

SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE DELLA VALORIZZAZIONE DI MATERIE PLASTICHE DA DISCARICA MEDIANTE LANDFILL MINING

Grazia Maria Cappucci^{1,*}, Maurizio Avella², Roberto Avolio², Cosimo Carfagna²,
Maria Emanuela Errico², Paolo Neri³, Martina Pini³, Francesco Spina²,
Gianluigi Tealdo⁴, Anna Maria Ferrari³

¹ INSTM – Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Scienza e Tecnologia dei Materiali, presso Università di Modena e Reggio Emilia – Dipartimento di Scienze e Metodi dell'Ingegneria.

² CNR – IPCB – Istituto per i Polimeri Compositi e Biomateriali di Pozzuoli (NA).

³ Università di Modena e Reggio Emilia – Dipartimento di Scienze e Metodi dell'Ingegneria.

⁴ IREOS S.p.A., Genova.

Sommario – Il landfill mining è un insieme di tecnologie che opera sulle discariche al fine di recuperare il maggior quantitativo possibile di materia e trattare il rifiuto in essa contenuto. Inoltre, se presenti situazioni di contaminazione della falda e del suolo sottostante la discarica, consente anche di risanare le aree inquinate mediante interventi di bonifica e di realizzare la messa in sicurezza del sito, se originariamente sprovvisto di idonee strutture di contenimento, captazione e trattamento di eventuale percolato e biogas prodotto, oppure le stesse strutture, ancorché presenti, dovessero più non essere performanti. Il presente studio ha lo scopo di analizzare, attraverso la metodologia Life Cycle Assessment (LCA), gli impatti e i benefici ambientali derivanti dalla valorizzazione di materie plastiche recuperate mediante landfill mining. In particolare, i confini del sistema dello studio includono il trattamento del rifiuto recuperato da una discarica industriale e la successiva trasformazione della plastica separata in materiale secondario mediante opportuni trattamenti meccanici. Inoltre, è stato effettuato un confronto tra la produzione di granulato plastico secondario, a partire dalla risorsa estratta con il landfill mining, e la produzione di granulato plastico da risorse primarie. Il primo scenario è risultato essere significativamente meno impattante del secondo, principalmente grazie all'evitata estrazione di greggio impiegato per la realizzazione della risorsa primaria.

Parole chiave: *life cycle assessment, rifiuti, landfill mining, trattamento dei rifiuti, risorsa secondaria.*

ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY OF THE ENHANCEMENT OF PLASTIC MATERIAL RECOVERED FROM INDUSTRIAL LANDFILL WITH LANDFILL MINING

Abstract – Global material use, both renewable and non-renewable sources origin, has tripled since the 80s, thanks to the improved living standards. As a consequence, an ever-growing waste production has needed to be managed, trying at the same time to minimize environmental damages. The easiest way for waste disposal has always been represented by landfilling, even before landfill regulations have

been enacted, with catastrophic consequences on the environment. The growing difficulty in recovering raw materials has led to explore unconventional ways to obtain materials, leading to consider landfills as mines full of potential resources. Landfill mining is a set of technologies that operates on landfills in order to recover the largest possible amount of matter and treat the waste contained in it. Moreover, if applied to old thinking landfills, where containment barriers to pollutants are absent, landfill mining allows, together with the recovery of materials, also to restore polluted areas through decontamination and to secure the site, thanks to the realization of adequate containment barriers, capture and treatment systems for any leachate and biogas produced, also whenever the barriers or the environmental equipment are not long efficient. The purpose of the present study is to analyze, through the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, the environmental impacts and benefits deriving from the valorization of plastic materials recovered with this type of intervention. In particular, the boundaries of the studied system include the treatment of waste recovered from an industrial landfill and the subsequent transformation of the separated plastic into secondary material through appropriate mechanical treatments. The LCA analysis involved the landfill mining operation carried out by IREOS S.p.A. on the industrial landfill "Alumix" area of Portovesme, a hamlet of Portoscuso (CI), a site of about 8 hectares located in the southern part of Sardinia. In this landfill, in the 80s, industrial waste from the metallurgical activities of the area were buried uncontrollably. The waste treatment processes consist in a 36-month processing period and consist mainly of the following steps:

- excavation of waste from the landfill body;
- mechanical sorting to remove bulky waste such as tires, wood, coarse iron;
- pre-treatment to reduce the size of the material;
- primary screening to separate the coarse materials from the fine ones;
- volumetric reduction, magnetic and gravimetric separation of fine fractions (wet treatments).

The water used in the wet treatments is treated in a clarification plant, chemical-physical treatment and sludge-pressing filter and, then, recirculated into the treatment plant. Fine components such as plastic, aluminum, iron and coal are sent for material and energy

* *Piazzale Europa 1, Reggio Emilia, 42124 (RE), e-mail: graziamaria.cappucci@unimore.it.*

recovery, while inert fractions that are not sold, such as sand, filter-pressed sludge, cathodes and anodes, are sent for disposal. In the study emissions from treatment are considered and calculated from concentration values measured in air. The plastic fraction, recovered at the end of the treatment and made up of 95% of HDPE, is sent to a processing plant, which, after grinding and extrusion, returns the second material in the form of granules. Each phase of processing of the recovered plastic is accompanied by dust suction systems, whose magnitude has been hypothesized considering a percentage of the treated mass. Finally, a comparative LCA analysis was carried out between the production of the secondary granulate and a granulate material obtained from virgin HDPE described in a database process. The analysis of the comparison shows that damage of the production scenario of the HDPE granulate recovered from landfill (1,65E-4 Pt) is 81% lower compared to the damage of production of virgin HDPE granulate (9,1E-4 Pt). In particular, the category Resources presents the highest reduction, equal to about 89%. In fact, in the case of virgin granulate production, the damage in the Resources category is mainly due to the crude oil resource (54,42%) which is the main resource for the production of virgin HDPE of the database process (in fact to obtain 1 kg of virgin HDPE 0,91 kg of crude oil are required). Analyzing the production of the granulate with recycled plastic, it emerged that the greatest contribution to the damage is due to the energy used in the extrusion process (36,84%). In conclusion, the environmental advantage of the production of secondary HDPE compared to virgin material consists precisely in the avoided extraction of crude oil for the production of the primary resource.

Keywords: *life cycle assessment, waste, landfill mining, waste treatment, secondary resource.*

Ricevuto il 29-3-2019. Modifiche sostanziali richieste il 29-5-2019. Accettazione il 3-7-2019.

1. INTRODUZIONE

Nel decennio compreso tra il 2004 e il 2014 si è assistito nell'Unione Europea a un incremento dei rifiuti prodotti da attività economiche e domestiche pari al 10%, con trend sempre positivo (Eurostat, 2017). Risulta evidente che una massa maggiore di rifiuti richiede capacità di trattamento da parte degli impianti altrettanto crescenti. In particolar modo, nel decennio sopra indicato è stato possibile osservare differenti andamenti relativi alle due modalità di gestione dei rifiuti attualmente applicate: il recupero, di materia e/o di energia, e lo smaltimento.

La prima modalità ha subito una rapida crescita fino al 2008, anno in cui è stata emanata la Direttiva quadro sui rifiuti, che, introducendo il principio della gerarchia dei rifiuti, prescrive agli stati membri di indirizzare le proprie politiche di gestione

anzitutto alla prevenzione e al recupero e, solo come opzione residuale, al loro smaltimento (Parlamento Europeo, 2008).

In maniera quasi speculare al recupero, nel medesimo anno lo smaltimento tocca il suo minimo, riducendosi del 9% rispetto ai valori del 2004.

Complice probabilmente la crisi economica, la produzione dei rifiuti subisce un leggero stallo nel biennio 2008-2010 e, con esso, si assiste a una riduzione delle attività di trattamento finalizzato al recupero del rifiuto stesso. Si ricorre sempre più di frequente allo smaltimento dei rifiuti, modalità che, sebbene non raggiunga più il massimo del 2004, si assesta nel 2014 a valori piuttosto elevati, pari a -2% dei valori di inizio decennio.

Le discariche esaurite presenti sul suolo europeo sono state stimate nel 2016 pari a 500.000, di cui il 90% antecedenti la direttiva 1999/31/CE e, quindi, teoricamente sprovviste di idonei sistemi di contenimento del rifiuto e trattamento del percolato e biogas (Eurostat, 2017).

I potenziali effetti sulla salute dell'uomo e sull'ecosistema causati dalle emissioni di tali discariche possono essere stimati a partire dalle concentrazioni delle stesse in aria e nelle falde valutate in diversi studi (Sormunen et al., 2008; Flyhammar, 1997).

Le discariche successive alla direttiva sopra riportata non sono naturalmente esenti da emissioni, come riportato nella banca dati Ecoinvent v.3, la quale evidenzia per il rifiuto municipale, ad esempio, significative emissioni di CO₂ e CH₄, biogeniche e fossili, oltre che di metalli nella falda, a seguito del conferimento del rifiuto, trattamento del percolato e successivo incenerimento dei fanghi (Ecoinvent Centre, 2014).

L'occupazione del suolo si aggiunge alla lista degli impatti provocati dalle discariche, se si pensa al valore economico e sociale che tali zone presentano qualora si trovassero in aree di interesse urbanistico.

La riduzione delle risorse primarie disponibili rappresenta l'altra faccia del crescente consumismo: il Parlamento Europeo in un briefing del 2018 (EPRS, 2018) riporta che negli ultimi 40 anni il consumo di risorse, sia rinnovabili che non rinnovabili, è globalmente triplicato a causa dei sempre più elevati standard di vita. All'interno dei confini europei il consumo di risorse primarie nel 2016 si attesta a oltre 13 tonnellate pro capite, di cui il 22% è costituito da materiali da risorse non rinnovabili, come il carbone, il gas naturale e il greggio.

La scarsità delle risorse e la conseguente fluttuazione dei prezzi di mercato è particolarmente gravosa per gli stati europei, che importano circa il 40% delle risorse primarie.

Per fronteggiare entrambe le problematiche, la Commissione Europea ha individuato una serie di misure volte a “chiudere il ciclo”, passando da un’economia lineare, in cui è presente un rifiuto residuale, a un’economia circolare, grazie alla quale il rifiuto può rientrare nel paniere delle risorse disponibili, restando, quando possibile, all’interno dei confini dello stato che lo ha generato.

Le azioni principali interessate dalla direttiva sono il raggiungimento del 65% entro il 2030 di riciclaggio dei rifiuti urbani, il riciclo del 75% dei rifiuti di imballaggio entro il 2030 e la riduzione al 10% entro il 2030 del collocamento in discarica dei rifiuti urbani rispetto a quelli prodotti (European Commission, 2015).

In un’ottica di economia circolare, le discariche assumono connotazioni differenti rispetto a quelle tradizionalmente attribuite, ovvero un luogo dove seppellire e nascondere ciò che non è più utile alla società, fino a rappresentare potenziali miniere di materiali sempre più rari o difficili da estrarre. Si stima, ad esempio, che il rame attualmente sepolto globalmente nelle discariche rappresenti il 50% della quantità di rame totale presente sulla Terra (Smart Ground, 2015).

L’insieme di tecnologie che permette di accedere alle risorse contenute nelle discariche è il Landfill mining (LFM), definito come un’operazione di intervento sulle discariche che consiste nell’escavazione dei rifiuti conferiti e nel loro successivo trattamento finalizzato all’inertizzazione delle frazioni pericolose e alla rimozione selettiva delle diverse componenti, rendendole gestibili in maniera differenziata (Enciclopediaambiente, 2014).

Inoltre, se applicato a discariche di vecchia concezione, antecedenti al 1999, in cui sono assenti barriere di contenimento delle sostanze inquinanti, il LFM permette, contestualmente al recupero di materia, anche di risanare aree inquinate mediante interventi di bonifica e di messa in sicurezza del sito grazie alla realizzazione di idonee strutture di contenimento, captazione e trattamento di eventuale percolato e biogas prodotto.

Al fine di valutare ed incentivare il recupero dei materiali contenuti nelle discariche, l’Unione Europea ha finanziato diversi progetti, tra cui il progetto SMART GROUND – “SMART data collection inteGRation platform to enhance availability and accessibility of data and infOrmation in

the EU territory on secoNDary raw materials”, finanziato nell’ambito del programma “Horizon 2020”, il Programma Quadro europeo per la Ricerca e l’Innovazione dell’Unione Europea. Tale progetto è finalizzato a favorire il recupero delle risorse presenti nelle discariche, anche attraverso la creazione di una banca dati europea che metta in collegamento database esistenti (Dino et al., 2016).

Inoltre, nel 2014 la Commissione Europea ha istituito EURELCO, European Enhanced Landfill Mining Consortium, ovvero una rete in cui agiscono diversi stakeholders europei la cui finalità è supportare l’innovazione tecnologica, legale, sociale, economica, ambientale ed organizzativa dell’Enhanced Landfill Mining (ELFM), nel contesto di una transizione a un’economia circolare e a basse emissioni di CO₂.

L’ELFM rappresenta un’evoluzione del tradizionale LFM, in quanto, sebbene preveda le medesime operazioni di base, è maggiormente focalizzato sulle modalità di valorizzazione dei rifiuti presenti in discarica. Tale tecnologia viene definita come “l’esplorazione, il trattamento, escavazione eseguiti in maniera sicura e l’integrata valorizzazione di giacimenti passati, presenti e futuri di rifiuti sepolti, sia come materia (Waste-to-Material), sia come energia (Waste-to-Energy), usando innovative tecnologie di trasformazioni e rispettando i criteri sociali ed ecologici più stringenti” (Jones et al., 2013).

Le azioni previste da EURELCO sono la raccolta e la condivisione di informazioni relative all’attuale livello e al futuro potenziale dei progetti di ELFM negli Stati Membri dell’UE, la stimolazione dell’innovazione tecnologica per l’esplorazione, escavazione, separazione, recupero e trasformazione in un’ottica di migliorata efficienza dell’utilizzo delle risorse, lo sviluppo e l’applicazione di metodi scientifici per valutare ELFM in termini di impatto sociale, ambientale ed economico a livello locale, regionale e globale (European Commission, 2014).

La metodologia Life Cycle Assessment (LCA) è stata ampiamente utilizzata per valutare il danno e i benefici ambientali derivanti dalle operazioni di LFM e ELFM.

In particolar modo, queste sono state spesso messe a confronto con lo scenario “Do-nothing”, uno scenario zero, in cui la discarica non è sottoposta ad operazioni di mining e se ne valuta l’impatto che essa provocherebbe se perdurasse nel suo stato.

Ad esempio, Danthurebandara e colleghi (2015a) hanno applicato la metodologia LCA al processo di ELFM operato su una discarica belga municipale e industriale, in cui è presente un sistema di raccolta e trattamento del percolato e del biogas prodotti. Per materiali quali metalli, vetro e inerti è stato valutato un recupero di materia tramite un trattamento, mentre per plastiche, carta, legno e tessili sono stati considerati come combustibili derivati da rifiuti (CDR), previa gassificazione al plasma. Dalla valutazione del danno eseguita con il metodo ReCiPe end-point (Goedkoop et al., 2013), è emerso che è proprio quest'ultimo processo a costituire il maggiore impatto ambientale delle operazioni di ELFM e nello specifico nella categoria Climate change, mentre le categorie Fossil e Metal depletion beneficiano del vantaggio ambientale derivante dall'evitata produzione di energia che deriva dalla combustione di syngas e dal recupero dei metalli dal convertitore al plasma.

Dal confronto con lo scenario zero, è emerso che quest'ultimo presenta carichi ambientali trascurabili rispetto al ELFM, sebbene i benefici ambientali siano di gran lunga meno significativi di quest'ultimo.

Gli stessi autori (Danthurebandara et al., 2015b) hanno analizzato l'ELFM applicato a una discarica non controllata e non gestita in Sri-Lanka, per cui sono stati analizzati due scenari, che differiscono per la collocazione del CDR, in un caso utilizzato come alternativa al combustibile, carbone, impiegato in un cementificio, nell'altro considerato come prodotto intermedio destinato al recupero energetico. In entrambi gli scenari è stato possibile apprezzare un vantaggio ambientale nelle categorie Fossil depletion, Climate change on human health and Particulate matter formation, sebbene complessivamente il vantaggio risulta essere più spiccato per il primo scenario rispetto al secondo. Dal confronto con lo scenario zero è emerso come quest'ultimo contribuisca solo in maniera positiva al danno ambientale, risultando essere l'opzione più impattante.

Il confronto con lo scenario zero è materia di studio anche per Jain e colleghi (2014), che hanno analizzato il LFM applicato a una discarica municipale non controllata degli U.S.A., declinato secondo due modalità: la prima prevede l'escavazione e il trasporto del rifiuto in una discarica correttamente gestita, la seconda prevede l'escavazione e il trattamento del rifiuto al fine di recuperare materia ed energia. L'analisi ambientale, con-

dotta con il metodo EDIP 97 (Wenzel et al., 1997), ha evidenziato che per quattro categorie di impatto, Global warming potential (GWP), Acidification, Human toxicity via soil e Human toxicity via surface water, sono presenti le maggiori differenze tra gli scenari studiati. In particolare, lo scenario zero ha l'impatto maggiore per quanto riguarda la categoria GWP, a causa delle emissioni di metano prodotte dalla decomposizione del rifiuto e non presenta in nessuna delle categorie sopra citate un vantaggio ambientale, mentre lo scenario di recupero di materia ed energia presenta significativi vantaggi ambientali in tutte e quattro le categorie, associate principalmente al recupero dei metalli e alla sostituzione del carbone per la produzione di energia.

Infine, Gusca e colleghi (2015) hanno analizzato due alternative di LFM applicate alla discarica di Riga, una discarica sprovvista di impianti per la captazione e il trattamento del biogas e percolato prodotti, in cui negli anni sono stati conferiti rifiuti di diversa natura.

Le due alternative proposte riguardano in un caso il trattamento in-situ del rifiuto mediante l'adozione di un impianto mobile, nell'altro caso il conferimento a un impianto stabile ex-situ. In entrambi i casi, i confini del sistema non includono gli ulteriori processi di trattamento riservati ai materiali recuperati e non sono attribuiti vantaggi ambientali mediante prodotti evitati. Il metodo scelto è IMPACT 2002+ (Jolliet et al., 2003), mediante il quale è stato possibile valutare che in entrambi gli scenari il maggior contributo all'impatto totale è dato dai processi di escavazione e trasporto a causa dei consumi di combustibili. Nonostante queste similitudini, il primo scenario presenta un impatto inferiore del 28% rispetto al secondo, differenza attribuibile alla presenza nel primo scenario del trasporto dei rifiuti in un sito esterno e al trasporto del terreno al sito riqualificato secondo gli standard normativi.

Nel presente studio è stata adottata la metodologia LCA per analizzare gli impatti e i benefici ambientali derivanti dalla valorizzazione di materie plastiche recuperate con ELFM applicato a una discarica di tipo industriale, situata in Sardegna, nella provincia di Carbonia-Iglesias (CI). Il focus di questo studio, rispetto agli studi citati, è la valutazione dell'impatto ambientale associato alla valorizzazione di un prodotto secondario ottenuto a partire dall'estrazione di rifiuto plastico da discarica, individuando i principali contributi al danno e i benefici associati alle operazioni di lan-

dfill mining. Inoltre, sono stati considerati eventuali vantaggi ambientali dovuti al confronto del secondario con un prodotto plastico ottenuto da risorse primarie.

2. MATERIALI E METODI

Il caso di studio riguarda il sito di Portovesme, frazione del Comune di Portoscuso (CI), in cui sorge una zona industriale caratterizzata dalla presenza di uno stabilimento presieduto dalla ex Alumix., azienda di produzione di alluminio.

Dopo la chiusura di tale azienda, il sito è diventato una discarica incontrollata che ha portato, nel corso degli anni, ad una situazione di stoccaggio non a norma di rifiuti industriali e scarti di lavorazioni.

In tale area è stata effettuata un'operazione di ELFM, mediante tecnologia di trattamento ad umido brevettata chiamata "TWYM: Tomorrow's World, Yesterday's Materials" (Ministero dello Sviluppo Economico, 2018), da parte di Ireos S.p.A., un'azienda che si occupa di servizi per l'ambiente e di bonifiche ambientali, che ha fornito le informazioni necessarie per la costruzione del layout impiantistico adottato e per la sti-

ma quantitativa e qualitativa dei materiali recuperati.

Nel presente LCA sono stati presi in considerazione l'escavazione dei rifiuti dal corpo discarica, il trattamento dei rifiuti mediante specifici impianti, lo smaltimento dei rifiuti non recuperabili e l'ottenimento dei co-prodotti da valorizzare. In particolare per la plastica sono stati considerati anche i trattamenti meccanici a cui deve essere sottoposta per ottenere il granulato finale.

Durante le fasi di trattamento del rifiuto, sono state considerate le emissioni in aria e durante la produzione del granulato secondario sono state prese in considerazione anche le emissioni indoor.

Le fasi principali del processo considerato sono riportate in Figura 1.

La frazione plastica, recuperata al termine del trattamento e costituita per il 95% da HDPE, viene trasportata ad un impianto di lavorazione. La prima fase di lavorazione consiste in una macinazione che riduce la pezzatura della frazione in ingresso, restituendo un materiale che ha dimensioni di circa 1 cm. Un vaglio a valle del mulino, separa la frazione inferiore a 1 cm, che viene direzionata alla fase successiva di estrusione, dalla frazione maggiore di 1 cm, che viene sottoposta a ciclonatura

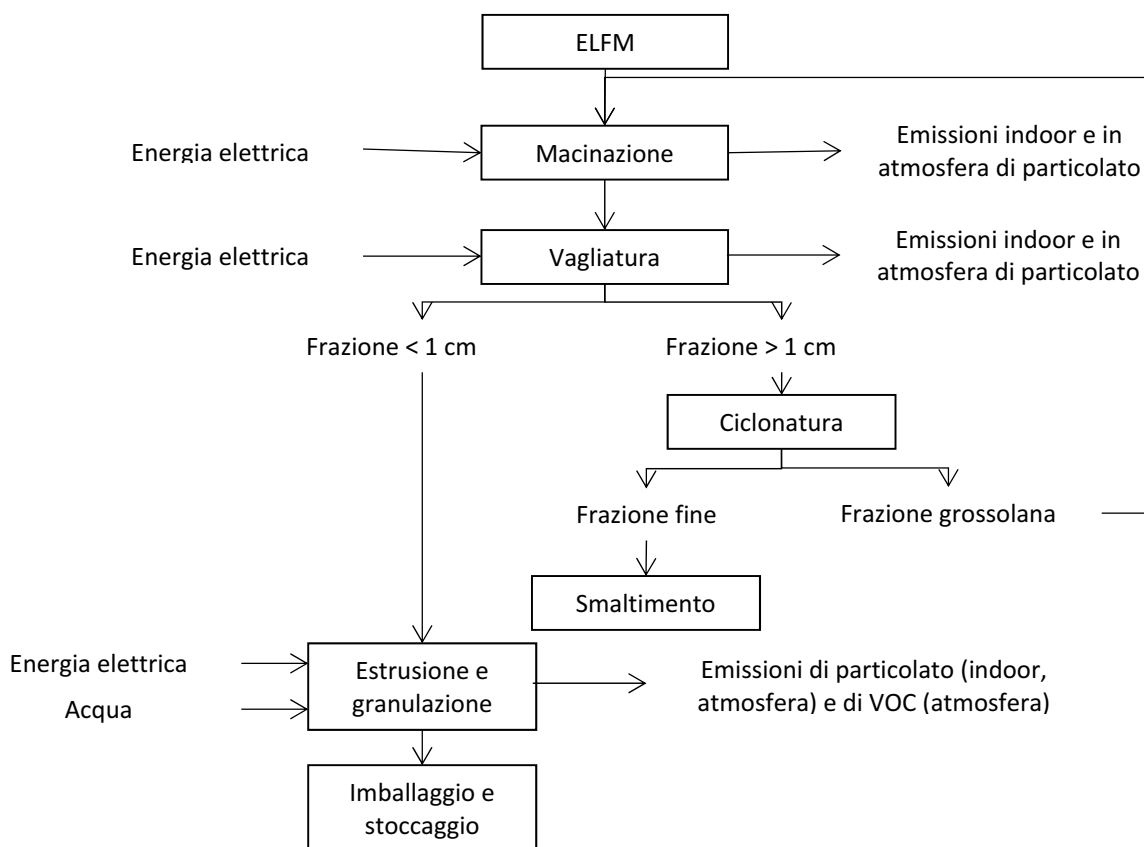


Figura 1 – Flowchart della produzione del granulato secondario

per separarla da un'eventuale quota di fine e poter essere rimacinata.

L'estrusione prevede una lavorazione del HDPE in un estrusore monovite a 180° C e a 80 bar. La miscela di HDPE che si ottiene attraversa un filtro che trattiene le eventuali impurità e, successivamente, passa nella sezione di taglio in cui è presente una lama rotante a giri regolabili, a seconda delle dimensioni del granulato da ottenere. Quest'ultimo entra, infine, in una sezione di raffreddamento con acqua a circuito chiuso e, successivamente, viene separato dall'acqua mediante una torre di separazione, costituita da una coclea.

Ciascuna fase di lavorazione della plastica recuperata è corredata da impianti di aspirazioni delle polveri, la cui entità è stata ipotizzata considerando una percentuale sulla massa trattata.

2.1. *Trattamento del rifiuto da discarica*

Il processo di ELFM applicato da Ireos S.p.A. si compone di varie fasi di trattamento, a partire dall'escavazione del corpo discarica. Di seguito si riporta una flowchart del processo che comprende le fasi specifiche di trattamento, analizzando per ognuna di esse l'unità funzionale scelta, flussi di prodotti ed emissioni dirette eventuali (Fig. 2).

I processi di trattamento del rifiuto hanno previsto un periodo di lavorazione di 36 mesi e consistono principalmente nelle seguenti fasi:

- escavazione del rifiuto dal corpo discarica;
- trattamento a secco:
 - cernita meccanica per rimuovere rifiuti ingombranti quali pneumatici, legno, ferro grossolano;
 - pre-trattamento atto a ridurre la pezzatura del materiale;
 - vagliatura primaria per separare i materiali grossolani da quelli fini;
- trattamento a umido:
 - riduzione volumetrica;
 - separazione magnetica;
 - separazione gravimetrica delle frazioni.

In particolar modo, la separazione della plastica avviene in fase di separazione gravimetrica, che consiste nella separazione delle frazioni di interesse sfruttando la differenza di densità dei materiali trattati in acqua. Il processo infatti, si basa sull'operazione di stratificazione dei materiali che avviene all'interno della macchina: grazie ad un movimento generato dall'aria pressurizzata, i materiali a bassa densità stratificano sulla superficie

del letto fluido, mentre quelli ad alta densità stratificano sul fondo. L'acqua utilizzata nelle macchine viene inviata in idro-ciclonatura, che consente la separazione di una frazione ultrafine dal restante rifiuto.

Il condizionamento rappresenta una preparazione alla flottazione successiva. Il processo consiste nel far permanere la matrice da trattare in un serbatoio, con aggiunta di una miscela di additivi quali gasolio e MIBC (metil-isobutil-carbinol). Il contatto tra le superfici delle frazioni da trattare e la miscela acquosa, favorisce la successiva separazione tra float e le sabbie entranti in flottazione.

L'acqua impiegata nei trattamenti ad umido viene trattata in un impianto di chiarificazione, trattamento chimico-fisico e filtro-pressatura dei fanghi e, in seguito, ricircolata nell'impianto di trattamento.

All'interno dell'impianto sono presenti tre sorgenti emissive (CPG Lab srl, 2017):

- la zona 1 coincide con la zona di scavo dei materiali dal corpo discarica e trasporto degli stessi in un'area apposita di stoccaggio all'interno del cantiere;
- la zona 2 coincide con la zona di scarico materiali e vagliatura degli stessi;
- la zona 3 coincide con la zona operativa di impianto a umido e trattamento materiali.

I campionamenti effettuati nelle suddette postazioni sono stati finalizzati alla determinazione dei seguenti analiti ritenuti fra i possibili inquinanti aero dispersi caratterizzanti il sito in questione:

- metalli;
- idrocarburi policiclici aromatici;
- ammoniaca;
- fibre di amianto aero-disperse;
- fluoruri.

I co-prodotti dell'attività di trattamento sono la plastica, la frazione carboniosa ad elevato potere calorifico destinata al recupero energetico, i metalli, ferrosi e non ferrosi, destinati al riciclo.

Sono considerati i trasporti dei co-prodotti, in particolar modo i trasporti della plastica e della frazione carboniosa avvengono via mare, rispettivamente a Napoli, dove al momento sono state effettuate prove sui materiali in via sperimentale, e a Lisbona.

I rifiuti generati dal processo di trattamento sono inviati a specifico trattamento, come nel caso di pneumatici, catodi ed anodi e legno, mentre per i fanghi generati dalla filtro-pressatura dell'impianto di trattamento acque, la sabbia, la frazione ultrafine, il materiale di misto costituito princi-

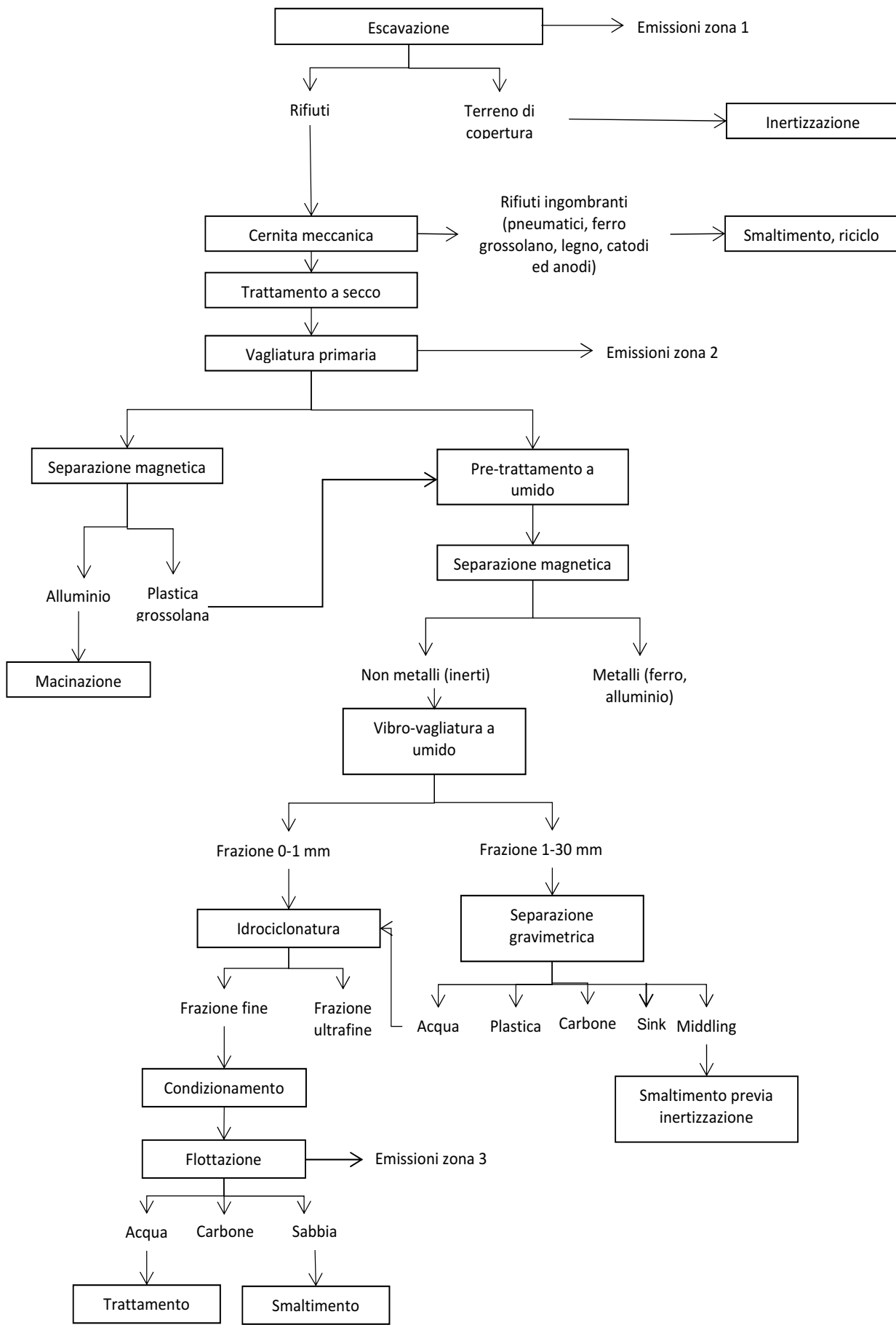


Figura 2 – Flowchart delle operazioni di ELM

palmente da pietrisco, calcestruzzo e refrattari a irrilevante contenuto carbonioso (sink), il terreno di copertura e il materiale misto a medio contenuto carbonioso (middling), lo smaltimento individuato è il conferimento in discarica, previa inertizzazione per gli ultimi due rifiuti. In particolare modo, lo smaltimento del middling avviene in Spagna.

2.2. Life cycle assessment

2.2.1. Definizione dell'obiettivo e dello scopo

Obiettivo dello studio è la valutazione d'impatto ambientale attraverso la metodologia LCA (Life Cycle Assessment) secondo le norme UNI EN ISO 14040-14044 (UNI, 2006) del danno dovuto al trattamento del rifiuto proveniente da una discarica industriale e alla produzione di materia plastica secondaria, utilizzando la frazione plastica recuperata dalla medesima discarica.

2.2.2. Sistema, unità funzionale e sistema che deve essere studiato

La funzione del sistema è la produzione di materia plastica secondaria, in particolare granuli in HDPE, ottenuta attraverso l'escavazione e il trattamento dei rifiuti contenuti all'interno della discarica industriale. Il sistema che deve essere studiato è la produzione di materia plastica secondaria ad opera di un'azienda sita a Napoli, che riceve il co-prodotto plastico risultante dal trattamento dei rifiuti presenti nella discarica industriale di Portovesme, frazione del Comune di Portoscuso (CI), ed operato dall'azienda IREOS S.p.A.

L'Unità Funzionale è 1 kg di granulato di materia plastica secondaria.

2.2.3. I confini del sistema

I confini del sistema vanno dall'estrazione delle materie prime per produrre i componenti dell'impianto di trattamento del rifiuto e di produzione del granulato in HDPE, alla loro lavorazione, assemblaggio, trasporto al cliente, fase d'uso dell'impianto e fine vita dei suoi componenti. Nei confini del sistema si considera anche il fine vita dei rifiuti generati dal trattamento dei rifiuti e dalla produzione del granulato nonché i vantaggi ambientali derivanti dall'applicazione dell'ELFM alla discarica oggetto di studio.

La produzione, manutenzione e smaltimento degli impianti ed altri materiali ausiliari sono stati inclusi nel presente studio. Le emissioni in aria e indoor così come la produzione di rifiuti solidi e li-

quidi sono stati considerati e quantificati. Inoltre, sono state fatte le seguenti assunzioni:

- i trasporti delle materie prime, impianti, sistemi e macchine pari a una distanza media di 100 km dal produttore all'utilizzatore;
- l'installazione di filtri HEPA con un'efficienza del 99,97% durante la produzione del granulato secondario;
- l'utilizzo di dispositivi di protezione individuale di tipo facciale con un'efficienza del 95% durante la produzione del granulato secondario secondo gli standard normativi europei (EN, 2009).

2.2.4. La qualità dei dati

I dati relativi al processo di trattamento dei rifiuti sono stati forniti da IREOS S.p.A., e riguardano le fasi di trattamento, descrizione delle macchine, consumi energetici e idrici, concentrazioni delle emissioni e quantità di materiali separati al termine del trattamento.

Il processo di produzione del granulato secondario è stato schematizzato grazie a interviste con un'azienda che lavora materiali plastici.

La banca dati adottata è Ecoinvent v. 3 (Ecoinvent Centre, 2014). Il Metodo di valutazione del danno è IMPACT 2002+ (Joliet et al., 2003) modificato in accordo con Pini e colleghi (2014). Il codice di calcolo usato è SimaPro 8.5 (Pré, 2017). Dal momento che il metodo IMPACT 2002+ non tiene in considerazione le emissioni locali e indoor, in particolare, relativamente al particolato emesso durante la macinazione ed inalato dai lavoratori, sono stati calcolati i fattori di caratterizzazione adottando un metodo preliminare (Ferrari et al., 2018), al fine di valutare gli effetti sulla salute dell'uomo di tali emissioni.

È stata aggiunta la categoria d'impatto *Mesotelioma* e la categoria di danno *Tumori da fibra di amianto* per considerare gli impatti sulla salute dell'uomo delle emissioni delle fibre di amianto.

Il modello utilizzato per il Life Cycle Inventory (LCI) è *attributional, partitioning*, al fine di gestire la presenza dei co-prodotti risultanti dall'attività di trattamento del rifiuto (Pini et al., 2018).

L'allocazione è basata sul criterio di massa, poiché è considerato il principio migliore per ripartire il danno tra diverse tipologie di co-prodotti. Tale criterio è raccomandato dalla ISO 14040 (UNI, 2006) e, inoltre, permette di attribuire a tutti i coprodotti il medesimo valore, dal momento che ciascuno di essi necessita di un ulteriore trattamento che permetta di ottenere materia secondaria.

2.2.5. Inventario

I dati più rappresentativi usati nell'inventario del trattamento del rifiuto da discarica e della produzione del granulato sono riportati nelle tabelle seguenti (Tabella 1 e Tabella 2).

Al termine del processo di trattamento si è ottenuta una riduzione volumetrica dei rifiuti da ricollocare in discarica pari a circa il 37% del volume iniziale della discarica.

Tabella 1 – Inventario del processo di ELMF

Input	Valore	Unità di misura
Trattamento del rifiuto	5,30E+06	t
Input dalla natura		
Occupazione del suolo (impianto)	3,60E+05	m ² a
Trasformazione del suolo (a impianto)	1,20E+05	m ²
Occupazione del suolo (discarica)	-4,70E+06	m ² a
Trasformazione del suolo (da discarica)	1,60E+05	m ²
Materiali		
Acqua	4,10E+04	m ³
Cemento per base impianto	2,90E+03	t
Gasolio per condizionamento	33	t
MIBC	7,3	t
Flocculante	15	t
Energia		
Elettricità	2,00E+06	kWh
Trasporti		
Gomma	1,80E+08	tkm
Nave	1,20E+08	tkm
Output	Value	Unit
Co-prodotti		
Ferro	3,00E+03	t
Alluminio	6,10E+03	t
Plastica (HDPE)	593	t
Carbone	7,10E+04	t
Emissioni in aria		
Ammoniaca	1,10E-04	t
Metalli	3,90E-05	t
Idrocarburi	1,90E-04	t
Fibre di amianto	1,50E-08	t
Fluoruri	3,30E-05	t
Rifiuti		
Compostaggio del legno	64,5	t
Trattamento dei pneumatici	103,2	t
Riciclo materiali da costruzione	2,90E+03	t
Trattamento di componenti elettronici	4,4	t
Conferimento in discarica di rifiuti non recuperabili	5,40E+06	t
Trattamento acque	9,20E+07	t

Tabella 2 – Inventario della produzione del granulato secondario

Input	Valore	Unità di misura
Materiali		
HDPE recuperato da discarica	1,1	kg
Energia		
Elettricità	0,5	kWh
Trasporti		
Gomma	0,1	tkm
Nave	0,5	tkm
Output	Value	Unit
Prodotto principale		
HDPE granulato	1	kg
Prodotto evitato		
Plastica di scarto recuperata	7 E-2	kg
Emissioni in aria		
Particolato	9,10E-03	kg
NMVOOC	5,40E-05	kg
Rifiuti		
Smaltimento in discarica per rifiuti pericolosi del particolato trattenuto dai filtri a maniche	4 E-2	kg
Riciclo di plastica di scarto	3,00E-03	kg

Viene inserita, pertanto, tra gli input dalla natura una voce di occupazione del suolo negativa e una trasformazione del suolo da discarica, a cui il metodo di calcolo attribuisce un contributo negativo, per tenere conto della frazione di suolo recuperata e restituita alla natura a seguito del trattamento dei rifiuti.

2.2.6. Valutazione del danno

L'analisi ambientale del danno dovuto all'estrazione e al trattamento di 1,1 kg di HDPE, ovvero la quantità di risorsa necessaria per la produzione di 1 kg di HDPE secondario, è di seguito riportata. Il danno a livello end-point è pari a 1,5E-5 Pt, di cui il 68,8% è dovuto al trattamento dei rifiuti, il 19,3% è dovuto ai trasporti, l'11,9% è dovuto ad altri processi, principalmente la realizzazione della piattaforma su cui poggia l'impianto. Il vantaggio ambientale derivante dalla liberazione del suolo dovuta alla riduzione volumetrica dei rifiuti è pari a -0,5%. I risultati dell'analisi mid-point, in cui i risultati sono espressi in categorie di impatto e quantificati in kg di sostanza di riferimento per ciascuna categoria, sono riportati in Tabella 4.

La Figura 3 (a pagina seguente) evidenzia come il contributo più significativo al danno totale sia

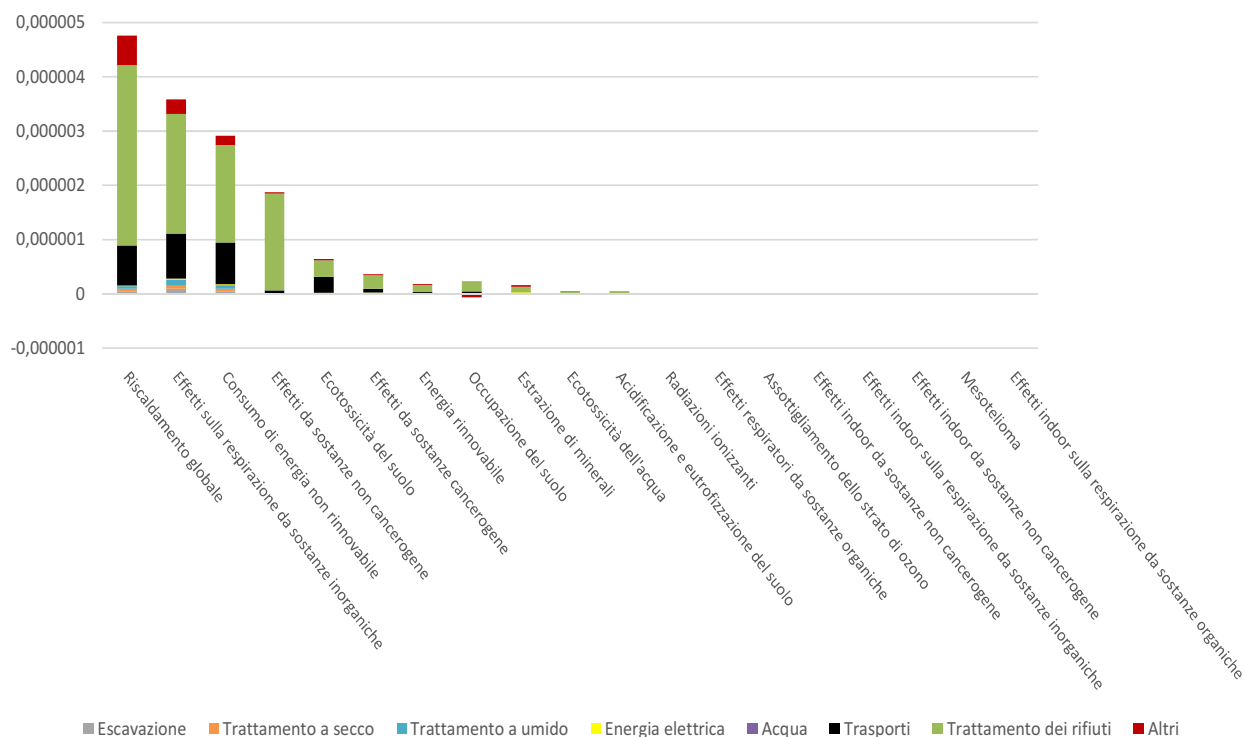


Figura 3 – Valutazione del danno per pesatura per impact category del processo di ELFM

fornito dalla categoria Riscaldamento globale (32,7%), dovuto all'emissione di diossido di carbonio di origine fossile (75,4%), emesso principalmente nei processi di trattamento dei rifiuti e, in particolare, nel processo di trattamento di fine vita di anodi e catodi. A seguire, la categoria Effetti sulla respirazione da sostanze inorganiche (24,6% del danno totale) rappresenta il secondo contributo al danno totale, principalmente per l'emissione di particolato $<2.5 \mu\text{m}$ (35,8%) nei processi di trattamento dei rifiuti e, in particolare, per il conferimento in discarica dei rifiuti non recuperati. La categoria Consumo di energie non rinnovabili segue con il 20% del danno totale, principalmente per l'utilizzo di greggio (74%), soprattutto nei processi di trattamento dei rifiuti e, in particolare, per il conferimento in discarica dei rifiuti non recuperati, dove la

risorsa viene impiegata per la realizzazione della discarica stessa.

La categoria Effetti da sostanze non cancerogene segue con il 12,8% del danno totale, principalmente per l'emissione in acqua di antimonio (70,7%), emessa soprattutto nei processi di trattamento dei rifiuti e, in particolare, nel processo di trattamento di fine vita di anodi e catodi.

La categoria Ecotossicità del suolo contribuisce al danno totale per il 4,4%, principalmente per l'emissione di zinco nel suolo (37,3%) soprattutto nei trasporti e, in particolare, per il trasporto dei rifiuti non recuperabili in discarica. La categoria Effetti da sostanze cancerogene contribuisce al danno totale per il 2,5%, principalmente per l'emissione di alluminio in aria (25%) soprattutto nei processi di trattamento dei rifiuti e, in particolare, nel processo di trattamento di fine vita di anodi e catodi.

Tabella 3 – Valutazione del danno per punteggio singolo del processo di produzione del granulato secondario

Categoria di danno	Unità	Totale	Macinazione	Estrusione e granulazione	Imballaggio
Salute umana	Pt	5,8E-05	2,8E-05	2,7E-05	4,2E-06
Risorse	Pt	5,4E-05	1,8E-05	2,8E-05	8,6E-06
Cambiamento climatico	Pt	3,9E-05	1,7E-05	1,9E-05	3,6E-06
Qualità dell'ecosistema	Pt	1,4E-05	3,8E-06	1E-05	3,4E-07
Salute umana su scala indoor	Pt	1,1E-07	1,1E-07	4,1E-19	0
Tumore da fibre amianto	Pt	1,7E-13	1,6E-13	1,9E-15	0
Salute umana su scala locale	Pt	3,9E-16	0	3,9E-16	0

Tabella 4 – Caratterizzazione del danno per impact category del processo di ELMF

Categoria di impatto	Unità	Totale	Escavazione	Trattamento a secco	Trattamento a umido	Energia elettrica	Acqua	Trasporti	Trattamento dei rifiuti	Altri
Effetti da sostanze cancerogene	kg C ₂ H ₃ Cl eq	9,2E-04	6,8E-06	8,6E-06	4,4E-05	3,1E-06	4,4E-07	1,7E-04	6,3E-04	5,5E-05
Effetti da sostanze non cancerogene	kg C ₂ H ₃ Cl eq	4,7E-03	2,2E-06	4,9E-06	2E-05	1,5E-06	3,4E-07	1,3E-04	4,5E-03	6E-05
Effetti sulla respirazione da sostanze inorganiche	kg PM _{2,5} eq	3,6E-05	1E-06	5,6E-07	1,1E-06	1,6E-07	1,6E-08	8,4E-06	2,2E-05	2,8E-06
Radiazioni ionizzanti	Bq C-14 eq	2,9E-01	2,5E-03	4,7E-03	6,6E-03	3,2E-03	1,4E-03	6E-02	1,9E-01	2E-02
Assottigliamento dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	5,3E-09	6,2E-11	1E-10	8,4E-11	2,1E-11	2,5E-12	1,3E-09	3,5E-09	1,8E-10
Effetti sulla respirazione da sostanze organiche	kg C ₂ H ₄ eq	2,6E-05	3,7E-07	2,4E-07	3,1E-07	2,9E-08	2,5E-09	3,6E-06	2,1E-05	5,5E-07
Ecotossicità dell'acqua	kg TEG water	1,4E+01	1,5E-02	2,6E-02	5,9E-02	1,3E-02	1,2E-03	6,5E-01	1,3E+01	1,2E-01
Ecotossicità del suolo	kg TEG soil	1,1E+00	4E-03	7,2E-03	2,4E-02	4,1E-03	3E-04	5E-01	5,4E-01	3,6E-02
Acidificazione ed eutrofizzazione del suolo	kg SO ₂ eq	6,4E-04	2,3E-05	1,3E-05	7,6E-06	3E-06	2,1E-07	1,3E-04	4,1E-04	5,4E-05
Occupazione del suolo	m ² org.arable	2,1E-03	2,2E-06	7,4E-06	3E-05	1,3E-05	1,2E-06	5,5E-04	2,3E-03	-8,1E-04
Acidificazione acquatica	kg SO ₂ eq	1,4E-04	3,3E-06	2,3E-06	2,3E-06	8,8E-07	6,3E-08	2,5E-05	9,8E-05	1,1E-05
Eutrofizzazione acquatica	kg PO ₄ P-lim	8,7E-06	3,6E-08	5,7E-08	2,1E-07	3,1E-08	4,3E-09	8,2E-07	7,3E-06	2,7E-07
Riscaldamento globale	kg CO ₂ eq	4,7E-02	3,5E-04	5,6E-04	4,7E-04	1,7E-04	1,2E-05	7,3E-03	3,3E-02	5,4E-03
Consumo di energie non rinnovabili	MJ primary	4,4E-01	5,4E-03	8,8E-03	1E-02	2,8E-03	3,7E-04	1,2E-01	2,7E-01	2,6E-02
Estrazione di minerali	MJ surplus	2,4E-02	1,8E-04	3,2E-04	2,9E-03	1,6E-03	1,5E-05	1,7E-03	1,4E-02	4,1E-03
Energia rinnovabile	MJ	2E-02	5,3E-05	1,3E-04	6,5E-04	9,1E-04	9,2E-05	1,8E-03	1,5E-02	1,5E-03
Effetti indoor da sostanze non cancerogene	kg C ₂ H ₃ Cl eq	1,1E-07	0	0	0	0	0	0	1,1E-07	0
Effetti indoor sulla respirazione da sostanze organiche	kg C ₂ H ₄ eq	4,8E-15	0	0	0	0	0	0	4,8E-15	0
Effetti indoor sulla respirazione da sostanze inorganiche	kg PM _{2,5} eq	7,1E-13	0	0	0	0	0	0	7,1E-13	0
Effetti indoor da sostanze cancerogene	kg C ₂ H ₃ Cl eq	2,2E-12	0	0	0	0	0	0	2,2E-12	0
Mesotelioma	casi	4,1E-17	1,2E-17	1,4E-17	1,6E-17	0	0	0	0	0

Le altre categorie forniscono un contributo inferiore al 2%.

L'analisi end-point della produzione del HDPE secondario (Tabella 3), in cui i risultati sono normalizzati ed espressi in Punto, il quale rappresenta il danno medio nella specifica categoria causati da una persona in un anno in Europa, evidenzia che il danno totale per la produzione di 1 kg di granulato è pari a 1,7E-4 Pt dovuto per il 50,2% al processo di estrusione e granulazione, segue la macinazione con il 39,7% e, infine, l'imballaggio con il 10,1%. In particolare, le categorie di danno che contribuiscono maggiormente al danno totale sono Salute umana (35%), principalmente a causa dell'emissione in aria di particolato <2,5 µm (32%) il qua-

le è emesso per circa il 55% durante il processo di estrusione e granulazione che avviene per la produzione di energia elettrica da lignite (10%) e durante la macinazione (41%). Risorse (32,6% del danno totale), è affetta principalmente dall'utilizzo di uranio (28,2%) e principalmente in estrusione e granulazione per la produzione di energia elettrica usata in estrusione.

Il contributo al danno totale di Cambiamento climatico (23,5%) è dovuto soprattutto al diossido di carbonio, fossile (93,2%), emesso principalmente in estrusione e granulazione e, in particolare, per la produzione di energia elettrica.

Il danno in Qualità dell'ecosistema (8,7% del danno totale) è dovuto principalmente all'occupazione

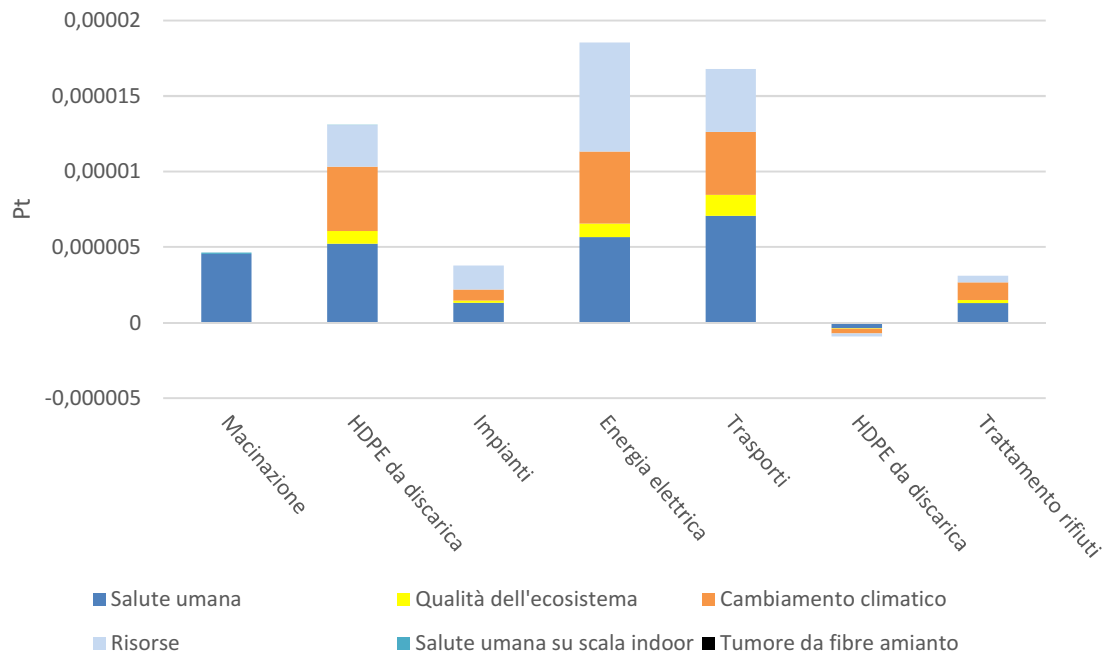


Figura 4 – Valutazione del danno per punteggio singolo del processo di macinazione

ne intensiva delle foreste (51,4%), principalmente in Estrusione e granulazione, a causa della produzione di pallet per imballaggio considerati dal processo di banca dati di estrusione.

Salute umana su scala indoor (6,3E-2%) è affetta principalmente da particolato $>10 \mu\text{m}$ (44,5%), emesso quasi totalmente in maniera diretta durante la macinazione.

La categoria Tumore da fibra di amianto (9,9E-8% del danno totale), il cui danno è dovuto al trattamento del rifiuto da discarica e, in particolar modo, al trattamento a umido, contribuisce al danno della sola macinazione. Infine, Salute umana su scala locale (2,3E-10% del danno totale) è dovuta per il 59,3% a particolato $>10 \mu\text{m}$, emesso nel processo di trattamento dei fanghi risultanti dal processo di trattamento acque.

Il danno relativo all'estrazione e al trattamento di HDPE costituisce il 22,2% del danno totale della fase di macinazione per la produzione del granulato secondario, terzo contributo dopo l'energia elettrica (31,4%) e i trasporti (28,5%) (Fig. 4).

L'HDPE recuperato da discarica costituisce anche un prodotto evitato, in quanto, grazie alla vagliatura, è possibile recuperare parte dello scarto derivante dalla macinazione e reimmetterlo nel processo produttivo.

Al fine di valutare la sostenibilità ambientale del granulato prodotto da HDPE recuperato da discarica rispetto al granulato prodotto da HDPE vergi-

ne, si riporta di seguito un confronto tra i due scenari appena enunciati (Fig. 5).

Il processo che risulta maggiormente impattante è la produzione del HDPE vergine secondo il processo di banca dati (Ecoinvent Centre, 2014), in particolare risulta essere 5,5 volte maggiore (9,1E-4 Pt) rispetto alla produzione del granulato da HDPE recuperato. In particolare si possono notare gli incrementi per le seguenti categorie di danno:

- per Risorse il danno del caso di produzione da vergine è 9,3 volte maggiore (5E-4 Pt) rispetto al caso del HDPE recuperato (5,4E-5 Pt), in particolare per il consumo di greggio (2,7E-4 Pt contro 1,2E-5 Pt dello scenario di recupero) che nel processo di banca dati rappresenta la risorsa principale per la produzione del HDPE vergine (infatti per ottenere 1 kg di HDPE vergine sono necessari 0,9 kg di petrolio greggio);
- per Salute umana il danno del granulato vergine è 4 volte maggiore (2,3E-4 Pt) rispetto al caso del recupero da discarica (5,8E-5), in particolare per il danno dovuto all'emissione di idrocarburi aromatici (1,2E-4 Pt) che risulta essere due ordini di grandezza maggiore rispetto al HDPE recuperato da discarica (1,4E-6 Pt), in particolare a causa delle emissioni dirette presenti nel processo di banca dati;
- per Cambiamento climatico il danno del granulato vergine è 4,5 volte maggiore (1,8E-4 Pt) rispetto al caso del recupero (3,9E-5 Pt), in particolare di un ordine di grandezza per diossido

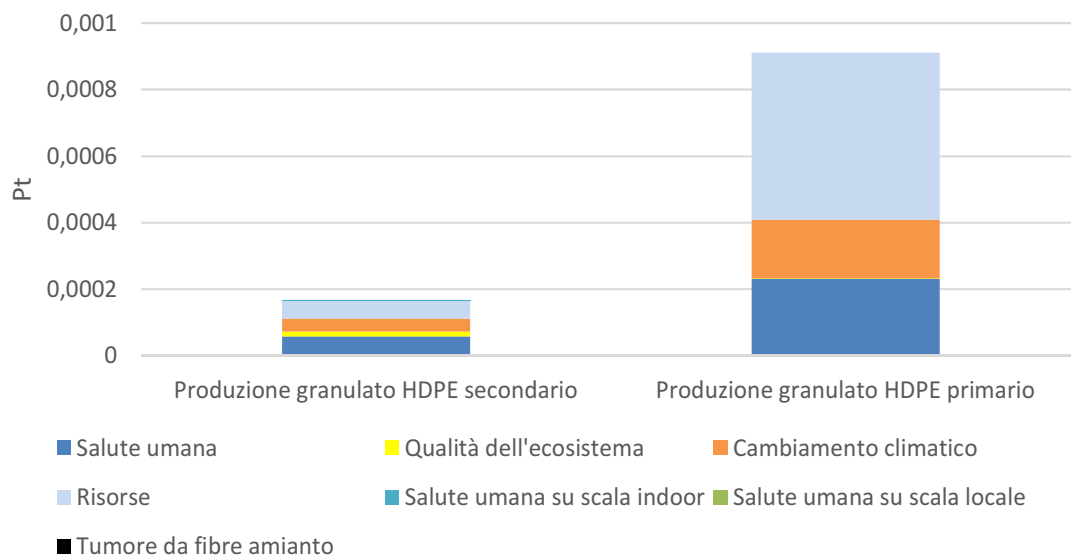


Figura 5 – Confronto della valutazione del danno per punteggio singolo tra la produzione del granulato secondario e la produzione del granulato primario

di carbonio, fossile (1,6 Pt) rispetto al caso del recupero (3,6E-5 Pt), soprattutto a causa delle emissioni dirette presenti nel processo di banca dati;

- Qualità dell'ecosistema risulta avere un danno 7,7 volte maggiore nel caso del HDPE recuperato da discarica (1,4E-5 Pt) rispetto alla produzione vergine (1,9E-6 Pt). In particolar modo occupazione del suolo con coltivazioni forestali, da cui viene ricavato il legno del pallet usato come imballaggio nel processo di estrusione dell'HDPE recuperato, assunto da banca dati Ecoinvent;_
- per le categorie Salute umana su scala indoor, Salute umana su scala locale e Tumori da fibra amianto il danno è considerato solo per l'HDPE recuperato._

3. CONCLUSIONI

In questo studio, è stata valutata, con metodologia LCA, la sostenibilità ambientale della produzione di HDPE secondario ottenuto a partire da materiale plastico estratto mediante ELMF.

È stata analizzato il processo di trasformazione del rifiuto in risorsa secondaria ed è emerso che l'impatto principale è rintracciabile nella fase di estrusione, dato l'elevato consumo energetico di tale fase. La categoria Salute umana su scala indoor, che quantifica il danno dovuto alle emissioni inalate dai lavoratori, è stata inclusa nel presente studio e il suo contributo al danno totale risulta essere contenuto, pari al 0,1%, grazie alla presenza di

impianti di aspirazione collocati su ogni macchina e all'utilizzo di dispositivi di protezione individuale.

La fase di macinazione, che rappresenta il 39,7% del danno totale, è affetta per oltre il 22% dall'HDPE recuperato da discarica.

Il contributo principale al danno del processo di trattamento del rifiuto dalla discarica è attribuibile al trattamento di fine vita dei rifiuti non recuperabili e allo smaltimento dei rifiuti generati dal trattamento stesso. In particolar modo, il trattamento riservato agli anodi e catodi separati al termine del trattamento costituisce l'impatto più significativo, seguito dal conferimento in discarica dei fanghi filtro-pressati, della sabbia, del middling e del sink. Anche i trasporti contribuiscono in maniera significativa al danno totale, a causa delle elevate quantità di rifiuti che non è stato possibile recuperare, soprattutto sabbia, per mancanza di potenziali utenti nelle vicinanze.

Il danno dovuto alla categoria Tumore da fibra di amianto è pari a 9,9E-8% del danno totale.

Il vantaggio ambientale derivante dall'evitata occupazione del suolo grazie alla riduzione volumetrica dei rifiuti rimanenti è stato incluso nell'analisi ed è risultato essere pari a -0,5% del danno delle operazioni di ELMF.

Il risultato del confronto tra la produzione di HDPE secondario con HDPE primario mostra un vantaggio ambientale per il primo scenario rispetto alla produzione da risorsa primaria.

Il contributo più significativo all'incremento del danno è senza dubbio rappresentato dall'estrazio-

ne di risorsa non rinnovabile per la produzione del materiale plastico primario; a seguire, le emissioni del processo di lavorazione del greggio stesso accrescono il danno della produzione di HDPE primario.

Pertanto, la produzione di materiale plastico secondario risulta essere ambientalmente preferibile rispetto alla produzione del primario, sia in termini di evitata estrazione di risorsa non rinnovabile, sia a causa dell'entità delle emissioni generate dal processo di produzione del primario stesso.

4. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- CPG Lab Srl (2017) Ideazione e sviluppo di un innovativo sistema multifunzionale polivalente finalizzato alla valorizzazione di materiali plastici di scarto, recuperati principalmente da depositi interrati e/o discariche, ai fini di un loro riutilizzo e/o impiego in specifiche filiere. Relazione intermedia.
- Danthurebandara M., Van Passel S., Vanderreydt I. et al. (2015a) Assessment of environmental and economic feasibility of Enhanced Landfill Mining. *Waste management*, 45, 434-447.
- Danthurebandara M., Van Passel S. e Vanderreydt I. (2015b) Environmental and economic assessment of 'open waste dump' mining in Sri Lanka. *Resources, Conservation and Recycling*, 102, 67-79.
- Ecoinvent Center (2014) Ecoinvent Database, version 3.0. Life Cycle Inventories. Retrieved from www.ecoinvent.ch. Ecoinvent Association: Zürich.
- Enciclopediaambiente (2014) Landfill Mining. <http://www.enciclopediaambiente.com/definizioni/landfill-mining/>
- European Commission (2015) Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52015DC0614>
- European Commission (2014) European Innovation Partnership on Raw Materials, EURELCO European Enhanced Landfill Mining Consortium. <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/eip-raw-materials/en/content/european-enhanced-landfill-mining-consortium>.
- European Parliamentary Research Service (2018) Material use in the European Union: Towards a circular approach, [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2018/625180/EPRS_BRI\(2018\)625180_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2018/625180/EPRS_BRI(2018)625180_EN.pdf)
- European Standard EN149:2001+A1:2009.
- Eurostat (2017) Statistiche sui rifiuti. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics/it
- Ferrari A., Volpi L., Pini M., Siligardi C. et al. (2019) Building a Sustainability Benchmarking Framework of Ceramic Tiles Based on Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA). *Resources*, 8(1), 11.
- Flyhammar P. (1997) Heavy Metals in Municipal Solid Waste Deposits. Lund. University of Technology, Lund, Sweden. Water Resources Engineering AFR-report 231.
- Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts, M. et al. (2009) ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, 1, 1-126.
- Gusca J., Fainzilbergs M., e Muizniece I. (2015) Life cycle assessment of landfill mining project. *Energy Procedia*, 72, 322-328.
- Jain P., Powell J.T., Smith J.L., Townsend T.G. et al. (2014) Life-cycle inventory and impact evaluation of mining municipal solid waste landfills. *Environmental science & technology*, 48(5), 2920-2927.
- Jolliet O., Margni M., Charles R., Humbert S., et al. (2003) IMPACT2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 8: 324-330.
- Jones P.T., Geysen D., Tielemans Y. et al. (2013). Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 55, 45-55.
- Ministero dello Sviluppo Economico, Direzione generale per la lotta alla contraffazione, Ufficio Italiano Brevetti e Marchi (2018) N. 102015000089311.
- Parlamento Europeo e Consiglio Europeo, Direttiva 2008/98/CE, GU L 312 del 22.11.2008. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=celex%3A32008L0098>
- Pini M., Ferrari A.M., Gamberini R. et al. (2014) Life cycle assessment of a large, thin ceramic tile with advantageous technological properties. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(9).
- Pini M., Neri P. e Ferrari A.M. (2018) Environmental performance of waste management in an Italian region: how LCI modelling framework could influence the results. Elsevier B. V. Proceeding of 25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference.
- Smart Ground, European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme, number 641988 (2014) Toolkit sull'Enhanced Landfill Mining. https://www.smart-ground.eu/download/tk/MSWtoolkit_Italian.pdf
- Sormunen K., Ettala M. e Rintala J. (2008) Detailed internal characterisation of two. Finnish landfills by waste sampling. *Waste Management* 28, 151-163.
- UNI EN ISO 14040:2006, www.iso.org/standard/37456.html
- UNI EN ISO 14044:2006, www.iso.org/standard/38498.html
- Wenzel H., Hauschild M.Z. e Altling L. (1997) Environmental Assessment of Products. Methodology, Tools, Techniques and Case Studies, vol. 1, 0-412-80800-5, Chapman & Hall, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA, USA. 544 pp.



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2019 è sostenuta da:



INGEGNERIA
DELL'AMBIENTE



N. 2/2019

