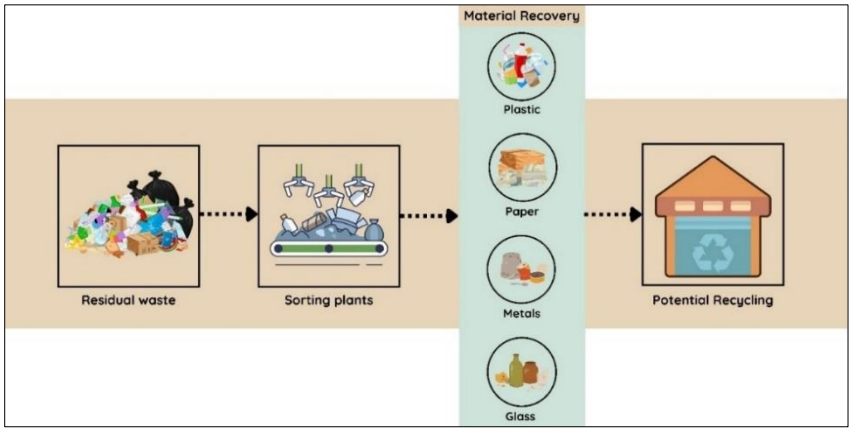


Analisi dei contributi per le categorie di impatto cambiamenti climatici, ecotossicità delle acque dolci e uso del suolo.

Dembech E., Sotgiu G., Donnadio A., Buoso S., Dolci G., Nichilo M.J.F.A, Sinisi V., 2024. Casein-based film enriched with lignin as a biodegradable substrate for enzyme immobilization. Submitted to the journal Material Advances (Royal Society of Chemistry).

Recupero di materia da rifiuti urbani indifferenziati: analisi sui tassi di recupero e sulla qualità dei materiali recuperati sulla base di dati primari

Questo studio, effettuato in accordo con il Joint Research Centre, mira a colmare le lacune osservate nella letteratura riguardo alle prestazioni degli impianti di selezione dei rifiuti solidi urbani residui, in termini di capacità di recupero di materiali riciclabili, con particolare enfasi sulla plastica. Dati primari sono stati raccolti da tre impianti di selezione in Norvegia, Spagna e Italia, per evidenziare l'impatto del contesto geografico sull'implementazione di pratiche di selezione simili in regioni diverse. È stata condotta un'analisi dei flussi in ingresso e in uscita per quantificare i tassi di recupero dei materiali riciclabili, tenendo conto anche della purezza dei materiali recuperati. È stata inoltre effettuata una valutazione qualitativa per stimare il potenziale di mercato dei materiali recuperati, per prezzi di mercato positivi o negativi. I risultati fanno luce sulle prestazioni di questi impianti e sul loro potenziale contributo al raggiungimento degli obiettivi delle politiche UE sul riciclo dei materiali per il prossimo decennio.

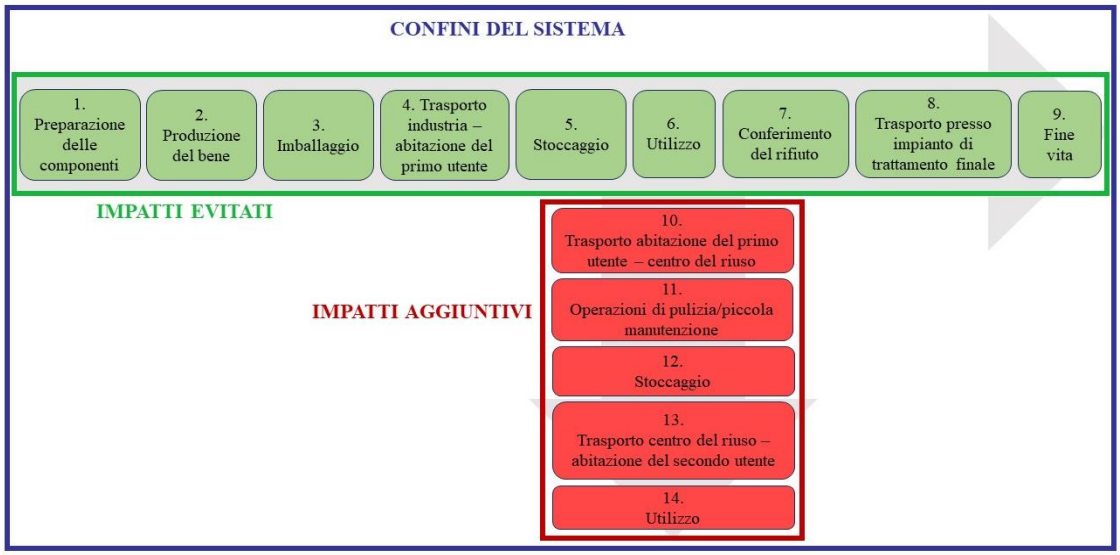


Schema di flusso dei processi di selezione analizzati

Quantificazione delle prestazioni ambientali delle principali attività gestite da CEM Ambiente SPA

CEM Ambiente SPA, azienda che offre un sistema integrato di servizi ambientali a diversi comuni del nord Italia, ha commissionato ad AWARE degli studi per quantificare le proprie prestazioni ambientali e individuare politiche di riduzione dei propri impatti. Di seguito alcune delle analisi svolte:

- valutazione LCA di un impianto che si occupa del trattamento e del recupero dei rifiuti provenienti dallo spazzamento stradale. I risultati mostrano che i benefici ambientali derivanti dalle operazioni di recupero dei rifiuti non compensano, per nessuna categoria di impatto analizzata, gli impatti derivanti dal trasporto e dal trattamento degli stessi. Va comunque tenuto in considerazione che la raccolta dei rifiuti da spazzamento stradale rappresenta un'attività necessaria ad evitare la dispersione incontrollata di contaminanti nell'ambiente e l'analisi LCA non considera questi benefici.
- valutazione LCA dell'attività di gestione dei rifiuti urbani (indifferenziati, frazioni imballaggi e organico) prodotti nel 2022 e raccolti secondo la modalità porta a porta per i comuni di competenza di CEM. Il sistema studiato, che comprende il giro di raccolta dei rifiuti, i trasporti intermedi e il trattamento di rifiuti e scarti, presenta benefici ambientali per 15/16 categorie di impatto. In accordo con le assunzioni e i dati di inventario descritti nello studio, la gestione delle frazioni "imballaggi" risulta apportare dei benefici ambientali per 16/16 categorie di impatto, la gestione della frazione "organico" per 7/16 categorie di impatto e la gestione della frazione "indifferenziata" per 10/16 categorie di impatto.
- valutazione dei potenziali impatti ambientali associati alla pratica del riutilizzo promossa dal centro del riuso "Panta Rei" di Vimercate (MB). È stato sviluppato un modello basato sulla metodologia LCA, che ha considerato la prima vita del bene, i cui impatti sono *"evitati"* grazie al riutilizzo, la seconda vita del bene, i cui impatti sono *"aggiuntivi"*, e alcuni parametri (tassi di sostituzione, di qualità e di prestazione energetica), che riflettono il comportamento degli utenti e le caratteristiche del bene riutilizzato. Questo lavoro è stato premiato al convegno 2024 dell'Associazione Rete Italiana LCA come miglior articolo per la categoria "Giovani ricercatori e ricercatrici".

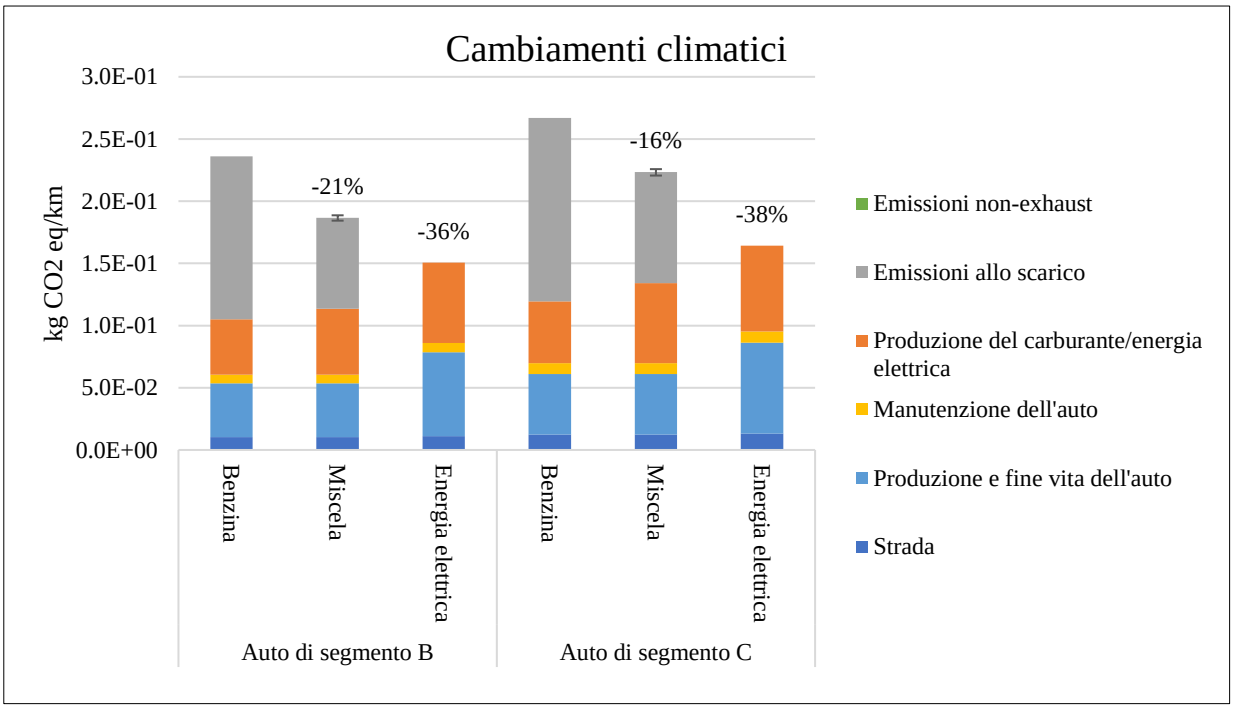


Confini del sistema per il riutilizzo di un bene usato.

Nichilo M.J.F.A., Cavenago G., Grosso M., Rigamonti L., 2024. Quantificazione delle prestazioni ambientali di un centro del riuso tramite metodologia LCA. Ingegneria Dell'Ambiente V.11 N.2 (2024)

Studio LCA di una miscela innovativa per auto a GPL

Lo studio ha analizzato gli impatti ambientali di un'autovettura *bi-fuel* alimentata con una miscela di GPL (60% m/m), bio-GPL (20% m/m) e dimetil etere rinnovabile (rDME) (20% m/m), per i segmenti B (auto di piccola taglia) e C (auto di media taglia). Le autovetture *bi-fuel* sono state confrontate con le auto a benzina e con le auto elettriche a batteria. I risultati dell'LCA hanno mostrato che la miscela riduce le emissioni di gas climalteranti del 16-21% rispetto alla benzina ed è preferibile unicamente in cinque categorie di impatto su 16. Le auto elettriche risultano migliori delle auto a benzina nelle stesse cinque categorie e riducono le emissioni climalteranti del 36-38%. Future ricerche dovrebbero focalizzarsi su miscele totalmente rinnovabili e affrontare le limitazioni della disponibilità di materie di scarto usate per la produzione dei carburanti rinnovabili. Questo studio è stato commissionato da Liquigas S.p.A. ed è stato svolto in collaborazione con Innovhub - Stazioni Sperimentali per l'Industria S.r.l.

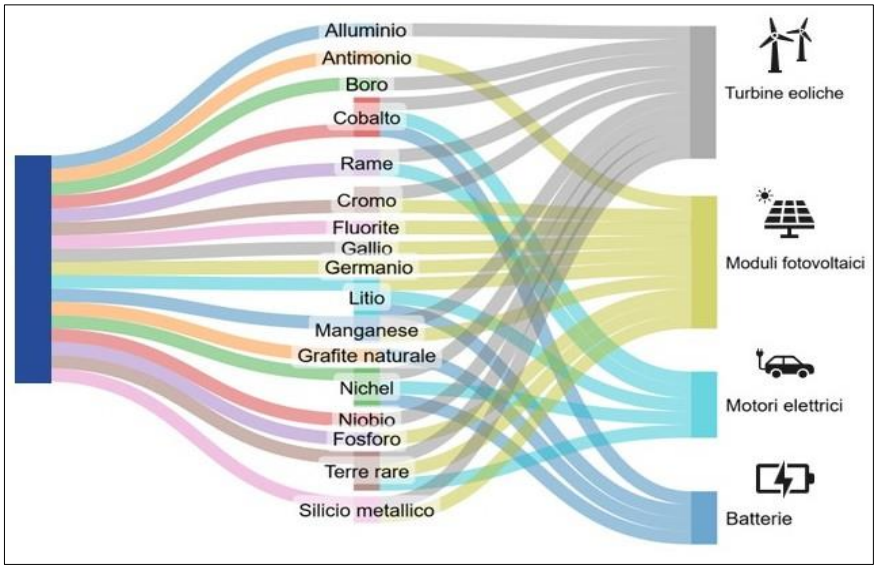


Potenziali impatti ambientali sulla categoria *cambiamenti climatici* per i diversi scenari analizzati

Puricelli S., Eid M., Casadei S., Grosso M., Lonati G., Rigamonti L., Cernuschi S., 2024. Life cycle assessment of passenger cars fed with a blend of LPG, bio-LGP, and renewable DME, and comparison with conventional and electric passenger cars. Proceedings SIDISA 2024 - XII International Symposium on Environmental Engineering, pp. 364-367.

La gestione dei rifiuti generati dalla transizione energetica

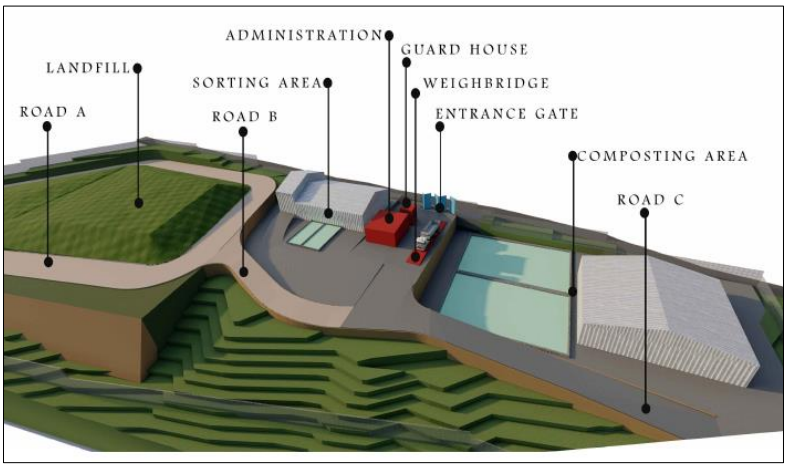
In collaborazione con il Centro Studi MatER è in corso un progetto di ricerca sui rifiuti della transizione energetica. L'obiettivo iniziale del progetto è stato fornire un'analisi completa di quattro flussi di rifiuti di crescente rilevanza: batterie agli ioni di litio per veicoli elettrici e accumulo di energia, motori per veicoli elettrici, pannelli fotovoltaici e rifiuti compositi da turbine eoliche. Sono stati esaminati lo stato dell'arte delle tecnologie di recupero e il quadro normativo europeo e italiano. L'analisi dei processi di riciclo sottolinea le potenzialità di estrarre risorse preziose, affrontando la crescente domanda di materie prime critiche e strategiche. È stata indagata l'infrastruttura impiantistica esistente in Italia, rivelando una carenza di strutture specifiche per alcuni flussi di rifiuti. Le fasi successive del progetto prevedono di costruire una serie di scenari di produzione dei suddetti rifiuti e di confrontare i flussi attesi con le capacità di trattamento, così da poter fornire delle raccomandazioni sugli sviluppi impiantistici auspicabili.



Materie prime critiche utilizzate nei settori di analisi

Un sistema di gestione dei rifiuti integrato in Libano

La gestione dei rifiuti è un tema ad oggi ancora problematico nei contesti a basso e medio reddito, dove spesso il servizio si limita alla sola raccolta, mentre il trattamento e lo smaltimento finale sono condotti in maniera impropria. Alla situazione del Libano, già critica, non ha giovato il sovrapporsi della crisi pandemica alla crisi politico-economica, e non ultimo l'attacco da parte di Israele che da ottobre 2024 ad oggi rende molto difficile l'operatività, specialmente nel Sud del paese. In questo contesto il progetto "RIFIUTO o RISORSA?", finanziato da AICS (AID_12590/01/08) e promosso da CELIM, partito ad agosto 2022, sta entrando nel suo terzo anno di svolgimento. AWARE ha contribuito in questi due anni portando la sua esperienza tecnica, partecipato attivamente alle attività di coordinamento, (preparazione degli indicatori di progetto, revisioni di budget, preparazione dei bandi) e seguendo e coordinando le seguenti attività: le valutazioni dei sistemi attuali di raccolta dei rifiuti delle Municipalità di Hasbaya, Chebaa e Rashaya Al Fukhar, con raccolta dati sul campo, organizzazione di focus groups e interviste; la progettazione preliminare di un impianto di compostaggio, di un impianto di separazione dei riciclabili e di un intervento di miglioramento della discarica incontrollata di Hasbaya. Quattro sono state le tesi svolte finora sul progetto (Simone Salvo, Nabil Rafka, Mahdi Hasan e Antoine Mhanna). Attualmente, il progetto è in fase di revisione a causa dell'impossibilità di operare in zona di guerra e specialmente a Chebaa e Rashaya Al Fukhar.



Rendering del progetto per il trattamento rifiuti nell'area di interesse