



Università
Ca'Foscari
Venezia

Corso di laurea magistrale in Scienze Ambientali,
curriculum "Capitale Naturale e Servizi Ecosistemici"

Tesi di Laurea

**Valutazione degli impatti ambientali secondo un
approccio LCA di un sistema di trattamento in
biopile**

Relatrice

Ch.ma Prof.ssa Elena Semenzin

Correlatrice

Dott.ssa Angela Bonfà

Laureando

Pietro Bastianello

Matricola 870540

Anno Accademico 2023/2024

Sommario

Motivazioni	9
Obiettivi e struttura della tesi	9
1. Introduzione	11
1.1 Il processo di trattamento in biopile di suoli contaminati.....	15
1.1.1 Caratteristiche del terreno	16
1.1.2 Caratteristiche dei contaminanti.....	17
1.1.3 Condizioni climatiche	18
1.1.4 Progetto per il trattamento in biopile.....	18
1.1.5 Monitoraggio per il trattamento in biopile	18
1.1.6 Possibili additivi utilizzabili.....	19
1.1.7 Vantaggi e svantaggi del trattamento	20
1.2 Normativa di riferimento	21
1.3 Descrizione e struttura dell'impianto.....	22
2. Valutazione dell'efficacia del trattamento in biopile	27
2.1 Raccolta dei dati.....	27
2.2 Risultati del monitoraggio delle biopile	38
2.3 Interpretazione dei dati raccolti.....	46
3. Metodologia Life Cycle Assessment (LCA)	48
3.1 Definizione dell'LCA.....	48
3.2 Struttura.....	49
3.3 Fase 1: Definizione di scopi ed obiettivi (Goal and Scope definition).....	50
3.4 Fase 2: Analisi di inventario (Life Cycle Inventory)	50
3.5 Fase 3: Valutazione degli impatti (Life Cycle Impact Assessment)	51
3.5.1 Il metodo EF (Environmental Footprint).....	52
3.6 Fase 4: interpretazione.....	55
4. Risultati e discussione	56
4.1 Life cycle assessment di un impianto di trattamento in biopile	56
4.2 Definizione di scopi ed obiettivi	56
4.3 Analisi di inventario.....	58
4.4 Valutazione degli impatti	60
4.4.1 Caratterizzazione.....	60
4.4.1.1 Caratterizzazione delle fasi degli scenari.....	62
4.4.2 Normalizzazione	68
4.4.3 Pesatura.....	70
4.5 Interpretazione.....	71

Conclusioni	73
Bibliografia	76
Appendice	79

Indice delle Tabelle

Tabella 1. Vantaggi e svantaggi del trattamento in biopile.....	21
Tabella 2. Dimensioni del capannone.....	22
Tabella 3. Tabella relativa ai tempi di misurazione e relativi valori di concentrazione di O ₂ nella biopila C1.....	39
Tabella 4. Tabella relativa ai tempi di misurazione e relativi valori di concentrazione di O ₂ nella biopila C2.....	39
Tabella 5. Tabella relativa ai tempi di misurazione e relativi valori di concentrazione di O ₂ nella biopila C3.....	39
Tabella 6. Tabella relativa ai tempi di misurazione e relativi valori di concentrazione di O ₂ nella biopila C4.....	40
Tabella 7. Tabella relativa ai tempi di misurazione e relativi valori di concentrazione di O ₂ nella biopila C5.....	40
Tabella 8. Tabella relativa ai tempi di misurazione e relativi valori di concentrazione di O ₂ nella biopila C6.....	41
Tabella 9. Andamenti delle temperature all'interno dei cumuli e nella linea effluenti nel retro delle biocelle.....	42
Tabella 10. Valori iniziali e finali di (HC)>12 e COD relativi al trattamento in biopile del lotto 1.....	45
Tabella 11. Valori iniziali e finali di (HC)>12 e COD relativi al trattamento in biopile del lotto 2.....	45
Tabella 12. Valori iniziali e finali di (HC)>12 e COD relativi al trattamento in biopile del lotto 3.....	45
Tabella 13. Valori iniziali e finali di (HC)>12 e COD relativi al trattamento in biopile del lotto 4.....	45
Tabella 14. Valori iniziali e finali di (HC)>12 e COD relativi al trattamento in biopile del lotto 5.....	46
Tabella 15. Lista delle categorie d'impatto del metodo "Environmental Footprint".....	55
Tabella 16. Componenti dei processi considerati in EcoInvent con relative quantità, unità di misura e fasi.....	59
Tabella 17. Valori d'impatto dei quattro scenari considerati in relazione alle categorie d'impatto del metodo EF.....	61
Tabella 18. Valori d'impatto dello scenario "Biopile passive, valori dei contaminanti tra col. A e col. B" in relazione alle categorie d'impatto del metodo Environmental Footprint.....	63
Tabella 19. Valori d'impatto dello scenario "Biopile passive, valori dei contaminanti > col. B" in relazione alle categorie d'impatto del metodo Environmental Footprint.....	64
Tabella 20. Valori d'impatto dello scenario "Biopile attive, valori dei contaminanti tra col. A e col. B" in relazione alle categorie d'impatto del metodo Environmental Footprint...	64
Tabella 21. Valori d'impatto dello scenario "Biopile attive, valori dei contaminanti > col. B" in relazione alle categorie d'impatto del metodo Environmental Footprint.....	65
Tabella 22. Tabella dei risultati delle categorie di impatto normalizzati.....	69
Tabella 23. Punteggi ottenuti per ogni categoria di impatto, dopo aver applicato la pesatura dei risultati normalizzati.....	70

Indice delle Figure

Figura 1. Modello di economia circolare.....	11
Figura 2. Livelli analisi degli indicatori di sostenibilità nelle bonifiche.....	14
Figura 3. Schema della struttura di una biopila.....	16
Figura 4. Planimetria dell'impianto di Ladurner Remedia con focus (rettangolo rosso) sulla zona adibita al trattamento in biopile.....	26
Figura 5. Scheda di campo utilizzata per il monitoraggio delle biopile.	29
Figura 6. Dettaglio di un cumulo di terreno in attesa di essere inserito nella biopila.	32
Figura 7. Dettaglio dell'interno della biopila e geotessuto sottostante il cumulo.	32
Figura 8. Cartello identificativo di un lotto di terreno inserito in una biopila.....	33
Figura 9. Fase di regolazione del flusso d'aria nel retro di una biopila.....	33
Figura 10. Dettaglio sulla misurazione del flusso tramite anemometro ad elica nel retro di una biopila.	34
Figura 11. Misuratore di O ₂ utilizzato per calcolare i valori di O ₂ e CO ₂ nella biopila.....	34
Figura 12. Inserimento della canula all'interno del cumulo per successive misurazioni.	35
Figura 13. Dettaglio della canula interrata e parzialmente fuoriuscente dal cumulo.....	35
Figura 14. Dettaglio sul tubo di collegamento tra il misuratore di O ₂ e la canula.	36
Figura 15. Fase di collegamento tra il misuratore di O ₂ e la canula inserita nel cumulo.	36
Figura 16. Dettaglio del funzionamento e dei valori riportati dal misuratore di O ₂ durante un'analisi.	37
Figura 17. Valutazione dei VOC nella linea dei biofiltri tramite l'utilizzo del PID.	37
Figura 18. Grafici di andamento della concentrazione di O ₂ di ogni singola biopila durante la prova respirometrica.....	41
Figura 19. Grafici di andamento delle temperature interne relative alle sei biopile.....	43
Figura 20. Grafici di andamento delle temperature nel retro del cumulo (linea effluente retro biocelle) relativi alle sei biopile.....	44
Figura 21. Struttura e relazioni tra le fasi di uno studio LCA.....	49
Figura 22. Confini del sistema, indicati all'interno del rettangolo rosso, in riferimento al trattamento passivo in biopila.....	57
Figura 23. Confini del sistema, indicati all'interno del rettangolo rosso, in riferimento al trattamento attivo in biopila.....	57
Figura 24. Schema della divisione dell'analisi per le singole biopile.	60
Figura 25. Grafico della caratterizzazione degli impatti dei 4 scenari considerati relativi alle categorie d'impatto del metodo Environmental Footprint.....	62
Figura 26. Grafico di caratterizzazione delle fasi dello scenario "biopile passive" in relazione alle categorie d'impatto del metodo Environmental Footprint.....	66
Figura 27. Grafico di caratterizzazione delle fasi dello scenario "biopile attive" in relazione alle categorie d'impatto del metodo Environmental Footprint.....	67
Figura 28. Grafico dei risultati delle categorie di impatto normalizzati.....	69
Figura 29. Grafico dei punteggi ottenuti per ogni categoria di impatto, dopo aver applicato la pesatura dei risultati normalizzati.....	71

Motivazioni

Il seguente elaborato di tesi si inserisce nell'attività di tirocinio svolta presso l'azienda Ladurner Remedia, azienda che tratta terreni derivanti da bonifiche e spazzamento stradale. Il presente lavoro di tesi nasce dalla necessità di approfondire il tema della gestione sostenibile di terreni contaminati tramite tecniche di biorisanamento. In questo senso è emersa la necessità di applicare una metodologia standardizzata ed approfondita, l'Analisi del Ciclo di Vita (Life Cycle Assessment, LCA), al fine di ottenere una valutazione della sostenibilità ambientale robusta e oggettiva. Il sistema di trattamento analizzato, un sistema di trattamento in biopile, è stato valutato durante tutto il periodo di trattamento dei terreni, dal carico in biopila fino alla fase di scarico. Sono stati sviluppati diversi scenari relativi a diverse tipologie di trattamento in biopile e alle diverse tipologie di rifiuti presenti nei terreni contaminati.

Obiettivi e struttura della tesi

L'obiettivo principale del presente elaborato consiste nell'analisi e nella valutazione di una specifica tecnica di decontaminazione di terreni inquinati tramite un sistema di trattamento in biopile. Lo studio ha come primo obiettivo quello di analizzare e valutare l'efficacia del sistema di trattamento in biopile come tecnica di risanamento biologico di terreni contaminati. L'analisi dell'efficacia è stata effettuata grazie a diversi campionamenti eseguiti sui cumuli di terreno posti all'interno delle biopile e alla successiva compilazione di schede di campo con i dati relativi allo stato del terreno e all'andamento della biodegradazione dei contaminati da parte dei batteri tramite dati di analisi sul consumo di Ossigeno e l'aumento della temperatura. Oltre a ciò, sono stati valutati i livelli di concentrazione degli idrocarburi pesanti ((HC)>12) presenti e della domanda chimica di ossigeno (COD) dei terreni contaminati. Il secondo obiettivo è stato quello di valutare la sostenibilità del sistema di trattamento in biopile. Le performances ambientali di questa tecnica di bonifica sono state valutate attraverso uno studio di Life Cycle Assessment (LCA).

Il lavoro di tesi è iniziato con un tirocinio presso Ladurner Remedia SpA, azienda che gestisce la consegna e lo scarico dei terreni da bonifica, il trattamento dei terreni tramite processi di soil washing e/o biopile e lo stoccaggio dei materiali trattati. Durante l'attività di tirocinio sono stati raccolti, attraverso l'utilizzo di specifiche schede di campo, dati relativi al monitoraggio delle biopile e delle condizioni ambientali durante le diverse fasi del trattamento, oltre ai dati relativi ai livelli di concentrazione di (HC)>12 e della COD dei terreni sottoposti a trattamento in biopile. Tali dati sono risultati utili ai fini del raggiungimento del primo obiettivo, ovvero la valutazione dell'efficacia del sistema, in quanto hanno permesso di verificare il corretto funzionamento dei processi di biodegradazione dei contaminanti presenti all'interno dei terreni trattati ad opera dei batteri presenti e della loro attività microbica continua.

Durante l'attività di tirocinio sono stati inoltre raccolti i dati di permanenza dei terreni contaminati all'interno delle biopile e dei volumi di terreno trattato, che unitamente a quelli relativi ai consumi dei mezzi d'opera e degli strumenti utilizzati durante il processo di bonifica, sono stati successivamente utilizzati per svolgere lo studio LCA per la quantificazione dei potenziali impatti ambientali relativi al trattamento dei terreni in biopile. I risultati dello studio LCA hanno permesso di rivelare i punti critici della tecnica di biorisanamento analizzata e possono essere utilizzati per la comparazione del sistema di biopile con diverse alternative tecnologiche per la bonifica di terreni contaminati.

Il seguente elaborato di tesi è strutturato in cinque capitoli: introduzione, valutazione dell'efficacia del trattamento in biopile, metodologia Life Cycle Assessment, risultati e discussione, conclusioni.

Nel primo capitolo viene introdotto brevemente il contenuto della tesi e vengono posti gli obiettivi di valutazione dell'efficacia e valutazione della sostenibilità del sistema. Successivamente è stata presentata una descrizione dettagliata del funzionamento del processo di trattamento in biopile, della normativa di riferimento e la descrizione dell'impianto sul quale è stato svolto lo studio.

Il secondo capitolo è dedicato alla presentazione e all'analisi dei dati raccolti in campo tramite schede di campo compilate durante il periodo di tirocinio e dall'ottenimento dei dati relativi ai quantitativi di (HC) >12 e COD presenti nei terreni contaminati. I dati contenuti all'interno delle schede di campo sono relativi all'andamento della contaminazione degli elementi presenti nei terreni contaminati sottoposti a trattamento, alle variazioni di O₂ e temperatura e ad altre caratteristiche dell'impianto di trattamento in biopile. In questo capitolo è stata valutata e verificata l'efficacia del sistema di trattamento in biopile, portando quindi a termine il primo dei due obiettivi di questa tesi.

Nel terzo capitolo viene presentata la metodologia LCA, secondo le sue quattro fasi, e il metodo Environmental Footprint (EF) proposto dalla Commissione Europea. Tale metodo è stato utilizzato per la valutazione degli impatti del sistema di trattamento in biopile.

Nel quarto capitolo vengono riportati e discussi i risultati dell'applicazione dello studio LCA relativo all'impianto di trattamento in biopile dei terreni contaminati derivanti da attività di bonifica e spazzamento stradale di Ladurner Remedia. Per lo svolgimento di tale studio sono stati utilizzati i dati raccolti durante l'attività di tirocinio, con il supporto del database Ecoinvent e del software SimaPro.

Infine, nel capitolo delle conclusioni sono brevemente riportate le attività svolte, i risultati ottenuti, le criticità rilevate durante l'analisi e possibili sviluppi futuri utili al miglioramento della sostenibilità del trattamento in biopile.

1. Introduzione

Nell'ambito del Green Deal, il nuovo Piano di azione europeo riguardante l'economia circolare e la nuova strategia industriale, l'accelerazione della transizione verso la circolarità viene posta come obiettivo (Circular Economy Network, 2021). Una recente risoluzione del Parlamento europeo (Risoluzione del Parlamento europeo del 21 ottobre 2021 sulla conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici 2021 svoltasi a Glasgow, Regno Unito (COP26)) sottolinea che la transizione a un'economia di tipo circolare è una delle condizioni necessarie per raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. Per questa motivazione, l'Europarlamento ha presentato alla Commissione Europea la richiesta della definizione di obiettivi vincolanti al 2030 di riduzione dell'uso di materie prime vergini e di incremento del contenuto di materiali riciclati nei prodotti. L'economia circolare è definita dal parlamento europeo come "un modello di produzione e consumo che implica condivisione, prestito, riutilizzo, riparazione, ricondizionamento e riciclo dei materiali e prodotti esistenti il più a lungo possibile" (Parlamento Europeo, 2023). Grazie all'adozione di questo modello economico è possibile allungare il ciclo di vita dei prodotti e conseguentemente ridurre drasticamente la produzione di rifiuti. Una volta che il prodotto o servizio ha "portato a termine la sua funzione", i materiali di cui è composto vengono infatti riciclati ove possibile. In questo modo è possibile riutilizzare di continuo i materiali generando continuamente valore. In Figura 1 è possibile osservare il modello di economia circolare con tutte le sue componenti.



Figura 1. Modello di economia circolare.

La Commissione Europea ha evidenziato come un modello economico lineare sia impossibilitato al raggiungimento della neutralità climatica (Piano d'azione per l'economia circolare, Commissione Europea, 2022). Per il raggiungimento del totale abbattimento delle emissioni, le misure prese in considerazione sono state relative a diversi fattori:

- Riduzione dell'utilizzo delle risorse per la realizzazione di prodotti o la fornitura di servizi e investimento su un modello circolare di produzione;
- Prolungamento temporale dell'utilizzo delle risorse, con obiettivo l'ottimizzazione dell'uso e studi specifici per prolungare la "vita" dei beni e consentirne il riutilizzo o il riciclo;
- Utilizzo di materie prime rigenerate e sfruttamento di risorse ed energie rinnovabili;
- Riutilizzo delle risorse e riciclaggio dei rifiuti.

In riferimento agli ultimi due punti del precedente elenco, le tecniche di bonifica possono essere considerate delle soluzioni per il trattamento di terreni contaminati. Obiettivo delle tecniche di bonifica è l'eliminazione delle fonti e/o delle sostanze inquinanti e la riduzione delle concentrazioni presenti nelle matrici ambientali fino a raggiungere valori uguali o inferiori alle concentrazioni soglia di rischio (Brugnoli E. et al., 2014). Le tecniche di bonifica possono essere di tre tipologie:

1. In situ: gli interventi di recupero e/o trattamento avvengono nella posizione naturale della matrice contaminata senza operazioni di scavo, né movimentazione o spostamento dei terreni contaminati;
2. Ex situ: il trattamento della matrice ambientale contaminata viene operato tramite movimentazione e rimozione dei materiali e suolo inquinato fuori dal sito, avviato verso gli impianti di trattamento autorizzati o in discarica;
3. On situ: movimentazione e rimozione dei materiali e dei suoli inquinati, ma con trattamento all'interno del sito stesso e possibile riutilizzo.

Nel caso del seguente studio verrà analizzata una tecnica di biorisanamento, nello specifico biodegradazione, operata ex situ. Il termine biorisanamento (Norris D. Robert, 2017) definisce l'insieme dei processi per la riduzione della concentrazione di inquinanti in una matrice ambientale, ad opera di microrganismi, funghi o piante con opportune capacità metaboliche. Una piccola classificazione può essere effettuata sulla base della metodologia con cui si ottiene la riduzione nella concentrazione degli inquinanti:

- biotrasformazione, che comporta la trasformazione delle molecole degli inquinanti in altre molecole di composti non pericolosi per la salute dell'uomo e per l'ambiente;

- biodegradazione, che comporta la scissione delle molecole organiche complesse in molecole organiche semplici o inorganiche, che sono meno pericolose, oppure che saranno ulteriormente degradate a composti non pericolosi;
- mineralizzazione, tramite la quale i singoli inquinanti sono completamente trasformati da composti organici a composti inorganici non pericolosi quali CO₂ e acqua.

Per l'individuazione di obiettivi sufficientemente ambiziosi in materia di economia circolare sono stati sviluppati numerosi approcci metodologici utilizzabili per la fase di individuazione e valutazione degli impatti ambientali, che possono essere qualitativi o quantitativi e possono riferirsi a modelli di analisi e simulazione. Uno di questi è l'LCA (Life Cycle Assessment o Analisi del Ciclo di Vita; ISO 14040:2021 ISO 14044:2021): un efficiente strumento di analisi che permette la comparazione di prodotti e processi produttivi simili e la quantificazione degli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita. Permette inoltre la possibilità di evidenziare eventuali benefici ambientali ed è considerata la base per poter prendere delle decisioni. L' LCA è stata ed è attualmente utilizzata in moltissimi settori, quali ad esempio:

- la quantificazione degli impatti ambientali associati alle infrastrutture idriche urbane e agli impianti di trattamento delle acque reflue (Guest et al., 2009; Lundie et al., 2004));
- la gestione e il trattamento dei rifiuti derivanti dalla produzione e l'utilizzo del packaging nel settore alimentare (Sazdovski et al., 2021);
- la valutazione e stima degli impatti ambientali provenienti dal settore edilizio dovuti a consumo di suolo, risorse naturali ed energia e l'elevato rilascio di emissioni in terra, aria e acqua (Capioli et al., 2018);
- la valutazione della sostenibilità degli interventi di bonifica (ISO 14040:2021 ISO 14044:2021).

La valutazione della sostenibilità degli interventi di bonifica presenta un problema di valutazione: la sostenibilità non è un concetto misurabile in maniera semplice ed è valutabile solo a partire da un processo soggettivo e temporaneo che richiede un corretto coinvolgimento degli stakeholders, i quali vanno incoraggiati a contribuire per poter ottenere un bilancio di impatti e benefici potenziali e facilitare così un possibile accordo. La valutazione della sostenibilità di un processo è una procedura comparativa in cui diverse alternative vengono valutate attraverso criteri simili, con l'obiettivo di definire la soluzione ecologicamente più sostenibile e che si avvicina maggiormente all'ottenimento degli obiettivi prefissati. Il risultato, quindi, consiste nel fornire una misura comparativa valida all'interno del contesto in cui è stata analizzata. Il processo metodologico per il calcolo della sostenibilità prevede diversi livelli di approfondimento che rispecchino il grado di complessità del progetto di riqualificazione del sito, in modo che la complessità della valutazione sia proporzionale alla scala del progetto o al problema al quale si sta rispondendo. I tre livelli di valutazione definiti da SuRF Italy (Urli & Rosa, 2020) sono:

qualitativo, semi-quantitativo e quantitativo (Figura 2), e vedono l’LCA trovare spazio nell’ambito delle valutazioni di tipo quantitativo.

	Tipo di Analisi	Approcci disponibili
Livello 1 Qualitativo	Qualitativa basata sugli elementi di sostenibilità più significativi	BMPs (Gestione delle buone pratiche), Checklists, Linee guida, Regole empiriche, Matrici, Valutazioni
Livello 2 Semi quantitativo	Semiquantitativa focalizzata a pochi, fondamentali dati sitospecifici	Fogli di calcolo, Punteggi e pesi, Proiezioni di rischio, Calcolo esposizioni, emissioni, Analisi costi/benefici semplice o di dettaglio,
Livello 3 Quantitativo	Quantitativa, sitospecifica con analisi di pratiche, processi, tecnologie	Analisi ciclo di vita, Valutazione ai confini, Analisi energetica, Ritorno sociale degli investimenti, Calcolo del beneficio netto, Analisi multicriterio

Figura 2. Livelli analisi degli indicatori di sostenibilità nelle bonifiche.

SuRF Italy, ovvero il Sustainable Remediation Forum, è nato in Italia nel 2012. L’obiettivo di SuRF Italy è stato ed è tutt’ora quello di enunciare i principi, l’ambito di applicazione e le principali linee di attività che connotano un approccio sostenibile al processo di bonifica in Italia ((Urli & Rosa, 2020)), attraverso la redazione di un “libro bianco” in cui le conoscenze di svariati esperti del settore vengono riportate e fungono da guida da seguire avendo cura della salvaguardia della salute umana, lo sviluppo sociale ed economico e la conservazione del territorio. In tale contesto è stato definito anche come si inserisce il concetto di sviluppo sostenibile nell’ambito del risanamento ambientale: *“Operare in modo sostenibile significa creare valore per i portatori di interesse ed utilizzare le risorse in modo tale da non compromettere i fabbisogni delle generazioni future, rispettando le persone, l’ambiente e la società nel suo complesso”* (Cesaretti, 2011).

L’obiettivo di un equilibrio tra costi e benefici perseguendo la migliore soluzione considerando contemporaneamente le dimensioni ambientale, sociale ed economica, deve essere ottenuto soddisfacendo i principi chiave sotto riportati:

- Principio 1: Protezione della salute umana e dell’ambiente, nel presente e nello stato futuro, considerando la destinazione d’uso del sito;
- Principio 2: Procedure di lavoro sicure: la bonifica di un sito deve garantire la sicurezza per i lavoratori e per le comunità locali, riducendo al minimo gli impatti sull’ambiente;
- Principio 3: Scelte coerenti, chiare e riproducibili, basate su evidenze scientifiche e sperimentali;

- Principio 4: Documentazione trasparente: qualsiasi aspetto sulla scelta della bonifica deve essere documentato in maniera trasparente, al fine di permettere a tutte le parti interessate di comprendere le motivazioni alla base delle scelte adottate;

Principio 5: Coinvolgimento di tutti i soggetti coinvolti in senso lato nella progettazione e realizzazione di una bonifica. I loro punti di vista devono essere considerati nel processo decisionale.

1.1 Il processo di trattamento in biopile di suoli contaminati

Le biopile sono considerate il trattamento di biorisanamento più diffuso per il risanamento dei suoli contaminati (Jørgensen et al., 2000), il cui procedimento consiste nel prelievo dei terreni/sedimenti contaminati e nel loro successivo trattamento in strutture denominate “pile”, all’interno delle quali condizioni come la concentrazione di ossigeno, l’umidità del suolo, la concentrazione di nutrienti e il pH sono controllate per ottimizzare la crescita e l’attività della comunità microbica autoctona. L’intervento, che prevede l’escavazione dei terreni contaminati (Baldan et al., 2015), consiste nella miscelazione di questi con ammendanti dei suoli e nel trasferimento in un’area di trattamento. Il terreno scavato viene disposto in strati sovrapposti inserendo alternativamente tubi forati per la distribuzione nel materiale contaminato di aria e soluzioni nutrienti e tubi di estrazione dell’aria dall’ammasso. Alternativamente, come nel caso dell’impianto di Ladurner Remedia, il terreno viene disposto in tunnel di cemento di determinate dimensioni dopo essere stato trattato con i nutrienti e il sistema di estrazione dell’aria è sviluppato nel pavimento lungo tutta la base del tunnel. L’area di trattamento può essere realizzata con differenti livelli di ingegnerizzazione. In generale dovrà essere prevista la realizzazione di sistemi di raccolta del percolato e in alcuni casi, come ad esempio quando tra i contaminanti sono presenti composti volatili, di sistemi di recupero dei vapori. I composti più leggeri tendono ad essere rimossi per volatilizzazione durante l’aerazione mentre gli altri componenti vengono rimossi per biodegradazione.

La tecnologia di trattamento in biopile, illustrata in Figura 3, prevede la formazione di reattori biologici costruiti mediante una sovrapposizione di strati di terreno contaminato (per altezze fino a 4-5 metri) intervallati con la posa in opera, tra uno strato ed il successivo, di tubi forati per distribuire nel materiale contaminato aria e soluzioni di acqua e nutrienti (soprattutto azoto e fosforo) e tubi di estrazione dell’aria. All’interno di tali reattori vengono artificialmente mantenute le condizioni ottimali di disponibilità di nutrienti, umidità e temperatura, mentre un sistema di aerazione provvede a fornire l’ossigeno necessario allo svolgimento dei processi biodegradativi. Per contenere l’emissione di sostanze volatili, la biopila viene coperta con teli di materiali impermeabili (solitamente plastica) per poter mantenere i livelli di umidità e di temperatura, prevenire l’erosione da parte del vento ed evitare infiltrazioni d’acqua. I vapori sono trattati con carboni attivi.

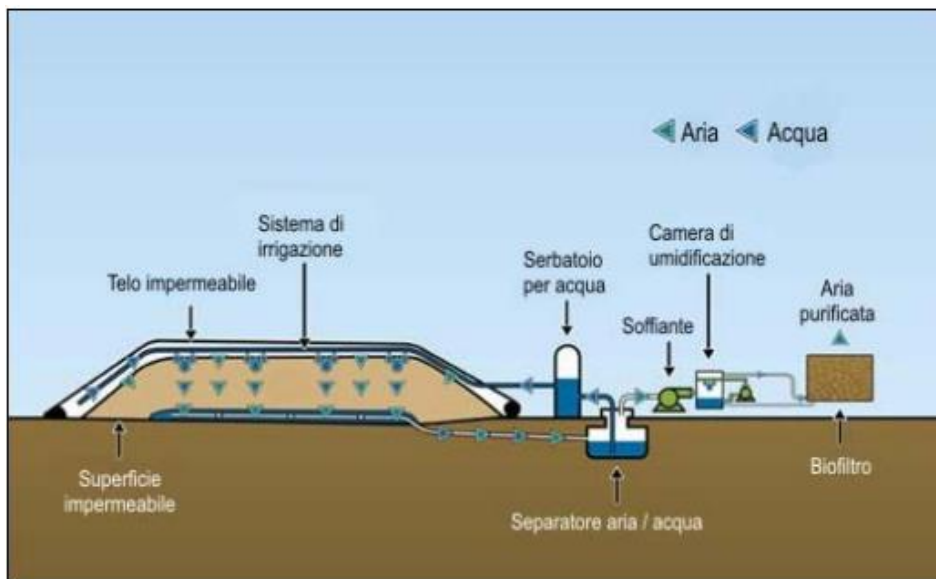


Figura 3. Schema della struttura di una biopila.

1.1.1 Caratteristiche del terreno

Di seguito vengono elencate le caratteristiche che un terreno deve avere per poter essere sottoposto ad un trattamento in biopila:

- **Densità della popolazione microbica:** generalmente il terreno contiene una quantità di microrganismi sufficiente a sostenere la biodegradazione, tuttavia è possibile, prima dell'inizio del trattamento, arricchire il terreno con batteri coltivati e con nutrienti di varia natura. I ceppi microbici, tramite un processo metabolico (Leahy & Colwell, 1990) ossidano il carbonio presente nei contaminanti e lo trasformano in anidride carbonica (CO_2). Per la degradazione di prodotti petroliferi è fondamentale che il terreno sia ricco di batteri aerobi eterotrofi (cioè non in grado di sintetizzare composti organici e quindi bisognosi di essere riforniti da altre fonti). Per verificare che il terreno contenga una quantità sufficiente di questi batteri è possibile effettuare analisi su campioni provenienti dal sito. Il conteggio è fatto in "unità formanti colonie" (CFU) per grammo di terreno. Perché il trattamento sia efficace, il terreno deve contenere almeno 10³ CFU/g. Quantità inferiori potrebbero essere sintomo di condizioni tossiche per i microrganismi (elevate concentrazioni di metalli pesanti);
- **pH:** Per favorire l'attività microbica il pH dovrebbe essere compreso tra 6 e 8. Questo valore può essere variato tramite l'aggiunta di soluzioni liquide durante il trattamento;
- **Contenuto idrico:** I batteri necessitano di un ambiente umido per crescere; il tasso di umidità ideale per il terreno deve essere compreso tra il 12% e il 30% in peso. Periodicamente è necessario aggiungere acqua al terreno, che altrimenti tende ad asciugarsi in seguito a evaporazione. In aree soggette ad abbondanti

precipitazioni è possibile predisporre una copertura impermeabile sopra la biopila in modo da prevenire l'erosione operata da acqua e vento;

- **Temperatura:** L'attività microbica diminuisce drasticamente al di sotto dei 10°C e al di sopra dei 45°C, dunque sarà differente nei diversi periodi dell'anno poiché la temperatura del terreno è influenzata da quella dell'ambiente circostante;
- **Concentrazione dei nutrienti:** I nutrienti sono indispensabili per la crescita dei microrganismi. Il rapporto ideale carbonio (C), azoto (N) e fosforo (P) nel terreno per la biodegradazione risulta essere 100:10:1 e può variare a seconda del tipo di contaminanti e di microrganismi coinvolti nel processo di biodegradazione. Il contenuto iniziale di tali elementi nel terreno può essere determinato in base ad analisi chimiche su campioni del sito. È possibile approssimare la quantità di carbonio presente assimilandola alla massa totale dei contaminanti del sito (il carbonio costituisce il 90% in peso degli idrocarburi del petrolio). Con questa approssimazione è possibile calcolare speditamente le quantità di azoto e fosforo necessarie per un'adeguata crescita microbica; dopo il confronto con i valori presenti nel terreno, si determina la necessità o meno di un'aggiunta di nutrienti prima della formazione del cumulo;
- **Tessitura:** parametro fondamentale che influenza la permeabilità, il contenuto idrico e la densità del terreno. I terreni argillosi sono difficili da aerare, in essi non è possibile avere una distribuzione omogenea dei nutrienti e mantengono a lungo un elevato tasso di umidità dopo una precipitazione: in questi casi è necessario trattare il terreno con materiali dilatanti per garantire una tessitura più sciolta (gessatura).

1.1.2 Caratteristiche dei contaminanti

Esistono svariate tipologie di contaminanti che possono essere presenti nei terreni che vengono sottoposti a trattamento in biopile, le principali caratteristiche che li descrivono sono elencate di seguito (Adriano et al., 1999; Jørgensen et al., 2000):

- **Volatilità:** i composti volatili, durante l'iniezione/estrazione di aria dalla biopila, tendono a evaporare piuttosto che a degradarsi. Nel trattamento effettuato con biopila è necessario che la circolazione d'aria venga operata tramite estrazione, in modo tale che l'aria estratta possa essere trattata prima di essere immessa nell'atmosfera;
- **Struttura chimica:** pur essendo tutti i componenti del petrolio biodegradabili, a seconda della struttura molecolare, il processo degradativo può richiedere tempi differenti. Maggiore è il peso molecolare maggiore sarà il tempo richiesto per la degradazione;
- **Concentrazione e tossicità:** Concentrazioni troppo elevate di contaminanti del petrolio e/o di metalli pesanti nel terreno possono inibire la crescita dei batteri. Concentrazioni troppo basse riducono la loro attività. Nel primo caso è possibile diluirle con terreno pulito ma è comunque sconsigliato il trattamento biologico per

concentrazioni maggiori di 5000 mg/kg. Nel secondo è necessario prestare attenzione a non fissare i valori obiettivo di decontaminazione al di sotto dei valori che inducono scarsa attività batterica (valori soglia).

1.1.3 Condizioni climatiche

Oltre a determinate caratteristiche che devono avere sia i terreni che i contaminanti presenti in essi, anche le condizioni climatiche giocano un ruolo fondamentale nel processo di trattamento in biopile:

- **Temperatura dell'ambiente:** influenza la temperatura del terreno e quindi l'attività microbica. In caso questa si discosti dall'intervallo ottimale 10-45°C è possibile intervenire con opere di copertura e riscaldamento dei cumuli;
- **Pioggiosità e vento:** la caduta di pioggia su un cumulo privo di copertura impermeabile può causare l'aumento dell'umidità del terreno e l'erosione superficiale. Per questo, nel caso di precipitazioni abbondanti, si devono realizzare delle sponde per la raccolta del percolato atte al controllo del dilavamento dei terreni. Il vento è causa di erosione ma un adeguato sistema di copertura minimizza questo fattore.

1.1.4 Progetto per il trattamento in biopile

Una volta verificata la possibilità di applicare le biopile per la bonifica del terreno in esame, si può passare al progetto, che dovrà comprendere una descrizione dettagliata della struttura. La costruzione della biopila include (Baldan et al., 2015; Jørgensen et al., 2000):

- La base della stessa, che funge da barriera contro la migrazione dei contaminanti nei terreni sottostanti la biopila;
- Le sponde per la raccolta del percolato;
- I teli per la copertura (se necessari);
- Tubature per l'iniezione/estrazione di aria;
- Sistemi per il trattamento del percolato;
- Sistemi per l'iniezione di acqua e nutrienti;
- Siti per il pretrattamento del terreno (stoccaggio);
- Strutture per il trattamento dei composti volatili.

1.1.5 Monitoraggio per il trattamento in biopile

A seguito della messa in opera delle biopile, è necessario verificarne il corretto funzionamento. A questo scopo si deve predisporre un piano di monitoraggio per assicurare l'ottimizzazione dei tassi di biodegradazione, per seguire la riduzione delle concentrazioni dei contaminanti, per monitorare le emissioni di vapori o la migrazione di

contaminanti nei terreni al di sotto della biopila e infine per verificare la qualità delle acque sotterranee (Norton et al., 1992). Il piano delle attività deve prevedere l'eventualità di modifiche della gestione dell'intervento, a seconda di quanto rilevato in corso d'opera relativamente alle variazioni dei contaminanti e all'attività batterica. Inoltre, deve tener conto delle variazioni climatiche stagionali. All'avvio del sistema si deve misurare la concentrazione di O₂ presso tutti i punti di monitoraggio: questo è il parametro di controllo più importante per la biopila. La verifica deve essere compiuta ogni poche ore dopo aver posato il terreno fino alla stabilizzazione della concentrazione di ossigeno (O₂). È inoltre importante il controllo periodico dei sistemi di aerazione (Kriipsalu & Nammari, 2010). La manutenzione del sistema di trattamento dei gas estratti avviene per la maggior parte di questi sistemi tramite un'unità a carboni attivi o un biofiltro che devono essere ispezionate regolarmente per escludere la presenza di ruggine e perdite. Il monitoraggio viene effettuato mediante il campionamento periodico del terreno e dei gas interstiziali (prove respirometriche a cadenza mensile). Il campionamento del terreno deve essere eseguito per valutare il tasso di degradazione nel tempo dei contaminanti nella biopila, per stimare la durata minima del trattamento per il raggiungimento degli obiettivi di risanamento. È possibile stimare il tasso di degradazione anche dalle prove respirometriche. La prova viene condotta tramite iniezione di He all'interno della biopila per un tempo sufficiente ad aerare completamente il terreno. Successivamente vengono misurate le concentrazioni di ossigeno, anidride carbonica, elio (He) e idrocarburi (TPH) (Kriipsalu & Nammari, 2010). Graficando i tassi di biodegradazione ottenuti tramite l'interpretazione delle prove respirometriche successive, si può osservare una progressiva diminuzione di questi; quando cessano di diminuire è possibile effettuare la prova respirometrica di chiusura e il campionamento finale del terreno.

1.1.6 Possibili additivi utilizzabili

Come detto in precedenza per il pretrattamento dei terreni da sottoporre a decontaminazione è necessario l'utilizzo di diverse tipologie di sostanze organiche o organismi, come verrà spiegato di seguito, con l'obiettivo di aumentare l'attività microbica dei batteri demolitori presenti nei suoli sotto trattamento. Questo processo viene definito biostimolazione. (Baheri, 2002; Cavazzoli et al., 2023; Ceccanti et al., 2006; Leahy & Colwell, 1990; Liu et al., 2010; Ma et al., 2016). Vengono applicati nutrienti e tensioattivi, frammenti di corteccia, trucioli, paglia, segatura o altro materiale organico come agente di carica. Aggiungendo una matrice organica al suolo contaminato si potenzia l'attività microbica generale e anche l'attività di specifici biodegradatori, che possono essere presenti nel suolo contaminato o introdotti insieme al materiale organico. Altri componenti organici che vengono utilizzati durante questa fase di trattamento sono fanghi o compost, letame, rifiuti di giardino e rifiuti di lavorazione degli alimenti. Questi possono facilitare la degradazione dei contaminanti organici perché svolgono un ruolo nell'integrazione di nutrienti e fonte di carbonio nel suolo contaminato. I fanghi di depurazione e il compost possono contenere abbondanti composti dell'azoto (N) e materia organica e quindi avere un grande potenziale nel biorisanamento, inoltre hanno

un'elevata diversità microbica, con popolazioni microbiche totali molto più elevate rispetto ai terreni fertili. Un'altra tipologia di additivi è stata recentemente scoperta e utilizzata e riporta buoni valori di efficienza: i funghi mucilluginosi, come *Trametes versicolor* e *Phanerochaete chrysosporium* (Srikanth et al., 2022). Il bioassorbimento e la biodegradazione diretta degli IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici) nel suolo vengono promossi sinergicamente da questi microrganismi selvatici, contribuendo al biorisanamento del suolo contaminato. I microrganismi vivi possono produrre un'ampia gamma di materiali organici solubili (come biosurfattanti e sostanze polimeriche extracellulari) e possono formare biofilm attorno alle fonti di composti organici volatili (VOC), che possono imitare i solventi organici, estraendo i VOC assorbiti dal suolo per superare le limitazioni del trasferimento di massa del desorbimento. Il bioincremento comporta l'introduzione di colture batteriche in un terreno contaminato, di solito in combinazione con la biostimolazione: è stata sperimentata l'inoculazione multipla del suolo con batteri indigeni. Per quanto riguarda la degradazione del gasolio e dell'olio motore si è rilevata una maggiore efficacia del biorisanamento (circa il 50% in più) rispetto ad un suolo di controllo non inoculato e del 30% rispetto ad un suolo che è stato inoculato una sola volta. L'applicazione di biosurfattanti può essere realizzata irrigando il terreno. I bioemulsionanti possono emulsionare gli idrocarburi, migliorando così la loro solubilità in acqua e aumentando lo spostamento delle sostanze oleose dalle particelle del suolo. I microrganismi produttori di biosurfattanti, come batteri e funghi, che sono anche degradatori di idrocarburi, possono essere utilizzati per accelerare la bonifica dei siti contaminati. Molti microrganismi sono in grado di produrre tensioattivi: *Pseudomonas*, *Nocardia*, *Rhodococcus*, *Bacillus*, *Arthrobacter*, *Torulopsis* e *Candida* (Christofi e Ivshina, 2002).

1.1.7 Vantaggi e svantaggi del trattamento

Di seguito è riportata la Tabella 1 con l'elenco dei possibili vantaggi in contrapposizione ai relativi svantaggi del trattamento in biopile di terreni contaminati. Per la creazione della tabella sono stati valutati fattori socio-economici come ad esempio i costi o l'occupazione di suolo oltre ai fattori ambientali (Bollag J-M et al., 1999).

Vantaggi	Svantaggi
Progettazione ed implementazione semplici	Difficoltà ad ottenere riduzioni di concentrazioni superiori al 95% e inferiori a 0.1 mg/kg
Tempi di trattamento brevi (da 3 mesi a 2 anni)	Ridotta efficacia per concentrazioni molto elevate (tot idrocarburi > 5000mg/kg)
Costi limitati: 25-80 euro/tonn di terreno contaminato	Possibilità di inibire la crescita microbica in presenza di alte concentrazioni di metalli pesanti (>2500 mg/kg)

Efficace su composti organici con tassi lenti di biodegradazione	Evaporazione favorita alla biodegradazione se si tratta di composti volatili
Richiede meno spazio del landfarming	Richiede molto spazio (anche se meno del landfarming)
Possibile progettazione come sistema chiuso	La generazione di vapori può richiedere un trattamento prima dello scarico
Possibile progettazione per tutte le combinazioni tra condizioni del sito e tipologia di contaminanti	In caso di produzione consistente di percolato necessario rivestimento di fondo
Una volta trattato il terreno viene considerato pulito e non richiede particolari contenimenti	

Tabella 1. Vantaggi e svantaggi del trattamento in biopile.

1.2 Normativa di riferimento

Il Dlgs n.152/06 (norme in materia ambientale) fornisce la definizione di rifiuto in riferimento alla direttiva 2008/98/CE. Si definisce “rifiuto” qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l’obbligo di disfarsi. I rifiuti si dividono in urbani, speciali e pericolosi, in base alle caratteristiche che possiedono e che sono descritte negli allegati del Dlgs 152/06. Nel caso dello scenario di gestione in materia di rifiuti e di bonifica dei siti inquinati, i rifiuti vengono classificati come urbani o speciali a seconda della loro origine, e come “pericolosi” o “non pericolosi” secondo caratteristiche di pericolosità definite dal Dlgs n.152/06 (Norme in materia ambientale), parte quarta (norme in materia di gestione dei rifiuti e di bonifica dei siti inquinati), Art. 184 “classificazione”. Nell’Art. 184bis viene data la definizione di “sottoprodotto”, materiale che quindi differisce dal “rifiuto” se soddisfa le caratteristiche elencate in tale articolo. Nell’Art 184ter vengono indicate le metodologie per la cessazione della qualifica di rifiuto dei materiali e i criteri specifici che i materiali devono soddisfare sotto determinate condizioni per poter smettere di essere considerati “rifiuti”. L’articolo 208 del Dlgs 152/06 disciplina gli impianti di smaltimento e recupero dei rifiuti: “I soggetti che intendono realizzare e gestire nuovi impianti di smaltimento o di recupero di rifiuti, anche pericolosi, devono presentare apposita domanda alla regione competente per territorio, allegando il progetto definitivo dell’impianto e la documentazione tecnica prevista per la realizzazione del progetto stesso dalle disposizioni vigenti in materia urbanistica, di tutela ambientale, di salute di sicurezza sul lavoro e di igiene pubblica”. L’articolo 208 definisce inoltre tutte le modalità e le documentazioni necessarie all’avvio di un impianto di trattamento dei rifiuti che rispetti le norme ambientali. In aggiunta viene definito il concetto di End of Waste, definito e normato sempre dalla direttiva 2008/98/CE, la quale nell’art. 6 definisce la fine del concetto di “rifiuto” quando tale è sottoposto ad operazioni di recupero, come il riciclaggio, e presenta determinate condizioni (Dlgs 152/06):

- La sostanza o l’oggetto vengono utilizzati per scopi specifici;
- Esiste un mercato o una domanda per tale sostanza od oggetto;

- La sostanza o l'oggetto soddisfano i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispettano la normativa e gli standard esistenti applicabili ai prodotti;
- L'utilizzo della sostanza o dell'oggetto non può causare impatti complessivi negativi sull'ambiente o sulla salute umana.

Infine, il Decreto 27 settembre 2022, n.152 riporta il regolamento che disciplina la cessazione della qualifica di "rifiuto" dei rifiuti inerti da costruzione e demolizione e di altri rifiuti inerti di origine minerale, sempre in riferimento ai sensi dell'articolo 184 ter, comma 2, del Dlgs 152/06.

1.3 Descrizione e struttura dell'impianto

L'impianto di recupero rifiuti da spazzamento stradale e speciali non inerti di Ladurner Remedia è situato a Mira (VE). L'impianto è costituito da una piattaforma polifunzionale finalizzata alla gestione dei rifiuti urbani derivanti da spazzamento stradale (codice CER 200303) e altre tipologie di rifiuti derivanti per la maggior parte da bonifiche di aree industriali, commerciali o residenziali o riqualificazione di esse. L'impianto è stato autorizzato con l'autorizzazione "Determina 2346/2017" della città metropolitana di Venezia e ss mm ii. In Tabella 2 si riportano le dimensioni del capannone:

Dimensioni del Capannone		
Lunghezza	76	m
Larghezza	77	m
Altezza	8	m
Volume	48.963	m ³
Area	5.852	m ²

Tabella 2. Dimensioni del capannone.

Sono previste specifiche linee di trattamento per il recupero:

- Operazioni meccaniche quali selezione e cernita mediante vagliature, frantumazioni, miscele, disidratazioni e stabilizzazioni;
- Lavaggio dei terreni (soil washing), dei rifiuti da spazzamento ed altri rifiuti contaminati da inquinanti di natura organica e/o inorganica;
- Trattamento in biopila di terreni contaminati da inquinanti di natura organica rappresentati principalmente dagli idrocarburi.

Le 3 sezioni sono situate tutte all'interno di un capannone coperto, in particolare i trattamenti di tipo meccanico, come la vagliatura e la frantumazione, vengono svolti in una zona centrale del capannone mediante l'utilizzo di appositi impianti mobili quali vagli e frantoi.

Per poter essere ricevuti dall'impianto i rifiuti devono essere accompagnati da Analisi di Caratterizzazione e da un Test di Cessione ai sensi dell'Allegato 3 del DM 05/02/1998. Ogni lotto in ingresso viene identificato con un apposito codice. I lotti non possono avere volumi superiori ai 1000 m³ l'uno. Al fine di ottimizzare le lavorazioni, possono essere accorpati lotti diversi che presentano medesime tipologie di inquinanti e stesso livello di contaminazione: andranno quindi accorpati lotti con medesimi inquinanti con concentrazioni comprese tra colonna A e colonna B (DLgs 152/06 Allegato 5 Parte IV tabella 1) o con concentrazioni superiori a colonna B del medesimo decreto. Per lo stoccaggio dei rifiuti sono individuate specifiche aree interne al capannone, il volume complessivo di rifiuti stoccabili è di 18000 m³.

Nella sezione operazioni meccaniche le operazioni applicate consistono in selezione, frantumazione, miscelazione, disidratazione e aggiunta di leganti idraulici. Anche queste attività vengono svolte all'interno del capannone. Tutte le attività sopracitate sono finalizzate ad ottimizzare il recupero dei rifiuti e a separare le frazioni non recuperabili da quelle destinate al trattamento in impianto, e possono modificare le caratteristiche fisiche dei rifiuti a livello di volumi, rimozione di frazioni esterne, omogenizzazione dei lotti e miglioramento delle caratteristiche fisiche (come, ad esempio, la coesività o l'umidità). Durante lo svolgimento delle attività avvengono svariati controlli, dal pretrattamento e quindi lo stoccaggio dei rifiuti fino all'uscita dei materiali dal processo.

La sezione di lavaggio dei rifiuti urbani propone la separazione tramite processi chimico-fisici del lavaggio degli inerti dalla materia organica con l'obiettivo di recuperare la maggior quantità di frazione inerte possibile. Anche questa sezione è situata all'interno del capannone ed il processo è caratterizzato dalle seguenti fasi fondamentali:

- Trasferimento delle sostanze inquinanti presenti sotto forma disciolta, emulsionata o in sospensione dai terreni alle acque di lavaggio;
- Separazione delle frazioni solide estranee mediante processi di selezione;
- Rimozione dei contaminanti tramite processi chimico-fisici di precipitazione, flocculazione e sedimentazione;
- Concentrazione dei contaminanti organici in fanghi palabili.

Subito dopo essere stoccati i rifiuti vengono separati e vagliati in modo da separare le frazioni grossolane da quelle leggere, ed eliminare eventuale frazione inorganica come plastica o lattine. Il rifiuto passa poi all'unità di lavaggio, dove le frazioni leggere vengono sottoposte a lavaggio in acqua controcorrente per separare i rifiuti dagli inerti (di granulometria superiore a 2-4 mm) grazie ad azioni di tipo chimico e fisico. La frazione rimanente viene trascinata dall'acqua alla fase successiva, dove un idrociclone e un classificatore a spirali separano le sabbie dal limo. Le acque di lavaggio vengono inviate

ad una sezione di trattamento e depurazione che permette il riutilizzo del 100% dell'acqua di processo dell'impianto.

Infine, la sezione recupero inerti mediante biopila, ovvero il trattamento parallelo e alternativo al soil washing. Questa attività è finalizzata al trattamento dei rifiuti contaminati da inquinanti di natura organica. Il processo avviene internamente al capannone, all'interno di apposite strutture (6 biocelle). La potenzialità di recupero non è definita a priori ma dipende da svariati fattori, come ad esempio il grado di contaminazione dei terreni, la tipologia di inquinanti presenti, la temperatura e l'umidità del terreno che sarà sottoposto al trattamento. Altri fattori importanti sono quelli di tipo fisico, come ad esempio la granulometria, il pH, l'acidità ecc. La durata media di giacenza dei terreni nelle biocelle è di circa 40 giorni. Il processo viene ottimizzato mantenendo le condizioni ottimali per la biodegradazione batterica tramite le seguenti operazioni:

- Aggiunta di nutrienti per il processo di biodegradazione (ad esempio acqua e glucosio);
- Rivoltamento periodico dei cumuli;
- Insufflazione o aspirazione forzata di aria grazie ad un'apposita soffiante;
- Irrigazione per mantenere determinati livelli di umidità.

Durante il periodo di trattamento il processo viene monitorato mediante analisi dirette ed indirette: periodicamente viene prelevato un campione rappresentativo formato da vari incrementi presi lungo tutta la biopila e a profondità circa centrale nel quale vengono ricercati gli inquinanti indicatori ed il carbonio organico totale (TOC). Vengono inoltre eseguite analisi con strumentazione di campo dei valori di consumo di O₂ temperatura, umidità e le caratteristiche organolettiche del rifiuto (ad esempio odore, stato fisico, umidità). I prodotti in uscita alla fine del trattamento verranno nuovamente analizzati e dovranno aver raggiunto concentrazioni inferiori a colonna B per tutti gli inquinanti presenti, oltre a rispettare i limiti del test di cessione per recupero e le caratteristiche organolettiche dovranno essere compatibili con il successivo riutilizzo del materiale. Le frazioni ottenibili da questa tipologia di trattamento comprendono range che vanno da 0 a 10mm, da 0 a 30mm, da 0 a 120mm e da 30 a 120mm e sono utilizzabili per formare terreno di copertura vegetale in zone a destinazione commerciale o come copertura di discariche, prodotti marchiati CE per miscele legate e non ed infine come materiali per riempimenti e drenaggi.

L'impianto possiede inoltre un avanzato sistema di raccolta e smaltimento delle acque reflue e meteoriche in cui sono presenti sistemi interni di raccolta di eventuali percolazioni causate dalla presenza dei rifiuti. Tutte le coperture dell'impianto sono collegate al sistema di raccolta acque meteoriche, che vengono scaricate all'esterno verso le condotte circostanti l'impianto. I reflui liquidi derivanti dai processi di lavaggio delle terre saranno gestiti internamente, depurati e successivamente raccolti in un'apposita vasca per un futuro riutilizzo interno. Le aree scoperte presenti nell'impianto presentano una rete di raccolta acque meteoriche collegata a 4 vasche interrato per un volume complessivo di 872 m³ (utilizzate come raccolta acque di prima pioggia). Tutta l'acqua

raccolta dal sistema nelle vasche viene fatta confluire in una singola vasca con capacità utile di 1400 m³. Quest'ultima è collegata ad un sistema di trattamento chimico fisico che permette la depurazione delle acque, che verranno poi inviate ad altre due vasche e sfruttate nei processi di lavaggio dei terreni contaminati.

Tutte le lavorazioni vengono condotte all'interno del capannone chiuso e nelle biopile ed inoltre vengono trattati solidi non polvirulenti o addirittura umidi. Per questo motivo è possibile escludere il fattore di emissione di polveri e piuttosto concentrarsi sull'abbattimento della componente odorigena: sono presenti linee di aspirazione dell'aria che alimentano ciascuna un biofiltro, inoltre ogni biopila è dotata di un collegamento ad una soffiante che permette l'aspirazione dell'aria nei lotti in corso di trattamento. Un biofiltro consiste sostanzialmente in un insieme di materiale organico (come torba, corteccia, terriccio, legno, ecc), spesso contenuto all'interno di apposite strutture contenitive in cui l'aria viene fatta convogliare e tramite reazioni di ossidazione biochimica da parte di microrganismi presenti nel materiale di cui il biofiltro è composto l'aria viene depurata (Datta & Allen, n.d.). La soffiante presente nell'impianto è dotata di un frequenzimetro per regolare la potenza di erogazione, un quadro di comando per avere la possibilità di regolare i flussi d'aria, un separatore di condensa per l'aria aspirata, 2 filtri a carbone attivo posti in serie e un collegamento alle tubazioni atte all'aspirazione dell'aria di tutto il capannone. L'aria viene convogliata attraverso i biofiltri (costruiti ammassando una miscela di legno, corteccia e compost) e attraverso meccanismi chimici, fisici e biologici avviene il trattamento e la purificazione dell'aria "esausta".

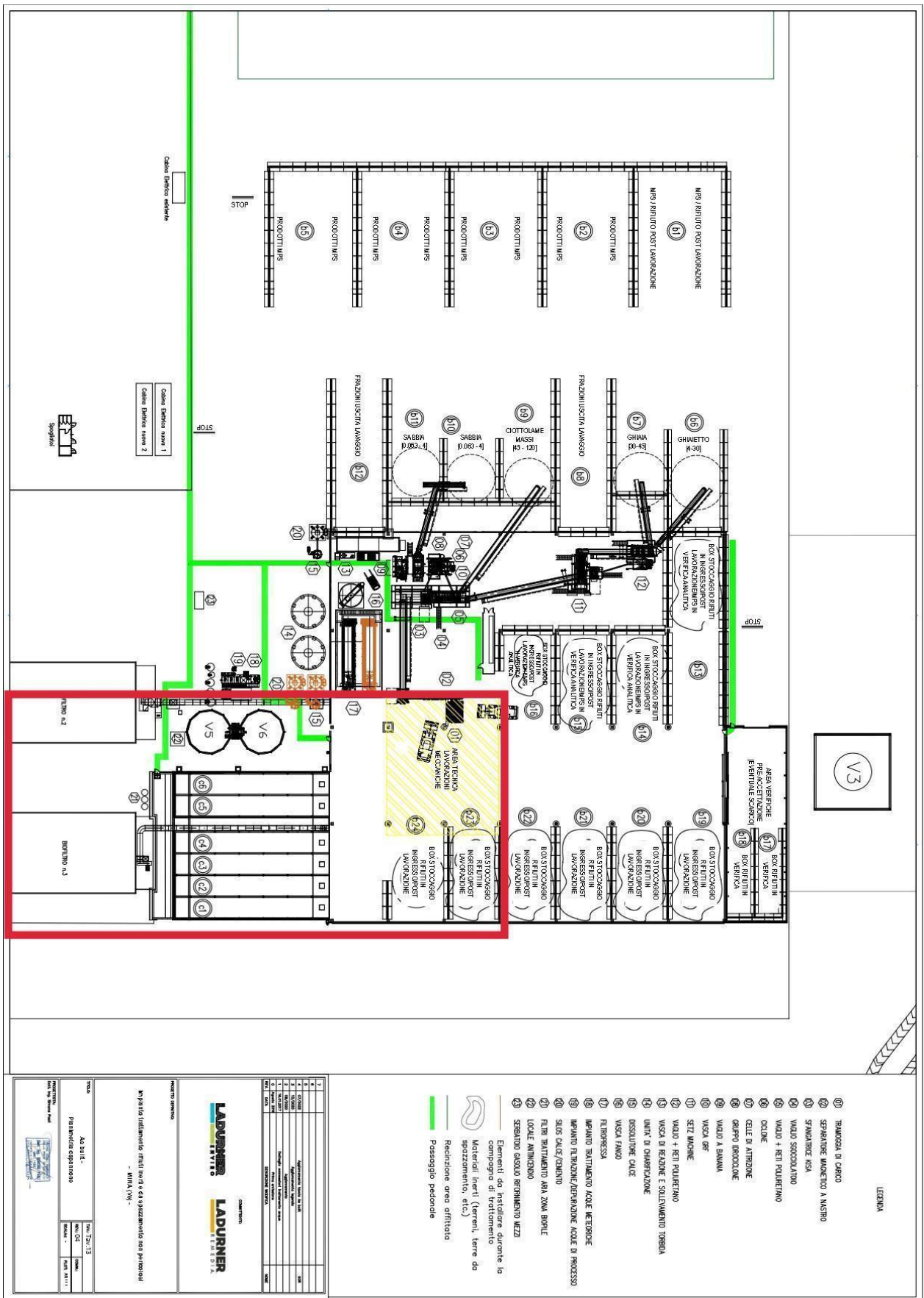


Figura 4. Planimetria dell'impianto di Ladurner Remedia con focus (rettangolo rosso) sulla zona adibita al trattamento in biopile.

2. Valutazione dell'efficacia del trattamento in biopile

2.1 Raccolta dei dati

Per la fase di raccolta dei dati relativi alle caratteristiche delle biopile e del terreno contenuto al loro interno sono state utilizzate e compilate delle schede di campo specifiche (Figura 5), per poter ottenere informazioni relative alla fase di formazione delle biopile e alla fase di trattamento vero e proprio. La scheda di campo utilizzata è stata la seguente:

Scheda monitoraggio biopile

Località:	
Data:	
Ora:	
Operatore:	
Denominazione lotti in trattamento:	

Ispezione periodica

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Linea CA	Linea Scarico	Biofiltro 3	Soffiante	Note
Monitoraggio Fase formazione biopile											
Verifica dello stato griglia aspirazione e nuovo geotessuto											
Verifica visiva stato delle condotte di aspirazione											
Condizioni fisiche materiale											
Odore											
Monitoraggio Fase processo											
Biopila in fase Statica o Dinamica (S/D)											
Attività biofiltro (ventilatore acceso, letto umido, ev. odori)											
Verifica funzionamento della soffiante (S/N eventuali anomalie)											
Verifica apertura/chiusura valvole retro biocelle (/, I, --)											
Misurazione Flusso (valvole C1-C6, Linea scarico)											
Ev. nuova regolazione flusso singole ubicazioni											
Misura della temperatura (Interna cumulo)											
Misura della temperatura (linea effluente retro biocelle)											
Misura della temperatura (ambientale interna capannone)											
Misura concentrazione dell'ossigeno disponibile (da Nesty Probe)											
Prova respirometrica (SI/NO)											
Verifica umidità (necessità di bagnaggio) SI/NO											
Verifica livello separatore di condensa											
Filtri CA attivi (1, 2, 3)											

Come si può notare dalla scheda in Figura 5, una prima compilazione veniva effettuata aggiungendo le informazioni relative alla località, data e ora del campionamento, all'operatore che eseguiva tale campionamento e alla denominazione dei lotti in analisi. Successivamente si passava alla compilazione relativa all'ispezione periodica: le colonne indicano la biopila di riferimento, la linea relativa ai biofiltri, alla soffiante e allo scarico.

La prima parte della scheda di campo, relativa al monitoraggio in fase di formazione delle biopile riporta nelle righe le informazioni relative allo stato della griglia di aspirazione e del geotessuto (posizionato sotto il cumulo di terreno inserito nella biopila), alla verifica visiva dello stato delle condotte di aspirazione, alle condizioni fisiche del materiale sotto trattamento ed inoltre alla presenza o assenza di un forte odore del cumulo.

La seconda parte della scheda prevede il monitoraggio delle varie biopile in fase di processo, in ordine:

- Indicazione della fase della biopila: statica (S, passiva) o dinamica (D, attiva);
- Dati relativi all'attività del biofiltro: verifica del corretto funzionamento, presenza di eventuali odori;
- Verifica del corretto funzionamento della soffiante o di eventuali anomalie, in caso di soffiante accesa nella scheda veniva riportato un "SI";
- Verifica dell'apertura o della chiusura (parziale o totale) delle valvole di aerazione presenti nel retro di ogni biocella, il simbolo "-" indica lo stato di apertura totale della biocella, il simbolo "/" una condizione intermedia di apertura ed il simbolo "I" la totale chiusura del flusso d'aria indirizzato dalla soffiante all'interno della biopila;
- Misurazione del flusso (in m/s), tramite l'utilizzo di un anemometro ad elica, prima di modificare i flussi;
- Misurazione del flusso (in m/s), sempre tramite l'utilizzo di un anemometro ad elica, dopo aver modificato i flussi ed aver quindi chiuso il flusso ad una singola biopila che successivamente sarebbe stata analizzata ad intervalli di tempo decisi dall'operatore;
- Misura della temperatura interna al cumulo (in °C), in zona centrale del cumulo, ad una profondità di circa 50cm, tramite l'utilizzo di un termometro dotato di un'apposita asta da poter inserire direttamente nel cumulo;
- Misura della temperatura nella linea degli effluenti nel retro delle biocelle (in °C), utilizzando un termometro digitale e inserendolo all'interno di un foro accessibile solo a valvola di aerazione aperta;

- Misura della temperatura interna del capannone (in °C), dato raccolto sempre grazie all'utilizzo di un termometro digitale;
- Misura della concentrazione di ossigeno disponibile (in mg/L) grazie all'utilizzo di un apposito misuratore di ossigeno collegato ad una canula in gomma inserita in profondità nel cumulo in modo da poter ottenere dati relativi alla zona centrale e non superficiale del cumulo stesso;
- Presenza o assenza di una prova respirometrica in atto nella biopila: nel caso la biopila in analisi fosse in una fase di analisi tramite prova respirometrica (quindi a flusso d'aria chiuso) veniva indicata con "SI" e tutte le altre biopile con "NO";
- Verifica dell'umidità, in caso di necessità di bagnaggio o umidificazione del cumulo veniva riportato un "SI", in caso contrario un "NO";
- Verifica del livello del separatore di condensa, posto nel retro delle biocelle e collegato alla soffiante, tramite analisi visiva e rapporti di lunghezze tra la lunghezza dell'asta e la condensa interna ad essa che rappresenta il livello di condensazione è stato possibile riportare un valore percentuale del livello di umidità;
- Filtri a carbone attivo (CA), è stato indicato il numero di biofiltri attivi durante il momento dell'analisi;
- Verifica dei VOC, ovvero dei composti organici volatili, tramite l'utilizzo di un rilevatore di VOC (denominato PID) a monte e a valle del passaggio d'aria dei filtri a carbone attivo (CA).

Nella sezione finale "note aggiuntive" venivano appuntate le informazioni relative alla biopila in fase di prova respirometrica in una tabella, indicando nelle colonne gli orari dell'analisi (svolta dalle 4 alle 6 volte nel corso di una giornata), i valori di temperatura e di O₂ con le relative variazioni. I diversi orari venivano indicati come t0 (prima analisi, veniva riportata l'ora esatta), t1 (seconda analisi, anche qui veniva riportata l'ora esatta) e così via.

Le Figure dalla Figura 6 alla Figura 17 riportano alcuni dettagli dei cumuli, delle biopile, degli strumenti utilizzati e delle fasi di monitoraggio delle biopile:



Figura 6. Dettaglio di un cumulo di terreno in attesa di essere inserito nella biopila.



Figura 7. Dettaglio dell'interno della biopila e geotessuto sottostante il cumulo.



Figura 8. Cartello identificativo di un lotto di terreno inserito in una biopila.



Figura 9. Fase di regolazione del flusso d'aria nel retro di una biopila



Figura 10. Dettaglio sulla misurazione del flusso tramite anemometro ad elica nel retro di una biopila.



Figura 11. Misuratore di O₂ utilizzato per calcolare i valori di O₂ e CO₂ nella biopila.



Figura 12. Inserimento della canula all'interno del cumulo per successive misurazioni.



Figura 13. Dettaglio della canula interrata e parzialmente fuoriuscente dal cumulo.



Figura 14. Dettaglio sul tubo di collegamento tra il misuratore di O₂ e la canula.



Figura 15. Fase di collegamento tra il misuratore di O₂ e la canula inserita nel cumulo.



Figura 16. Dettaglio del funzionamento e dei valori riportati dal misuratore di O₂ durante un'analisi.



Figura 17. Valutazione dei VOC nella linea dei biofiltri tramite l'utilizzo del PID.

Oltre alla compilazione delle schede di campo, avvenuta grazie ai monitoraggi effettuati durante il periodo di tirocinio, sono state raccolte informazioni sugli andamenti dei livelli di contaminazione dei lotti di terreno sottoposti a trattamento in biopile. I lotti inseriti all'interno delle biocelle sono il risultato di un accorpamento di tipologie di terreni simili per livelli di contaminazione, appartenenti quindi o alla categoria "contaminazione tra col. A e col. B" o alla categoria "maggiore di col. B" (D.Lgs. 152/2006 Allegato 5, Parte IV). Ogni lotto di terreno è stato diviso e inserito in più biopile contemporaneamente, data l'impossibilità di una singola biopila a contenere un intero lotto. Per tracciare i terreni sottoposti a trattamento ogni lotto è stato dotato di un codice identificativo e per valutare l'efficacia del trattamento in biopile su ogni lotto sono state effettuate analisi iniziali (inizio trattamento), e finali (fine trattamento) tenendo conto della quantità di idrocarburi pesanti ((HC)>12) presenti, espressa in mg/kg e della domanda chimica di ossigeno (COD), espressa in mg/L. La domanda chimica di ossigeno (COD) è stata valutata poiché rappresenta il quantitativo di ossigeno (in mg/L) necessario per la completa ossidazione per via chimica dei composti organici ed inorganici presenti in un campione (Silva et al., 2011), e di conseguenza risulta essere un ottimo indicatore della degradazione degli idrocarburi durante il processo di trattamento in biopile. Per quanto riguarda gli idrocarburi pesanti invece, il D.Lgs. 152/2006 Allegato 5, Parte IV riporta un range di valori che va da 50mg/kg a 750mg/kg per i contaminanti compresi tra col. A e col. B, oltre i 750mg/kg i contaminanti sono considerati appartenenti alla categoria "maggiore di col. B".

2.2 Risultati del monitoraggio delle biopile

Grazie alla compilazione delle schede di campo (Figura 5) è stato possibile riportare i dati relativi alle prove respirometriche applicate alle singole biopile in alcuni files Excel ed è quindi stato possibile costruire dei grafici di andamento dell' O₂ (la diminuzione della concentrazione di ossigeno denota la corretta attività batterica, quindi il corretto funzionamento del trattamento in biopile) e delle variazioni di temperatura all'interno delle biopile sia all'interno delle biocelle che nel retro, nella zona interna alle valvole di aerazione. Le prove respirometriche sono state applicate ad ogni biopila, una per volta in giorni diversi, chiudendo le valvole di aerazione presenti nel retro di ogni biocella (e quindi rilevando un flusso uguale a zero), raccogliendo i dati relativi a concentrazione di O₂ e variazioni di temperatura per più volte durante le 24 ore successive e annotando i tempi come t₀, t₁, t₂, ecc affiancati dai valori dei dati ricercati. Per quanto riguarda l'andamento della concentrazione di O₂ le prove respirometriche sono state operate in successione partendo dalla biopila C5 in data 07/06/2023, e successivamente biopila C6 in data 13/06/2023, biopila C1 in data 14/06/2023, biopila C2 in data 15/06/2023, biopila C3 in data 20/06/2023 e biopila C4 in data 22/06/2023. Di seguito si riportano le tabelle (Tabella 3, Tabella 4, Tabella 5, Tabella 6, Tabella 7, Tabella 8) e i grafici di andamento delle concentrazioni di O₂ (Figura 18) durante le prove respirometriche di ogni singola biopila.

Biopila C1	
Tempo (orario)	O ₂ (mg/L)
t0: 14:46	20,1
t1: 15:16	20,1
t2: 15:32	20,1
t3: 15:54	20,1
t4: 16:30	20,0
t5: 9:35 (riferito al 15/6/23)	19,9

Tabella 3. Tabella relativa ai tempi di misurazione e relativi valori di concentrazione di O₂ nella biopila C1.

Biopila C2	
Tempo (orario)	O ₂ (mg/L)
t0: 14:43	20,9
t1: 15:02	20,5
t2: 15:19	20,5
t3: 16:23	20,4
t4: 9:41 (riferito al 16/6/23)	20,0
t5: 12:43 (riferito al 16/6/23)	19,9

Tabella 4. Tabella relativa ai tempi di misurazione e relativi valori di concentrazione di O₂ nella biopila C2.

Biopila C3	
Tempo (orario)	O ₂ (mg/L)
t0: 14:50	20,0
t1: 15:39	19,8
t2: 16:31	19,9
t3: 12:15 (riferito al 21/6/23)	19,7
t4: 14:17 (riferito al 21/6/23)	19,6

Tabella 5. Tabella relativa ai tempi di misurazione e relativi valori di concentrazione di O₂ nella biopila C3.

Biopila C4	
Tempo (orario)	O ₂ (mg/L)
t0: 14:24	20,3
t1: 15:36	20,4
t2: 16:36	20,3
t3: 10:09 (riferito al 23/6/23)	20,3
t4: 12:03 (riferito al 23/6/23)	20,2

Tabella 6. Tabella relativa ai tempi di misurazione e relativi valori di concentrazione di O₂ nella biopila C4.

Biopila C5	
Tempo (orario)	O ₂ (mg/L)
t0: 12:11	20,5
t1: 12:21	20,0
t2: 12:38	20,0
t3: 13:00	20,0
t4: 14:30	19,5
t5: 17:00	17,5
t6: 8:30 (mattina 8/6/23)	13,0

Tabella 7. Tabella relativa ai tempi di misurazione e relativi valori di concentrazione di O₂ nella biopila C5.

Biopila C6	
Tempo (orario)	O ₂ (mg/L)
t0: 10:11	20,0
t1: 10:26	19,0
t2: 10:42	19,0
t3: 10:51	19,5
t4: 11:25	19,0
t5: 12:41	18,5
t6: 14:57	18,0

t7: 9:12 (riferito al 14/6/23)	16,0
-----------------------------------	------

Tabella 8. Tabella relativa ai tempi di misurazione e relativi valori di concentrazione di O₂ nella biopila C6.

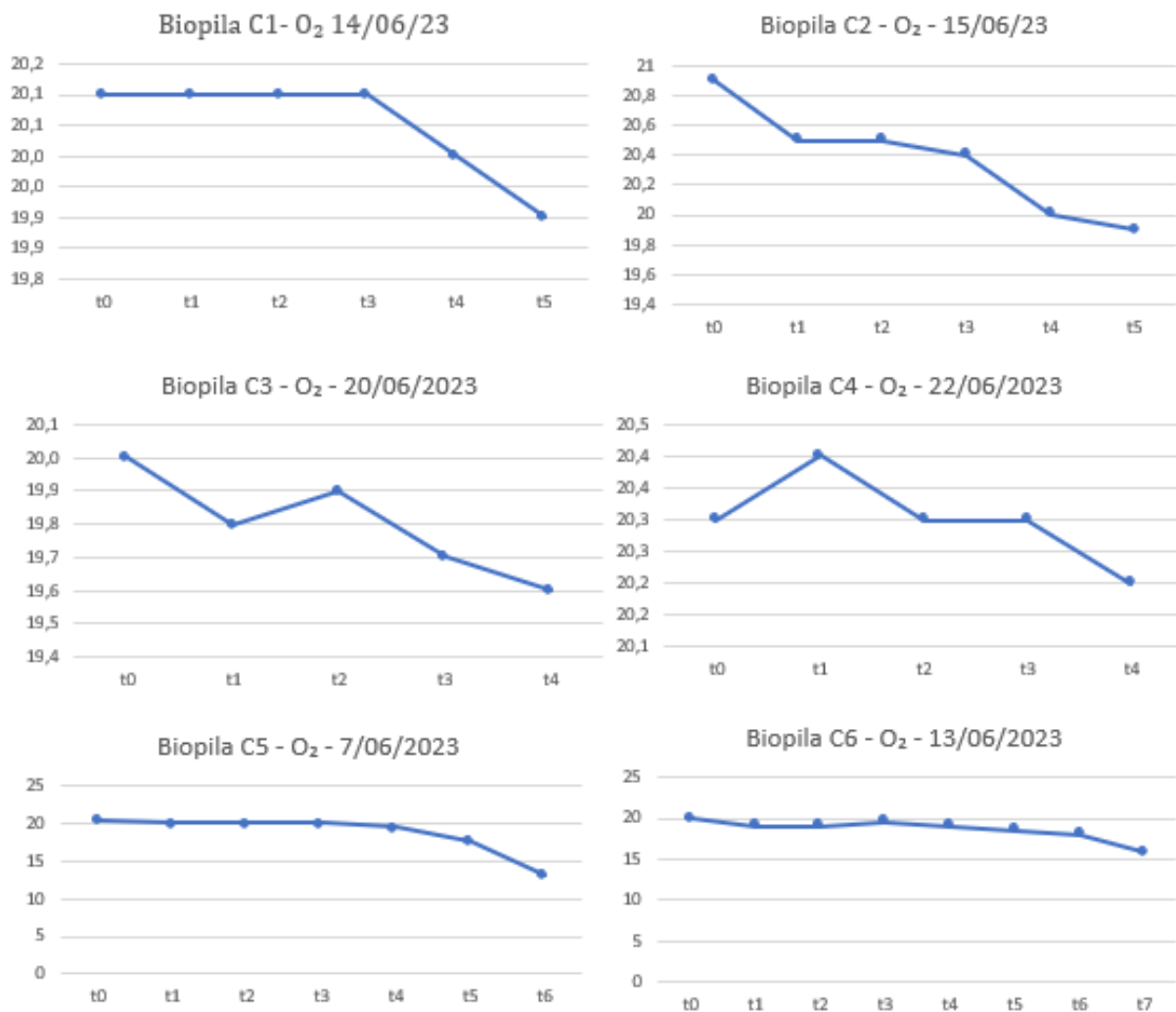


Figura 18. Grafici di andamento della concentrazione di O₂ di ogni singola biopila durante la prova respirometrica.

Come anticipato, dalla compilazione delle schede di campo è stata possibile anche l'estrapolazione di dati relativi alle temperature interne ai cumuli presenti nelle biopile e nel retro delle biocelle, nella zona di aerazione. Conseguentemente alla raccolta di questi dati sono stati sviluppati dei grafici di variazione delle temperature in 10 diverse date per quel che riguarda le temperature interne e in 7 diverse date per le temperature nel retro delle biocelle. Di seguito si riportano la Tabella 9 con i dati di temperatura interna e nel retro e la Figura 19 e la Figura 20 con i grafici di andamento delle temperature.

Data	T°C											
	C1		C2		C3		C4		C5		C6	
	Interno	Retro	Interno	Retro	Interno	Retro	Interno	Retro	Interno	Retro	Interno	Retro
30/05/23	21,9		21,0		21,0		21,0		23,0		20,9	
31/05/23	22,5		21,0		20,9		19,9		25,5		20,5	
01/06/23	22,0		21,0		21,0		20,9		25,5		21,0	
07/06/23	21,0	18,4	21,0	18,6	21,5	18,4	21,0	18,2	25,0	27,2	22,0	17,8
08/06/23	22,2	19,0	21,5	18,5	21,0	20,4	22,0	17,8	26,7	25,7	21,9	17,9
09/06/23	21,5	19,7	22,1	20,1	21,0	19,6	20,8	18,3	25,8	27,2	22,0	18,3
13/06/23	22,3	19,5	22,0	19,2	22,2	21,0	21,0	20,1	26,0	27,9	23,5	23,5
14/06/23	23,0	22,5	22,2	19,5	21,5	23,2	22,0	18,2	27,0	28,1	22,8	20,6
15/06/23	23,5	20,0	23,0	19,0	22,5	20,9	21,0	19,2	26,2	26,2	22,0	23,0
20/06/23	21,8	21,3	23,5	20,5	23,0	24,5	22,0	20,8	27,8	29,0	24,0	21,7

Tabella 9. Andamenti delle temperature all'interno dei cumuli e nella linea effluenti nel retro delle biocelle.

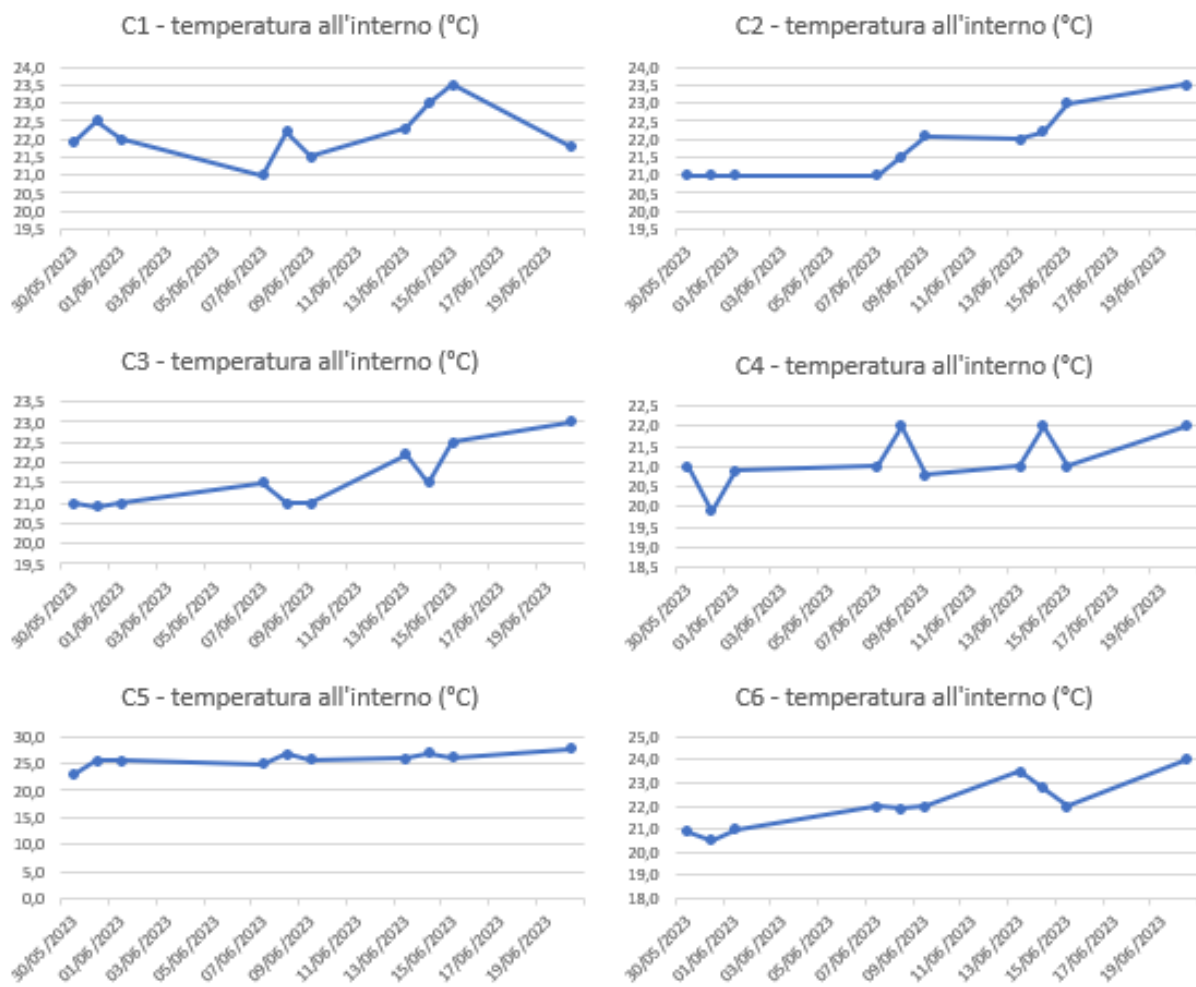


Figura 19. Grafici di andamento delle temperature interne relative alle sei biopile.

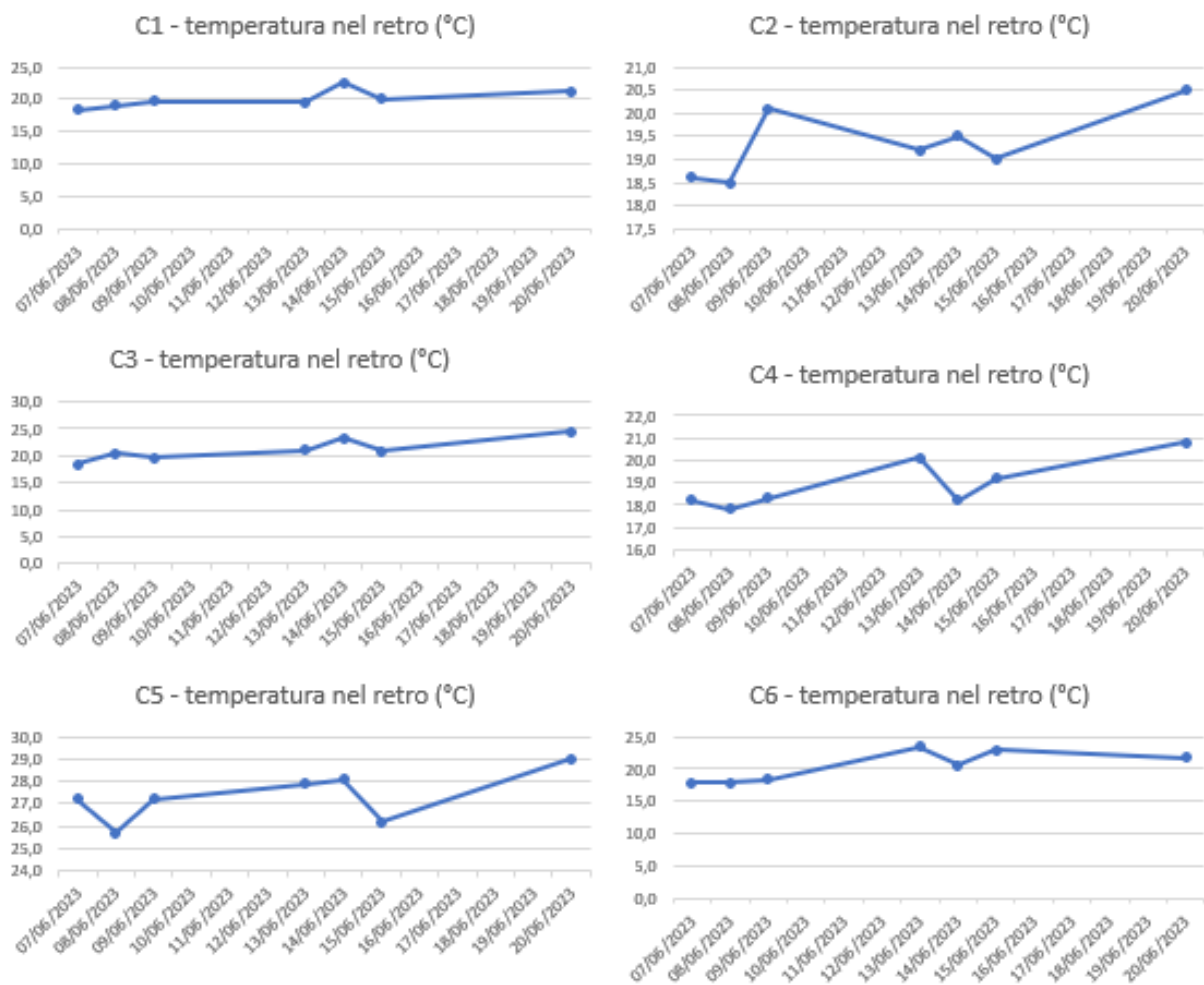


Figura 20. Grafici di andamento delle temperature nel retro del cumulo (linea effluente retro biocelle) relativi alle sei biopile.

Infine, grazie ai dati raccolti relativi ai valori iniziali e finali degli idrocarburi pesanti “(HC)>12” e della domanda chimica di ossigeno “COD” è stato possibile costruire delle tabelle che riportassero l’effettiva diminuzione di questi valori, dimostrazione dell’efficacia del trattamento in biopile. Di seguito si riportano le tabelle relative ai lotti sottoposti a trattamento in biopile, sia attive che passive, e i valori iniziali e finali di (HC)>12 e COD. In ogni tabella è indicato all’interno di quali biopile è stato suddiviso il lotto in analisi. Il Lotto 1 presentava livelli di contaminanti compresi tra col. A e col. B, è stato suddiviso nelle biopile C1, C2 e C3 e trattato in biopila attiva, i Lotti 2 (suddiviso nelle biopile C1, C2, C3) e 3 (suddiviso nelle biopile C3, C4, C5, C6) sono stati sottoposti ad un trattamento in biopila passiva e presentavano una concentrazione di contaminanti compresa tra col. A e col. B, il Lotto 4 (suddiviso nelle biopile C5 e C6), che presentava livelli di contaminanti superiori a col. B, è stato sottoposto ad un trattamento in biopila passiva ed infine il lotto 5 è stato suddiviso nelle biopile C4, C5 e C6, trattato con biopila di tipologia attiva e presentava livelli di contaminanti superiori a colonna B.

LOTTI CON CONCENTRAZIONI INIZIALI TRA COLONNA A E COLONNA B:

	t(x)	t(0)	t(2)
	Media ponderata dei valori dei lotti in ingresso		
	Data	23/09/2022	21/12/2022
Lotto 1 (biopile C1, C2, C3)	(HC)>12 (in mg/kg)	635,0	203,7
	(COD) (in mg/L)	28,5	27,8

Tabella 10. Valori iniziali e finali di (HC)>12 e COD relativi al trattamento in biopile del lotto 1.

	t(x)	t(0)	t(2)
	Media ponderata dei valori dei lotti in ingresso		
	Data	24/02/2023	03/03/2023
Lotto 2 (biopile C1, C2, C3)	(HC)>12 (in mg/kg)	556,3	382,4
	(COD) (in mg/L)	18,6	14,6

Tabella 11. Valori iniziali e finali di (HC)>12 e COD relativi al trattamento in biopile del lotto 2.

	t(x)	t(0)	t(2)
	Media ponderata dei valori dei lotti in ingresso		
	Data	23/03/2023	03/05/2023
Lotto 3 (biopile C3, C4, C5, C6)	(HC)>12 (in mg/kg)	440,0	308,2
	(COD) (in mg/L)	-	22,5

Tabella 12. Valori iniziali e finali di (HC)>12 e COD relativi al trattamento in biopile del lotto 3.

LOTTI CON CONCENTRAZIONI INIZIALI MAGGIORI DI COLONNA B:

	t(x)	t(0)	t(2)
	Media ponderata dei valori dei lotti in ingresso		
	Data	30/05/2023	24/08/2023
Lotto 4 (biopile C5, C6)	(HC)>12 (in mg/kg)	2275,0	220,0
	(COD) (in mg/L)	42,0	20,6

Tabella 13. Valori iniziali e finali di (HC)>12 e COD relativi al trattamento in biopile del lotto 4.

	t(x)	t(0)	t(2)
	Media ponderata dei valori dei lotti in ingresso		
	Data		
Lotto 5 (biopile C4, C5, C6)	(HC)>12 (in mg/kg)	1489,4	484,9
	(COD) (in mg/L)	34,5	12,7

Tabella 14. Valori iniziali e finali di (HC)>12 e COD relativi al trattamento in biopile del lotto 5.

2.3 Interpretazione dei dati raccolti

Il terreno contaminato inserito all'interno di ogni biopila subisce un processo di biodegradazione degli elementi contaminanti, nel caso dei terreni trattati nell'impianto di Ladurner Remedia principalmente idrocarburi leggeri ((HC)<12) e non ((HC)>12). I batteri presenti nel cumulo, tramite un processo metabolico di degradazione, ossidano il carbonio presente nei contaminanti e lo trasformano in CO₂ consumando O₂. il processo di degradazione batterica causa una diminuzione delle concentrazioni di idrocarburi pesanti e della domanda chimica di ossigeno, parametri valutati in questa analisi per verificare l'efficacia del trattamento in biopile. Inoltre, l'analisi e la valutazione del consumo di O₂ e delle variazioni di temperatura all'interno e nel retro delle biopile fungono da ulteriore conferma per il raggiungimento del primo obiettivo di questo elaborato. I dati e i grafici raccolti e riportati nel paragrafo precedente hanno permesso la valutazione del corretto funzionamento del sistema di trattamento in biopile dell'impianto di Ladurner Remedia. Tutte le biopile durante la prova respirometrica hanno risposto positivamente alla variazione della concentrazione di O₂, riportando ognuna una diminuzione di questo valore durante il periodo di analisi. La diminuzione del valore di concentrazione di ossigeno durante la prova respirometrica non è stata identica o costante per ognuna delle biopile, questo è dovuto presumibilmente alle differenti caratteristiche del terreno e dei contaminanti presenti in ciascuna biocella. A terreni più compatti e coesivi (terreni argillosi o limosi) corrisponde in generale una minore diminuzione di ossigeno durante il trattamento poiché l'aria fatica maggiormente a penetrare nei pori liberi del terreno, e di conseguenza la quantità di ossigeno disponibile per la biodegradazione batterica è inferiore a quella presente in terreni sabbiosi o ghiaiosi, dove la circolazione dell'aria è maggiore. Inoltre, maggiore è la contaminazione e più risulta intenso il lavoro biodegradativo, in quanto è presente abbondanza di componenti da biodegradare (come gli idrocarburi pesanti nel nostro caso). Il lotto 4 rappresenta il caso dove la diminuzione della concentrazione di O₂ è stata più significativa (Figura 18): rispettivamente di 7,5 mg/L

(t0: 20,5 mg/L e t6: 13 mg/L) nella biopila C5 e 4 mg/L (t0: 20 mg/L e t7: 16 mg/L) nella biopila C6. L'analisi dell'andamento delle temperature riferite all'interno dei cumuli interni alle biocelle e della linea effluenti nel retro di ogni singola biocella è stata anch'essa utile per valutare il giusto funzionamento del processo di degradazione delle sostanze contaminanti presenti nei terreni sottoposti a trattamento in biopila. La demolizione delle sostanze inquinanti dovuta all'attività microbica è un processo che rilascia energia nell'ambiente circostante sotto forma di calore, di conseguenza il buon funzionamento di questo fenomeno può essere tracciato attraverso un aumento della temperatura dei cumuli. Come ci si aspettava, anche se di poco, le temperature sia all'interno dei cumuli che nella linea degli effluenti nel retro delle biocelle hanno registrato un aumento complessivo durante il periodo di analisi del trattamento. Anche in questo caso le variazioni di temperatura dipendono da vari fattori e direttamente dai livelli di attività microbica. Per quanto riguarda le temperature relative all'interno dei terreni nelle biocelle anche in questo caso le biopile C5 e C6 sono state le due che hanno presentato il maggior aumento di temperatura (Figura 19 , Figura 20): la biopila C5 è passata da una temperatura di 23°C (misura riferita al 30/05/2023) ad una temperatura di 27,8°C (misura riferita al 20/06/2023), mentre nella biopila C6 si è registrato un incremento di temperatura di 3,1°C, passando da 20,9°C (misura riferita al 30/05/2023) a 24°C (misura riferita al 20/06/2023). I dati sembrano rispettare la teoria: maggiori livelli di attività denotano maggiori consumi di O₂ e maggiori incrementi di T°C. Dalla lettura delle schede di campo è stato inoltre possibile evidenziare la differenza di composizione del terreno tra le biopile C5 e C6 e le rimanenti 4: le prime due presentavano condizioni fisiche ghiaiose e un forte odore (dovuto ad una maggiore presenza di idrocarburi appartenenti alla categoria "> col. B") mentre le altre 4 presentavano condizioni fisiche limose. Il fatto di presentare maggiori livelli di umidità per le biopile C1, C2, C3, e C4 potrebbe essere stato svantaggioso a livello di attività batterica poiché quest'ultima è aerobica e condizioni fisiche limose presentano livelli di ossigenazione inferiori a condizioni fisiche terrose, causando di conseguenza una minore attività batterica. Dall'analisi di Tabella 10, Tabella 11, Tabella 12, Tabella 13, Tabella 14 è stato possibile verificare l'efficacia del trattamento in biopile: tutti i lotti analizzati hanno riportato diminuzioni delle concentrazioni di idrocarburi pesanti ((HC>12) e della domanda chimica di ossigeno COD. Il corretto funzionamento dei processi di degradazione operati dai batteri ha permesso il biorisanamento dei terreni sottoposti a trattamento in biopile, abbassando ulteriormente le concentrazioni di idrocarburi pesanti appartenenti ai Lotti contenenti contaminanti "tra col. A e col. B" e portando i livelli di contaminanti del Lotto 4 da "maggiori col. B" a "compresi tra col. A e col. B" (quindi con valori di (HC>12) inferiori a 750mg/kg).

3. Metodologia Life Cycle Assessment (LCA)

3.1 Definizione dell'LCA

La SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) ha fornito una prima definizione di Analisi del Ciclo di Vita (Life Cycle Assessment, LCA), descrivendola come: “un procedimento oggettivo di valutazione dei carichi energetici e ambientali relativi ad un processo o un’attività effettuato attraverso l’identificazione dell’energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell’ambiente. La valutazione include l’intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l’estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l’uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale” (Ekvall, 2005; Fava et al., 2014).

L’LCA è una metodologia utilizzata per valutare le implicazioni ambientali di un prodotto lungo tutte le fasi del suo ciclo di vita, ossia l’estrazione delle materie prime, la lavorazione dei materiali, l’assemblaggio, l’uso e il fine vita (“dalla culla alla tomba”). Le implicazioni ambientali coprono tutti i tipi di impatto sull’ambiente, come il consumo di risorse e l’emissione di sostanze pericolose. Le valutazioni ambientali tengono quindi conto di tutti gli input (risorse come acqua, energia e materie prime utilizzate) e output (emissioni nell’ambiente ad esempio in aria, acqua e nel suolo) che caratterizzano il sistema in analisi. Oltre al fatto che l’LCA permette di valutare tutti gli impatti relativi ad un prodotto o un processo, questa procedura è molto utile anche per applicare un’ipotetica comparazione tra due prodotti (o processi) simili.

L’LCA è definita attualmente da due standard internazionali rappresentati dalle norme ISO della serie 14040:

- UNI EN ISO 14040:2021 [Fare clic o toccare qui per immettere il testo.](#) Gestione ambientale, Valutazione del ciclo di vita, Principi e quadro di riferimento;
- UNI EN ISO 14044:2021: Valutazione del ciclo di vita, Definizione e Linee guida.

Lo strumento LCA si concentra sugli impatti ambientali, basando l’intera valutazione sull’analisi di un’unità funzionale scelta a priori (UNI EN ISO 14040:2021). L’analisi viene effettuata sull’intero ciclo di vita di un prodotto o sistema così da poter ottenere una visualizzazione più chiara di tutte le possibili implicazioni ambientali ed inoltre minimizzare potenziali errori od omissioni. Da questo deriva che, secondo lo standard UNI EN ISO 14040:2021, lo studio LCA deve essere “trasparente” in tutte le sue fasi per poter garantire chiarezza e semplicità di interpretazione e ogni decisione segue un approccio scientifico. Altra caratteristica fondamentale di uno studio LCA è la completezza: l’analisi prende in considerazione tutti gli aspetti relativi all’ambiente naturale, alla salute umana e alle risorse.

3.2 Struttura

Uno studio LCA prevede l'applicazione di quattro fasi (Figura 21), definite nel 1993 durante una conferenza SETAC e tutt'ora riconosciute dagli standard UNI EN ISO 14040:2021 e 14044:2021:

1. **Definizione degli scopi e degli obiettivi** (Goal and Scope definition), è la fase in cui vengono definite le finalità dello studio, l'unità funzionale, i confini del sistema studiato, i dati, le assunzioni e i limiti;
2. **Analisi di Inventario** (Life Cycle Inventory, LCI), finalizzata alla ricostruzione e quantificazione degli input di materia ed energia e gli output (emissioni, sottoprodotti, rifiuti) del sistema;
3. **Valutazione degli impatti** (Life Cycle Impact Assessment, LCIA), è lo studio dell'impatto ambientale provocato dall'attività, con lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni (impatti) generate a seguito dei rilasci e dei consumi di risorse calcolate nell'Inventario;
4. **Interpretazione** (Life Cycle Interpretation), fase conclusiva, con lo scopo di proporre i cambiamenti necessari a ridurre l'impatto ambientale del sistema o processo considerato.

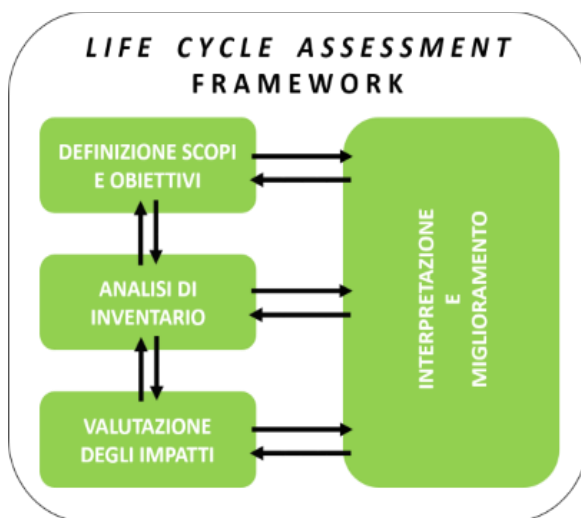


Figura 21. Struttura e relazioni tra le fasi di uno studio LCA.

3.3 Fase 1: Definizione di scopi ed obiettivi (Goal and Scope definition)

Nella prima fase vengono dichiarati esplicitamente gli obiettivi e le finalità dello studio. L'obiettivo di una LCA deve stabilire l'applicazione prevista (ad esempio, lo sviluppo o il miglioramento di un prodotto, sistemi di gestione ambientale, ecc.), le motivazioni che inducono alla realizzazione dello studio (es. etichettatura ecologica, eco-design) ed infine il tipo di pubblico a cui è destinato. In uno studio LCA vengono inoltre considerati dei fattori che devono essere necessariamente riportati negli obiettivi dello studio stesso:

- *La funzione del sistema* consiste nell'analizzare e fornire quante più informazioni possibili al fine di definire il funzionamento e le caratteristiche del sistema in esame;
- *L'unità funzionale* rappresenta la misura delle prestazioni di un sistema specifico da utilizzare come unità di riferimento. Un esempio di unità funzionale potrebbe essere la quantità di imballaggio necessaria per contenere un certo volume di prodotto;
- *I confini del sistema* sono rappresentati dagli ambienti fisici delle operazioni e dai processi produttivi che sono presi in considerazione per l'analisi;
- *I requisiti di qualità dei dati* richiedono la descrizione delle caratteristiche dei dati utilizzati nello studio al fine di determinare l'affidabilità dei risultati. Tra queste caratteristiche figurano precisione, completezza, rappresentatività e riproducibilità.
- *I ipotesi e limitazioni* devono essere riportate e giustificate.

Tutte le informazioni raccolte e generate durante la fase di definizione degli scopi e degli obiettivi devono essere riportate nella relazione finale.

3.4 Fase 2: Analisi di inventario (Life Cycle Inventory)

La seconda fase dell'analisi prevede la quantificazione degli input e output, in termini di materia ed energia, rispetto ai processi che descrivono il sistema oggetto di studio e in relazione ai confini del sistema considerati. I dati raccolti e utilizzati per l'analisi LCA si dividono in dati primari, secondari e terziari in base alla loro origine. I dati primari vengono raccolti direttamente sul campo, i dati secondari possono essere ricavati da database dedicati o dalla letteratura scientifica, i dati terziari derivano da stime e valori medi ricavati da fonti di letteratura. Questa fase prevede la definizione di un diagramma di flusso rappresentativo delle unità di processo che concorrono a formare il sistema in esame e degli input e output in termini di materia ed energia. Durante la creazione di un diagramma di flusso è necessario individuare le componenti significative, eventuali sottosistemi e giustificare l'esclusione di una o più unità. In presenza di co-prodotti o sottoprodotti, per distribuire i flussi in ingresso e in uscita a ciascun prodotto del sistema, si può ricorrere alla procedura di allocazione. Questa procedura prevede l'attribuzione

del carico di energia, di materia e di emissioni corrispondente ad un output specifico del sistema in esame, mediante l'utilizzo di proporzioni basate su unità di grandezza (es. volume, massa) o economiche (es. euro).

3.5 Fase 3: Valutazione degli impatti (Life Cycle Impact Assessment)

La fase di Valutazione degli impatti è finalizzata alla comprensione e valutazione della grandezza e del significato degli impatti potenziali di un prodotto o sistema; caratterizza e valuta gli effetti sull'ambiente basandosi sull'analisi di inventario. L'idea è quella di comprimere i dati in una lista più breve di categorie di impatto caratterizzate da specifici indicatori. Una categoria di impatto è definita come una classe rappresentativa di un problema ambientale, alla quale classe vanno assegnati i risultati della LCIA. Per la quantificazione di una categoria d'impatto si ricorre ai "fattori di caratterizzazione", come ad esempio il "potenziale di riscaldamento globale" riferito alla categoria "cambiamento climatico" o l'"impatto sulla salute umana" per la categoria "particolato". La fase di valutazione degli impatti si divide a sua volta in 4 fasi:

1. classificazione;
2. caratterizzazione;
3. normalizzazione (e raggruppamento);
4. pesatura.

Nella prima fase i dati di inventario vengono classificati in modo da capire su quali categorie di impatto abbiano un'influenza (Cavenago et al., 2021), nella seconda è prevista la quantificazione degli impatti ambientali, che avviene attraverso il calcolo del valore del contributo che ogni elemento classificato rappresenta per le categorie riportate nel metodo Environmental Footprint (EF)(Cavenago et al., 2021). Il calcolo si effettua moltiplicando i valori dell'LCI per il fattore di caratterizzazione corrispondente a ogni categoria d'impatto del metodo EF. I fattori di caratterizzazione sono specifici per ogni sostanza o elemento e rispecchiano l'intensità dell'impatto di una sostanza confrontata con una sostanza comune di riferimento per una categoria di impatto EF. Classificazione e caratterizzazione sono obbligatorie, le due fasi successive invece no, poiché non sono universalmente riconosciute dalla comunità scientifica per l'elevato grado di incertezza previsto che potrebbe dunque portare a valutazioni poco oggettive. La normalizzazione prevede di esprimere i risultati in relazione ad un sistema di riferimento. Tale procedura permette di rendere i risultati relativi alle diverse categorie d'impatto comparabili tra loro, facilitandone così la comunicazione e comprensione. Il raggruppamento è una fase intermedia che consiste nel riordino e nella classificazione delle categorie di impatto sulla base dell'obiettivo dello studio LCA e del campo di applicazione dello studio. Le categorie di impatto possono essere riordinate su base nominale, in relazione alle emissioni, alle risorse o su scala spaziale, oppure sulla base di una gerarchia, per esempio di priorità.

Tale operazione può essere condotta in maniera diversa da individui e società differenti e, quindi, differenti possono essere i risultati a parità di indicatori normalizzati. Infine, la pesatura (o ponderazione) permette di stabilire l'importanza relativa di ogni categoria d'impatto rispetto alle altre, attraverso l'attribuzione di pesi (Cavenago et al., 2021). In questa fase i risultati normalizzati vengono moltiplicati per una serie di fattori di ponderazione¹, espressi in %, che esprimono l'importanza relativa delle categorie d'impatto considerate. I risultati ponderati delle diverse categorie di impatto possono essere confrontati per valutarne l'importanza relativa. È possibile inoltre aggregare i risultati di tutte le categorie d'impatto al fine di ottenere un punteggio complessivo unico, espresso in punti. La valutazione degli impatti ambientali può essere realizzata attraverso l'applicazione di diversi metodi di calcolo, disponibili nei software LCA. A livello europeo uno dei più utilizzati a livello internazionale è il metodo Environmental Footprint (EF).

3.5.1 Il metodo EF (Environmental Footprint)

L'impronta ambientale di un prodotto (inteso come "bene" o "servizio", secondo lo standard ISO 14040:2021 sulla metodologia LCA) è una misura basata sulla valutazione delle performances ambientali di un bene o un servizio, analizzate lungo l'intero ciclo di vita, dal reperimento delle materie prime alla fase di fine vita, il tutto calcolato al fine di ridurre gli impatti ambientali di tale bene o servizio. La Commissione Europea ha pubblicato la raccomandazione 2021/2279/UE del 16 dicembre 2021 (che sostituisce la precedente raccomandazione 2013/179/UE del 9 aprile 2013) la quale definisce un metodo unico europeo per la valutazione e comunicazione dell'impronta ambientale dei prodotti denominato Product Environmental Footprint (PEF). La PEF (He et al., 2019) è un metodo in grado di analizzare e valutare gli impatti ambientali dei flussi di energia, di materiale, delle emissioni e dei rifiuti durante tutto il ciclo di vita del prodotto. Il metodo si fonda sulla valutazione del ciclo di vita e mira a standardizzare gli studi LCA con l'obiettivo di aumentare la comparabilità tra risultati di studi simili. Il metodo Environmental Footprint prevede la valutazione dell'impronta ambientale di un bene o servizio secondo 16 categorie d'impatto. Queste categorie sono state selezionate per coprire la più ampia gamma di problemi ambientali relativi al ciclo di vita di un prodotto, che sia esso un bene o un servizio. Ad ogni categoria d'impatto è associato un indicatore con la propria unità di misura. Di seguito, in Tabella 15, si riportano le 16 categorie d'impatto del metodo EF (He et al., 2019).

¹ Per ulteriori informazioni sui metodi di ponderazione usati negli studi PEF, si rimanda alle relazioni del JRC disponibili all'indirizzo http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/documents/2018_JRC_Weighting_EF.pdf

Categoria d'Impatto	Indicatore della categoria d'impatto	Unità di misura	Modello di caratterizzazione
Cambiamenti climatici	Potenziale di riscaldamento globale (GWP100)	Kg di CO ₂ eq	Contributo all'effetto serra di un gas serra rispetto alla CO ₂ , la quale presenta un potenziale di riferimento pari a 1
Riduzione dello strato di Ozono	Potenziale di riduzione dell'Ozono (ODP)	Kg di CFC-11 eq	Contributo alla riduzione dello strato di Ozono di un gas rispetto al freon (CFC-11)
Tossicità per gli esseri umani, effetti cancerogeni	Unità tossica comparativa per gli esseri umani (CTUh)	CTUh	Valutata in base all'aumento della frequenza percentuale di una malattia nella popolazione umana totale per unità di massa di una sostanza cancerogena emessa
Tossicità per gli esseri umani, effetti non cancerogeni	Unità tossica comparativa per gli esseri umani (CTUh)	CTUh	Valutata in base all'aumento della frequenza percentuale di una malattia nella popolazione umana totale per unità di massa di una sostanza non cancerogena emessa
Particolato	Impatto sulla salute umana	Incidenza delle malattie	Vengono analizzati gli impatti sulla salute in base all'incidenza delle malattie dovute alla presenza di particolato
Radiazione ionizzante, salute umana	Efficienza dell'esposizione umana all'U ₂₃₅	kBq di U ₂₃₅ eq	Valutata in base all'esposizione all' U ₂₃₅ eq e agli effetti a breve, medio e lungo termine
Formazione di Ozono fotochimico, salute umana	Aumento della concentrazione di Ozono troposferico	kg NMVOC eq	Tiene conto dei processi fotochimici in presenza di composti organici volatili
Acidificazione	Superamento accumulato	Moli di H ⁺ eq	Calcolata sulla base delle moli di H ⁺ equivalenti rilasciate durante il ciclo di vita del prodotto.

Eutrofizzazione terrestre	Superamento accumulato	Moli di N eq	Calcolata valutando le moli di N eq rilasciate sul terreno durante l'intero ciclo di vita del prodotto
Eutrofizzazione, acque dolci	Frazione di nutrienti che raggiunge il comparto finale acque dolci (P)	Kg di P eq	Valuta il processo degenerativo di corpi d'acqua marina indotto da apporti troppo elevati di sostanze nutrienti in base ai kg di P eq
Eutrofizzazione, acque marine	Frazione di nutrienti che raggiunge il comparto finale acque dolci (N)	Kg di N eq	Valuta il processo degenerativo di corpi d'acqua dolce indotto da apporti troppo elevati di sostanze nutrienti in base ai kg di N eq
Ecotossicità, acque dolci	Unità tossica comparativa per gli ecosistemi (CTUe)	CTUe	Registra i rifiuti che presentano o possono presentare rischi immediati o a medio/lungo termine per il comparto ambientale "acque dolci"
Uso del suolo	Indice di qualità del suolo	Indice adimensionale	L'indice di qualità del suolo è il risultato dell'aggregazione di 4 indicatori: produzione biotica, resistenza all'erosione, filtrazione meccanica e ricostituzione delle acque sotterranee
Uso d'acqua	Potenziale mancanza d'acqua per l'utilizzatore (consumo di acqua ponderato in funzione della mancanza)	m ³ di acqua equivalente di mancanza d'acqua	Valuta la potenziale mancanza d'acqua per l'utilizzatore e pondera l'utilizzo di questa in base alla mancanza
Uso delle risorse, minerali e metalli	Impoverimento delle risorse abiotiche	Kg Sb eq	Valuta l'impoverimento delle risorse abiotiche utilizzando come unità di misura i kg di Sb equivalenti utilizzati

Uso delle risorse, fossili	Impoverimento delle risorse abiotiche	MJ	Valuta l'impoverimento delle risorse abiotiche sulla base dell'utilizzo di combustibili fossili. Calcolato come quantità di energia utilizzata in MJ
-----------------------------------	---------------------------------------	----	--

Tabella 15. Lista delle categorie d'impatto del metodo "Environmental Footprint".

Nel caso studio in esame, oltre alla valutazione dell'impronta ambientale di un processo in relazione alle 16 categorie d'impatto del metodo (caratterizzazione) sono state applicate anche le fasi di normalizzazione e pesatura. Nella normalizzazione i risultati della fase di caratterizzazione sono stati divisi per i fattori di normalizzazione al fine di calcolare e confrontare l'entità dei loro contributi alle categorie di impatto EF rispetto a un'unità di riferimento. I risultati ottenuti sono adimensionali. Nell'ambito del metodo EF, i fattori di normalizzazione sono espressi pro capite sulla base di un valore globale e sono consultabili online (Environmental Footprint reference packages 3.1). Nella fase di pesatura, infine, i risultati normalizzati sono stati moltiplicati per dei fattori di ponderazione che riproducono l'importanza relativa delle categorie d'impatto del ciclo di vita considerate. I risultati ponderati delle diverse categorie di impatto sono stati quindi confrontati e ne è stata valutata l'importanza relativa. I fattori di normalizzazione e di ponderazione sono stati riportati nella sezione "Appendice" del presente documento.

3.6 Fase 4: interpretazione

L'interpretazione è definita come la fase dove i risultati dell'analisi di inventario e dell'LCIA sono combinati coerentemente per proporre utili raccomandazioni in conformità con gli scopi e gli obiettivi dello studio. Seconda la norma ISO 14044:2021 Fare clic o toccare qui per immettere il testo.si deve valutare lo studio anche in termini di:

1. completezza: per assicurarsi che tutti i dati e le informazioni rilevanti siano disponibili e complete;
2. sensitività: al fine di valutare l'affidabilità dei risultati;
3. consistenza: per verificare se le assunzioni, i metodi e i dati sono in linea con gli obiettivi e le finalità.

Al termine di tali pratiche si giunge alla definizione delle conclusioni finali, includendo nella valutazione le limitazioni dello studio e le raccomandazioni future, il tutto riportato all'interno di un report finale.

4. Risultati e discussione

4.1 Life cycle assessment di un impianto di trattamento in biopile

Nel presente capitolo è presentata la valutazione LCA dell'impianto di trattamento in biopile descritto nel paragrafo 2.3. Lo studio LCA è stato condotto in accordo con le norme ISO 14040/44:2021 [Fare clic o toccare qui per immettere il testo.](#) Il sistema di trattamento in biopile considerato prevede due tipi di trattamento, attivo e passivo. Inoltre, i terreni che subiscono questo tipo di trattamento possono essere caratterizzati da diverse concentrazioni di contaminanti, ovvero "tra colonna A e colonna B" e "superiori a colonna B" secondo quanto definito dalla parte IV del D. Lgs. 152/06. La differenza principale tra biopila attiva e passiva consiste nell'ossigenazione del terreno: per il trattamento attivo il terreno viene ossigenato movimentandolo tramite l'utilizzo di macchinari e mezzi, mentre nelle biopile passive l'aria viene fatta circolare nel terreno attraverso tubature o sistemi di ossigenazione a pavimento con tecniche di estrazione/iniezione. I composti più leggeri tendono ad essere rimossi per volatilizzazione durante l'aerazione dei terreni mentre gli altri componenti vengono rimossi per biodegradazione. Nel caso in cui la concentrazione di componenti volatili risulti elevata, potrebbe essere necessario adottare un impianto per il trattamento delle emissioni gassose.

4.2 Definizione di scopi ed obiettivi

L'obiettivo di questo studio LCA comprende la valutazione dei potenziali impatti ambientali del trattamento di terreni contaminati tramite un sistema di trattamento in biopile. In questo studio la metodologia LCA è stata applicata per stimare i potenziali impatti ambientali dei due differenti sistemi di biopile, attivo e passivo e tenendo conto della differenza di contaminanti presenti nei terreni posti a decontaminazione (152/2006 Allegato 5, Parte IV, Tabella 1), secondo il metodo Environmental Footprint (He et al., 2019). Di seguito si riportano i 4 scenari presi in considerazione per questa analisi:

1. Biopila attiva con livelli di contaminanti "tra col. A e col. B";
2. Biopila attiva con livelli di contaminanti "> col B";
3. Biopila passiva con livelli di contaminanti "tra col. A e col. B";
4. Biopila passiva con livelli di contaminanti "> col B".

Il presente studio è rivolto principalmente ad aziende interessate al sistema di trattamento analizzato in questo documento o ad aziende e/o soggetti interessati al confronto tra gli impatti ambientali generati dal sistema analizzato rispetto agli impatti generati da tecniche di bonifica differenti o differenti trattamenti dei terreni. L'unità funzionale considerata per il seguente studio coincide con una biopila di capacità 1000 m³. Lo studio LCA è stato condotto con un approccio "gate to gate", ovvero dal "cancello al cancello", dal momento che è stato considerato il solo trattamento del terreno

contaminato all'interno dell'impianto. I limiti del sistema sono stati indicati in Figura 22 e Figura 23.

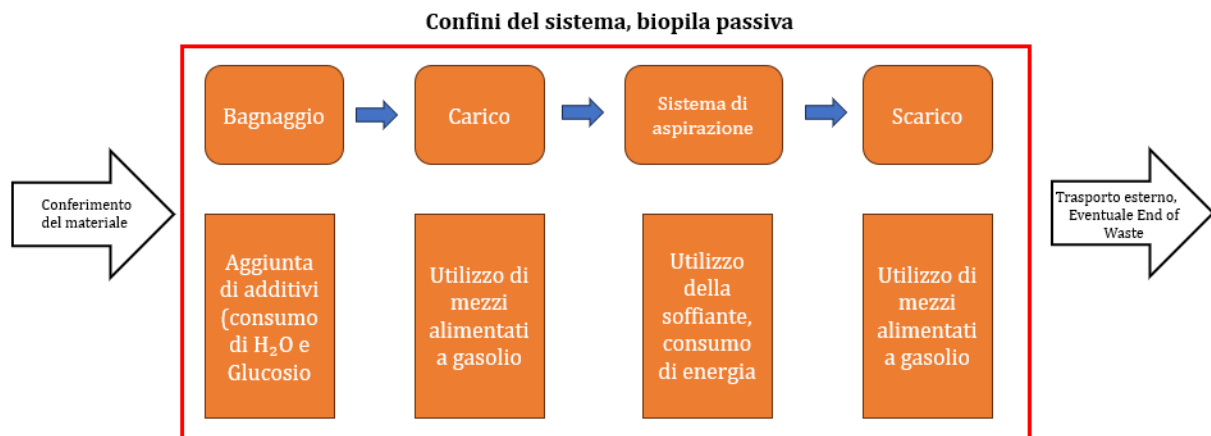


Figura 22. Confini del sistema, indicati all'interno del rettangolo rosso, in riferimento al trattamento passivo in biopila.

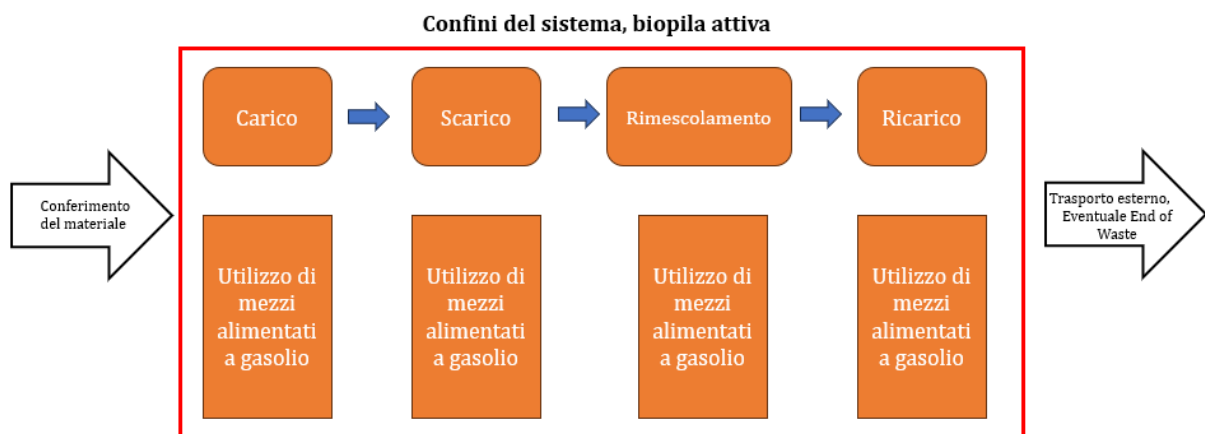


Figura 23. Confini del sistema, indicati all'interno del rettangolo rosso, in riferimento al trattamento attivo in biopila.

Le categorie d'impatto considerate per valutare gli impatti derivanti dai quattro scenari precedentemente elencati di trattamento in biopile coincidono con le categorie d'impatto relative al metodo Environmental Footprint, riportate nella Tabella 15.

4.3 Analisi di inventario

I dati primari raccolti durante il periodo di tirocinio svolto presso Ladurner Remedia, nel periodo che va dal 22/05/2023 al 29/06/2023 hanno riguardato:

- I volumi dei lotti di terreno trattato: i dati inizialmente raccolti come tonnellaggio di materiale sono stati convertiti in dati volumetrici tenendo conto di una densità di 1700 kg/ m³ secondo la formula di conversione Volume = Densità/Massa;
- I tempi di permanenza dei terreni in ognuna delle 6 biocelle: biopile attive e passive hanno riportato tempi di permanenza medi differenti, le biopile attive mediamente 43 giorni (1032 ore) e le biopile passive mediamente 40 giorni (960 ore);
- I tempi di sfruttamento dei mezzi utilizzati per le operazioni di carico, scarico, rimescolamento e ricarico delle biopile, il tutto riferito all'unità funzionale considerata, ovvero 1000 m³: sono state considerate necessarie 6 ore di utilizzo della pala meccanica per il caricamento di 300 m³ di terreno, di conseguenza un totale di 20h di utilizzo per le operazioni di carico (o scarico od eventuale ricarico, in caso di trattamento in biopila attiva) di 1000 m³ di terreno. Il rimescolamento del terreno nello scenario di trattamento in biopila attiva è stato effettuato ogni 3 giorni durante il periodo di trattamento (medio), con un tempo di sfruttamento della pala meccanica di 2 ore per 300 m³, equivalente a 6 ore e 42 minuti per 1000 m³ di terreno;
- Le quantità di additivo utilizzato per la stimolazione dell'attività batterica nei cumuli: si diluisce 1L di additivo (considerato 100% glucosio per l'analisi LCA) in acqua in rapporto 1:100 e poi si bagna il cumulo, nel nostro caso si consumano circa 2000L per 1000 m³ di terreno, quindi circa 20L di glucosio.

I dati ottenuti relativi al sistema di aspirazione sono da considerarsi secondari, in quanto ottenuti tramite estrapolazione dal database EcoInvent (versione 3.8). È stata considerata una soffiante dotata di un motore che erogava una potenza di 45Kw, che corrisponde ad una buona approssimazione della potenza erogata dalla soffiante utilizzata nelle biocelle. Per calcolare i consumi energetici la formula di utilizzata è stata la seguente:

$$\mathbf{m^3 \text{ (di terreno)} \times 0.012 \text{ h/m}^3 \times \mathbf{kW \text{ (erogati dal motore della soffiante)} = 1000\mathbf{m}^3 \times 0.012\mathbf{h/m}^3 \times 45\mathbf{Kw} = 540\mathbf{kWh}.$$

Per l'analisi dei consumi energetici dovuti alla soffiante i kWh sono stati convertiti in MJ. Anche i dati relativi agli impatti dovuti all'utilizzo delle pale meccaniche sono da considerare secondari: la modellizzazione degli impatti provenienti dallo sfruttamento della pala meccanica è avvenuta grazie alla consultazione del database EcoInvent. Nella Tabella 16 è possibile visualizzare le componenti dei processi di trattamento in biopila attiva e passiva, gli elementi utilizzati con il rispettivo nome in EcoInvent, e le unità di misura considerate.

	Elemento	Nome in EcoInvent	Unità di misura	Quantità	Fasi
Biopila attiva (rimescolamento del terreno con pala meccanica ogni 3gg)	Pala meccanica	Excavation, skid steer loader {RER} processing CUT OFF	Volume (m ³)	1000	<ul style="list-style-type: none"> • Carico
	Pala meccanica	Excavation, skid steer loader {RER} processing CUT OFF	Volume (m ³)	1000	<ul style="list-style-type: none"> • Scarico • Rimescolamento • Ricarico
Biopila passiva	Pala meccanica	Excavation, skid steer loader {RER} processing CUT OFF	Volume (m ³)	1000	<ul style="list-style-type: none"> • Carico • Scarico
	Sistema di aspirazione	Electricity, medium voltage {IT} market for electricity, medium voltage CUT OFF, S	Energia (MJ)	1944	<ul style="list-style-type: none"> • Funzionamento della soffiante
	Aggiunta di additivo	-_Glucose {GLO} market for glucose Cut-off, S -_Tap water {Europe without Switzerland} tap water production, underground water with disinfection Cut-off, S	Litri (L)	2000L di acqua e glucosio in rapporto 100:1	<ul style="list-style-type: none"> • Bagnaggio del cumulo

Tabella 16. Componenti dei processi considerati in EcoInvent con relative quantità, unità di misura e fasi.

Dall'osservazione della Tabella 16 è possibile notare che grazie al database EcoInvent è stato possibile ottenere i dati per calcolare gli impatti provocati dall'utilizzo della pala meccanica in riferimento all'unità funzionale da noi considerata, ovvero il trattamento di 1000 m³ di terreno, per tutte le diverse fasi che caratterizzano il trattamento in biopile attivo (carico, scarico, rimescolamento e ricarico del materiale) e il trattamento passivo (carico e scarico). Oltre allo sfruttamento della pala meccanica per le fasi di trattamento in biopila passiva sono stati considerati in EcoInvent i dati sui consumi derivanti dal

sistema di aspirazione (modellizzato per risultare il più simile possibile rispetto a quello utilizzato nell'impianto di Ladurner Remedia) e dall'aggiunta dell'additivo, un totale di 20L di glucosio in 2000L di acqua utilizzata per la fase di bagnaggio dei cumuli.

4.4 Valutazione degli impatti

La valutazione dei potenziali impatti ambientali è stata eseguita utilizzando il metodo Environmental Footprint (paragrafo 3.5.1 Il metodo EF (Environmental Footprint) (He et al., 2019) mediante l'utilizzo del software SimaPro (versione 9.5.0.0). I risultati ottenuti sono riportati a livello di caratterizzazione, normalizzazione e pesatura, così da rendere possibile il confronto tra tutte le categorie d'impatto del metodo e tra le diverse metodologie di trattamento (biopila attiva o passiva) e di contaminanti presenti considerati (>col B o tra col. A e col. B). Sono state svolte diverse elaborazioni tramite il software, per quanto riguarda le singole biopile l'analisi degli impatti è stata svolta come nello schema presentato in Figura 24:

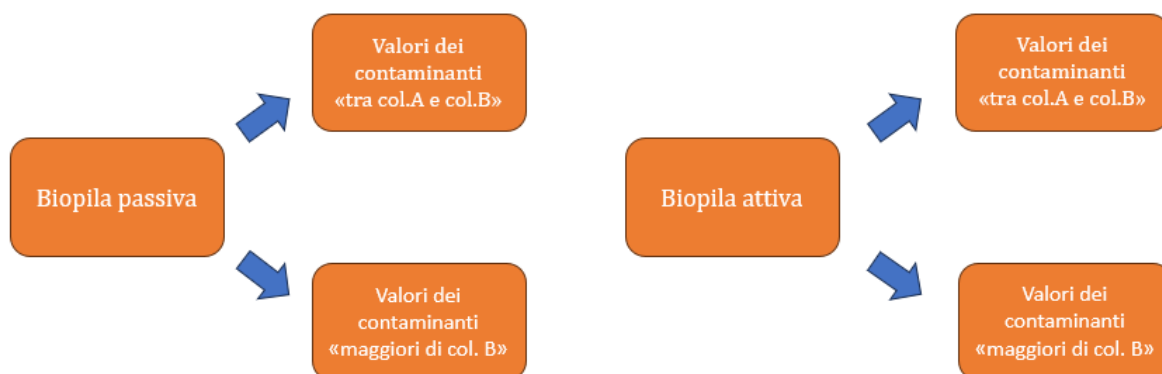


Figura 24. Schema della divisione dell'analisi per le singole biopile.

4.4.1 Caratterizzazione

L'analisi operata ha permesso il calcolo dell'entità dei contributi che ognuno dei quattro scenari considerati in questa analisi rappresenta per le categorie d'impatto del metodo EF. Il calcolo è stato effettuato dal software SimaPro (v.9.5.0.0) moltiplicando i valori relativi ad ogni fase di ogni scenario considerato per il fattore di caratterizzazione² corrispondente a ogni categoria d'impatto del metodo EF. Infine i valori d'impatto di ogni fase sono stati sommati per ottenere un valore totale d'impatto di ognuna delle quattro

² Disponibile online all'indirizzo <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml>.

tipologie di trattamento considerate. I risultati della caratterizzazione sono riportati in Tabella 17 :

Damage category	Unit	Biopila passiva tra A e B	Biopila passiva > col B	Biopila attiva tra A e B	Biopila attiva > col B
Acidification	mol H+ eq	11,18	11,18	152,08	162,21
Climate change	kg CO2 eq	1378,98	1378,98	16930,97	18059,70
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	7464,44	7464,44	93959,83	100223,82
Particulate matter	disease inc.	2,92E-04	2,92E-04	4,30E-03	4,58E-03
Eutrophication, marine	kg N eq	4,98	4,98	71,11	75,86
Eutrophication, freshwater	kg P eq	8,59E-02	8,59E-02	5,93E-01	6,33E-01
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	53,91	53,91	772,47	823,97
Human toxicity, cancer	CTUh	4,66E-07	4,66E-07	5,81E-06	6,20E-06
Human toxicity, non-cancer	CTUh	4,07E-06	4,07E-06	3,71E-05	3,96E-05
Ionising radiation	kBq U-235 eq	40,19	40,19	154,69	165,01
Land use	Pt	2004,73	2004,73	14134,24	15076,52
Ozone depletion	kg CFC11 eq	2,89E-05	2,89E-05	3,54E-04	3,77E-04
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	16,26	16,26	232,22	247,70
Resource use, fossils	MJ	18350,85	18350,85	219086,24	233691,99
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1,19E-03	1,19E-03	6,19E-03	6,60E-03
Water use	m3 depriv.	334,94	334,94	427,25	455,73

Tabella 17. Valori d'impatto dei quattro scenari considerati in relazione alle categorie d'impatto del metodo EF.

Successivamente questi valori sono stati graficati (Figura 25), in modo da poter avere una visione d'insieme più chiara per l'interpretazione dei risultati ottenuti. Il grafico di caratterizzazione riporta in valore percentuale massimo (100%) lo scenario con i valori d'impatto di categoria più elevati. Gli altri scenari, sempre in valore percentuale, sono riportati proporzionalmente allo scenario con i valori più elevati. Questo tipo di costruzione permette una visualizzazione semplice e chiara degli scenari di trattamento in biopile considerati che risultano maggiormente impattanti.

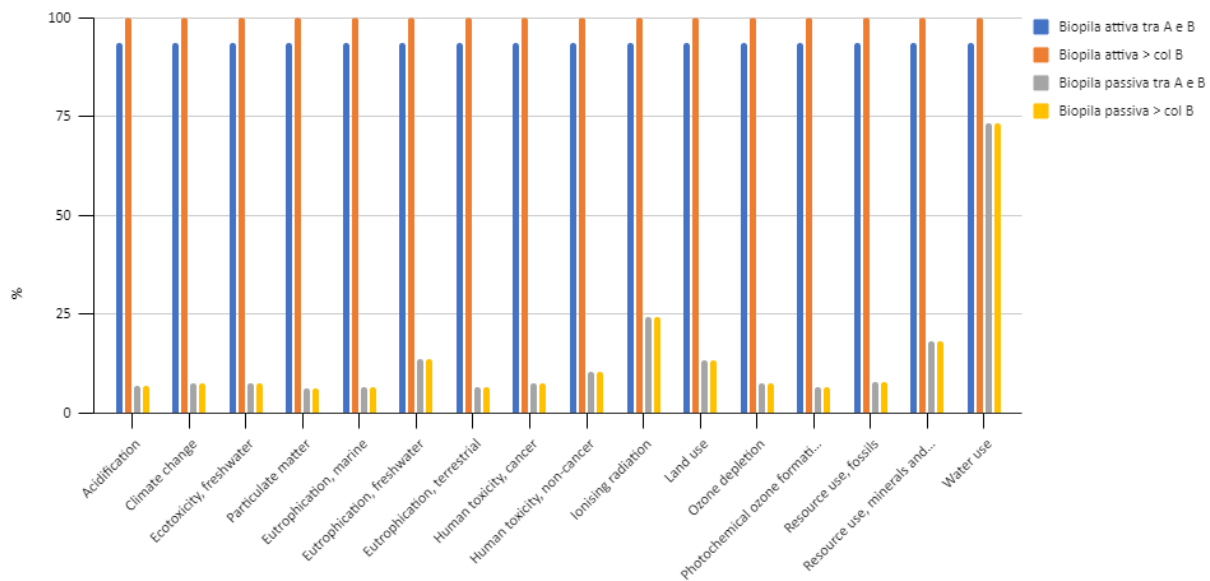


Figura 25. Grafico della caratterizzazione degli impatti dei 4 scenari considerati relativi alle categorie d’impatto del metodo Environmental Footprint.

Dall’osservazione del grafico di Figura 25 è possibile innanzitutto notare un’importante differenza in tutte le categorie di impatto tra la metodologia del trattamento “attivo” delle biopile e quella del trattamento “passivo”: il trattamento “passivo” risulta essere sempre la soluzione meno impattante tra le due alternative. Il fatto che la tipologia di trattamento attivo in biopile sia risultata essere la più impattante era prevedibile: il maggiore sfruttamento di mezzi pesanti, come le pale meccaniche, dovuto alle fasi di rimescolamento e ricarica (non previste dalla tipologia di trattamento passivo) ha inciso consistentemente sul valore degli impatti relativi alle categorie d’impatto EF. Il trattamento in biopile passivo ha riportato valori elevati nella categoria “Uso dell’acqua”, questo valore elevato è dovuto alla fase di bagnaggio dei cumuli con la soluzione di acqua e glucosio precedentemente descritta. Nonostante le quantità di acqua consumate per la tipologia di trattamento passivo in biopile, le alternative attive (per entrambi i livelli di contaminanti considerati) risultano essere maggiormente impattanti nella categoria uso dell’acqua: questo è dovuto al fatto che questa categoria, come tutte le altre del metodo EF con i loro indicatori, non tiene in considerazione solo i consumi diretti di acqua ma valuta anche quelli indiretti. Di conseguenza vengono considerati i consumi di acqua indiretti dovuti al consumo del diesel per il funzionamento della pala meccanica e i consumi di acqua derivati dalla costruzione del mezzo.

4.4.1.1 Caratterizzazione delle fasi degli scenari

Tabella 18, Tabella 19, Tabella 20 e Tabella 21 riportano i valori d’impatto delle fasi che compongono i quattro diversi scenari considerati calcolati in relazione alle categorie d’impatto del metodo EF:

Damage category	Unit	Additivo	Carico	Sistema di aspirazione	Scarico	Total
Acidification	mol H+ eq	2,73E-01	5,07	7,74E-01	5,07	11,18
Climate change	kg CO2 eq	33,93	564,37	216,31	564,37	1378,98
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	782,06	3131,99	418,38	3131,99	7464,44
Particulate matter	disease inc.	2,37E-06	1,43E-04	3,67E-06	1,43E-04	2,92E-04
Eutrophication, marine	kg N eq	1,06E-01	2,37	1,32E-01	2,37	4,98
Eutrophication, freshwater	kg P eq	1,24E-02	1,98E-02	3,40E-02	1,98E-02	8,59E-02
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	9,14E-01	25,75	1,50	25,75	53,91
Human toxicity, cancer	CTUh	2,15E-08	1,94E-07	5,71E-08	1,94E-07	4,66E-07
Human toxicity, non-cancer	CTUh	5,50E-07	1,24E-06	1,05E-06	1,24E-06	4,07E-06
Ionising radiation	kBq U-235 eq	2,11	5,16	27,77	5,16	40,19
Land use	Pt	544,46	471,14	517,98	471,14	2004,73
Ozone depletion	kg CFC11 eq	5,10E-07	1,18E-05	4,80E-06	1,18E-05	2,89E-05
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	1,37E-01	7,74	6,44E-01	7,74	16,26
Resource use, fossils	MJ	379,74	7302,87	3365,36	7302,87	18350,85
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	3,97E-04	2,06E-04	3,81E-04	2,06E-04	1,19E-03
Water use	m3 depriv.	171,47	14,24	134,99	14,24	334,94

Tabella 18. Valori d'impatto dello scenario "Biopile passive, valori dei contaminanti tra col. A e col. B" in relazione alle categorie d'impatto del metodo Environmental Footprint.

Damage category	Unit	Additivo	Carico	Sistema di aspirazione	Scarico	Total
Acidification	mol H+ eq	2,73E-01	5,07	7,74E-01	5,07	11,18
Climate change	kg CO2 eq	33,93	564,37	216,31	564,37	1378,98
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	782,06	3131,99	418,38	3131,99	7464,44
Particulate matter	disease inc.	2,37E-06	1,43E-04	3,67E-06	1,43E-04	2,92E-04
Eutrophication, marine	kg N eq	1,06E-01	2,37	1,32E-01	2,37	4,98
Eutrophication, freshwater	kg P eq	1,24E-02	1,98E-02	3,40E-02	1,98E-02	8,59E-02
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	9,14E-01	25,75	1,50	25,75	53,91
Human toxicity, cancer	CTUh	2,15E-08	1,94E-07	5,71E-08	1,94E-07	4,66E-07
Human toxicity, non-cancer	CTUh	5,50E-07	1,24E-06	1,05E-06	1,24E-06	4,07E-06
Ionising radiation	kBq U-235 eq	2,11	5,16	27,77	5,16	40,19
Land use	Pt	544,46	471,14	517,98	471,14	2004,73
Ozone depletion	kg CFC11 eq	5,10E-07	1,18E-05	4,80E-06	1,18E-05	2,89E-05
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	1,37E-01	7,74	6,44E-01	7,74	16,26
Resource use, fossils	MJ	379,74	7302,87	3365,36	7302,87	18350,85

Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	3,97E-04	2,06E-04	3,81E-04	2,06E-04	1,19E-03
Water use	m3 depriv.	171,47	14,24	134,99	14,24	334,94

Tabella 19. Valori d'impatto dello scenario "Biopile passive, valori dei contaminanti > col. B" in relazione alle categorie d'impatto del metodo Environmental Footprint.

Damage category	Unit	Carico	Scarico	Rimescolamento	Ricarico	Total
Acidification	mol H+ eq	5,07	5,07	70,97	70,97	152,08
Climate change	kg CO2 eq	564,37	564,37	7901,12	7901,12	16930,97
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	3131,99	3131,99	43847,92	43847,92	93959,83
Particulate matter	disease inc.	1,43E-04	1,43E-04	2,00E-03	2,00E-03	4,30E-03
Eutrophication, marine	kg N eq	2,37	2,37	33,19	33,19	71,11
Eutrophication, freshwater	kg P eq	1,98E-02	1,98E-02	2,77E-01	2,77E-01	5,93E-01
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	25,75	25,75	360,49	360,49	772,47
Human toxicity, cancer	CTUh	1,94E-07	1,94E-07	2,71E-06	2,71E-06	5,81E-06
Human toxicity, non-cancer	CTUh	1,24E-06	1,24E-06	1,73E-05	1,73E-05	3,71E-05
Ionising radiation	kBq U-235 eq	5,16	5,16	72,19	72,19	154,69
Land use	Pt	471,14	471,14	6595,98	6595,98	14134,24
Ozone depletion	kg CFC11 eq	1,18E-05	1,18E-05	1,65E-04	1,65E-04	3,54E-04
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	7,74	7,74	108,37	108,37	232,22
Resource use, fossils	MJ	7302,87	7302,87	102240,25	102240,25	219086,24
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	2,06E-04	2,06E-04	2,89E-03	2,89E-03	6,19E-03
Water use	m3 depriv.	14,24	14,24	199,38	199,38	427,25

Tabella 20. Valori d'impatto dello scenario "Biopile attive, valori dei contaminanti tra col. A e col. B" in relazione alle categorie d'impatto del metodo Environmental Footprint.

Damage category	Unit	Carico	Scarico	Rimescolamento	Ricarico	Total
Acidification	mol H+ eq	5,07	5,07	76,04	76,04	162,21
Climate change	kg CO2 eq	564,37	564,37	8465,48	8465,48	18059,70
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	3131,99	3131,99	46979,91	46979,91	100223,82
Particulate matter	disease inc.	1,43E-04	1,43E-04	2,15E-03	2,15E-03	4,58E-03
Eutrophication, marine	kg N eq	2,37	2,37	35,56	35,56	75,86
Eutrophication, freshwater	kg P eq	1,98E-02	1,98E-02	2,97E-01	2,97E-01	6,33E-01
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	25,75	25,75	386,24	386,24	823,97
Human toxicity, cancer	CTUh	1,94E-07	1,94E-07	2,91E-06	2,91E-06	6,20E-06

Human toxicity, non-cancer	CTUh	1,24E-06	1,24E-06	1,85E-05	1,85E-05	3,96E-05
Ionising radiation	kBq U-235 eq	5,16	5,16	77,35	77,35	165,01
Land use	Pt	471,14	471,14	7067,12	7067,12	15076,52
Ozone depletion	kg CFC11 eq	1,18E-05	1,18E-05	1,77E-04	1,77E-04	3,77E-04
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	7,74	7,74	116,11	116,11	247,70
Resource use, fossils	MJ	7302,87	7302,87	109543,12	109543,12	233691,99
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	2,06E-04	2,06E-04	3,09E-03	3,09E-03	6,60E-03
Water use	m3 depriv.	14,24	14,24	213,63	213,63	455,73

Tabella 21. Valori d'impatto dello scenario "Biopile attive, valori dei contaminanti > col. B" in relazione alle categorie d'impatto del metodo Environmental Footprint.

Dall'osservazione di Tabella 18 e Tabella 19 è possibile notare come i valori riportati relativi agli impatti causati dal trattamento in biopile passivo per ogni categoria d'impatto del metodo risultino identici, senza alcuna differenza tra il trattamento, sempre in biopila passiva, di livelli di contaminanti appartenenti alla categoria "tra col. A e col. B" e alla categoria "> col. B". Questo perché secondo l'unità funzionale considerata, ovvero il trattamento di 1000m³ di terreno, le fasi che compongono lo scenario di trattamento in biopila passiva per entrambe le tipologie di contaminanti considerate risultano uguali. Differentemente il trattamento in biopile attive di concentrazioni di contaminanti appartenenti alla categoria "> col. B" (Tabella 21) è risultato essere maggiormente impattante rispetto all'alternativa "tra col. A e col. B" (Tabella 20). Questo è dovuto al fatto che il rimescolamento dei cumuli di terreno per il trattamento attivo è avvenuto ogni tre giorni durante tutto il periodo di trattamento, e dal calcolo del numero di rimescolamenti avvenuti per le due tipologie di trattamento attivo (in base ai livelli di contaminanti presenti) il trattamento delle biopile attive "> col. B" ha riportato un rimescolamento (e quindi anche un ricarico) in più rispetto al trattamento attivo "tra col. A e col. B". Di seguito si riportano i grafici ottenuti (Figura 26, Figura 27) in modo da permettere una maggiore e più chiara comprensione del contributo di ogni fase di cui lo scenario è composto. Gli scenari relativi al trattamento in biopila passiva presentavano valori d'impatto identici e le stesse fasi di trattamento, ovvero l'aggiunta di additivo, il carico della biopila, i consumi del sistema di aerazione e lo scarico della biopila. Dal momento che i valori d'impatto alle categorie del metodo EF sono risultati uguali per le due categorie di contaminanti trattati, il grafico di Figura 26 riporta la caratterizzazione delle fasi del trattamento in biopila passiva valido per entrambe le tipologie di contaminanti (quindi sia appartenenti alla categoria "tra col. A e col. B" che alla categoria "> col. B". Nel grafico di Figura 27 sono riportate invece le caratterizzazioni delle fasi del trattamento in biopila attiva, che presentano delle differenze a seconda della tipologia di contaminante trattato (si ricorda che i contaminanti appartenenti alla categoria "> col. B" hanno subito un rimescolamento in più rispetto ai contaminanti "tra col. A e col. B" e di conseguenza riportano valori leggermente superiori).

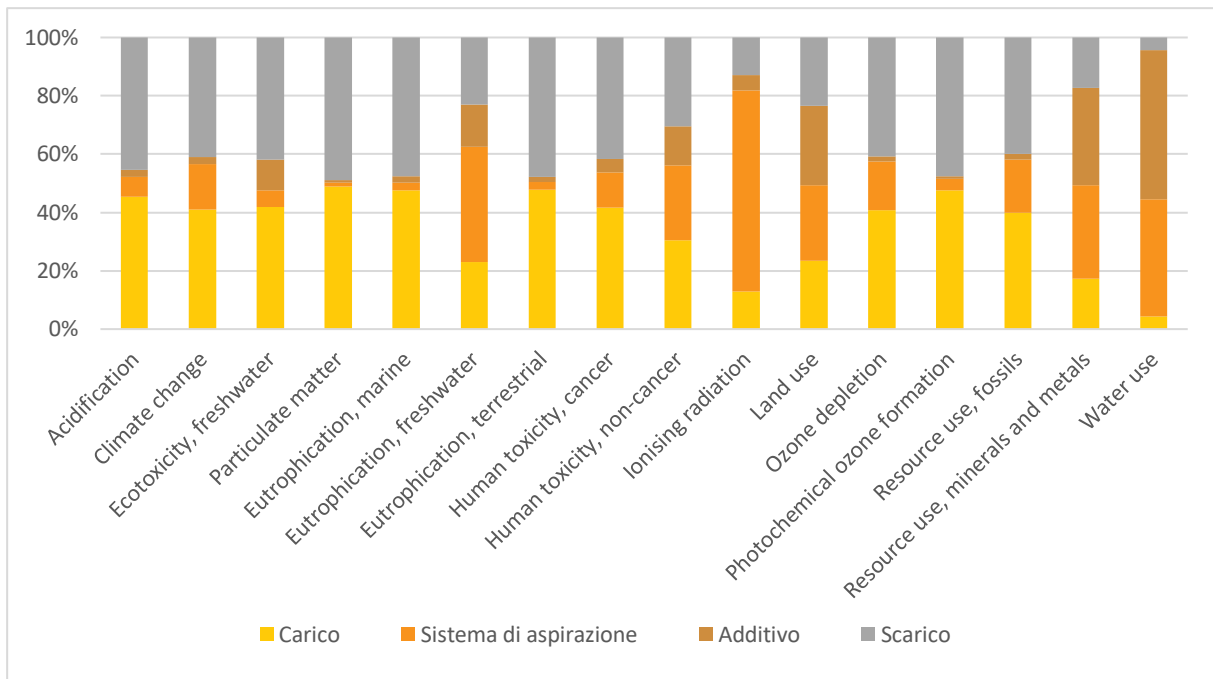


Figura 26. Grafico di caratterizzazione delle fasi dello scenario “biopile passive” in relazione alle categorie d’impatto del metodo Environmental Footprint.

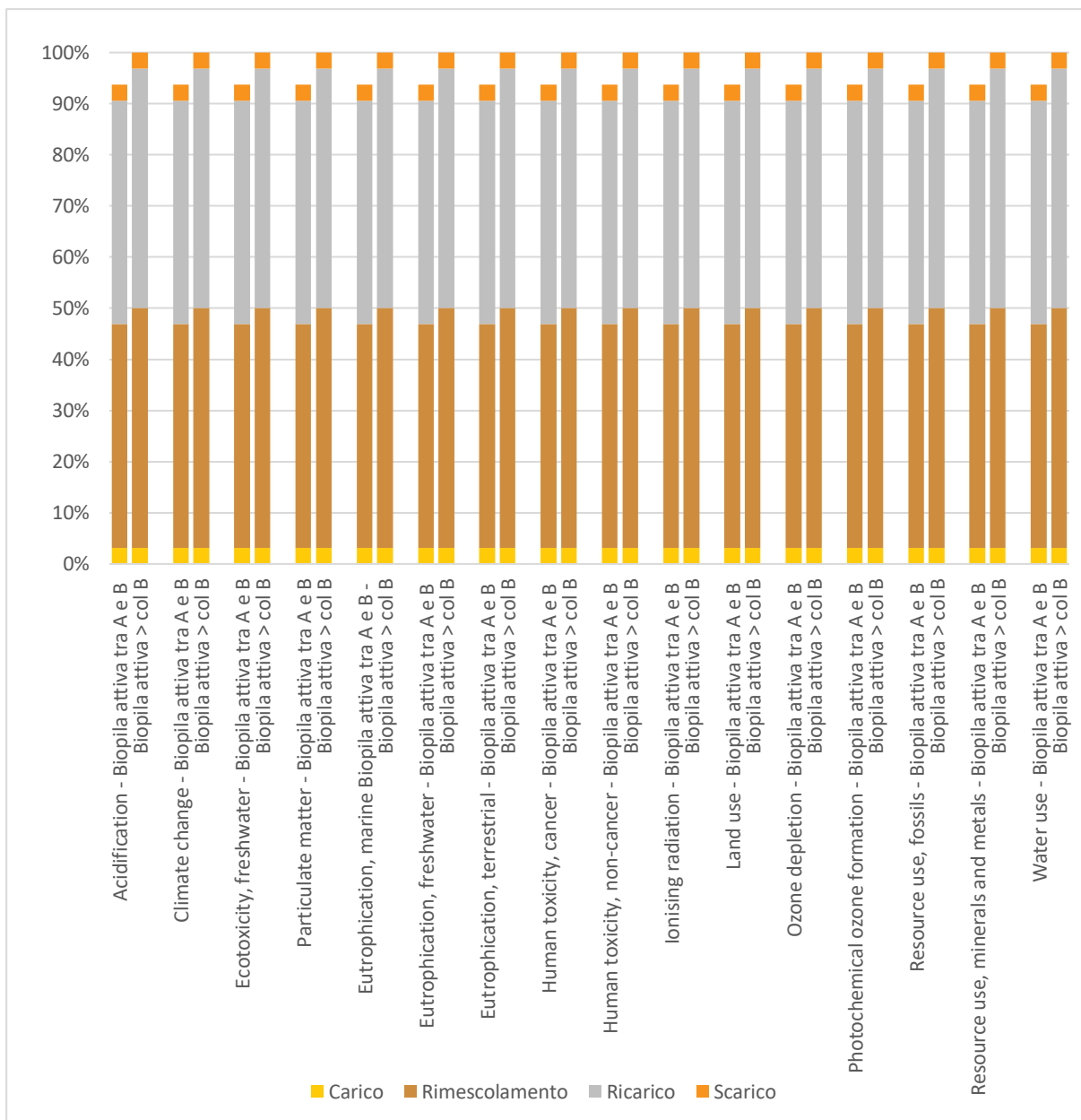


Figura 27. Grafico di caratterizzazione delle fasi dello scenario “biopile attive” in relazione alle categorie d’impatto del metodo Environmental Footprint.

Dall’osservazione della Figura 26 e della Figura 27 sono emerse le seguenti considerazioni: le fasi di carico e scarico nel trattamento dei terreni attraverso le biopile passive sono risultate, tra le quattro fasi della tipologia di trattamento passivo, le più impattanti in relazione alle diverse categorie d’impatto, se non per la categoria “radiazione ionizzante” in cui la fase relativa all’utilizzo del sistema di aspirazione riporta un valore percentuale superiore alle altre fasi, e la categoria “uso dell’acqua”, rappresentata principalmente dal sistema di aspirazione e dalla fase di bagnaggio dei cumuli tramite l’aggiunta di additivo (Figura 26). Una percentuale maggiore del contributo del sistema di aerazione rispetto alle altre fasi del trattamento passivo in relazione alla categoria “radiazione ionizzante” potrebbe essere dovuta all’emissione di campi elettromagnetici dovuti all’utilizzo di uno strumento alimentato da energia elettrica. C’è comunque da dire che i livelli di radiazione

ionizzante prodotti dal sistema di aerazione non risultano essere dannosi per l'uomo (Frischknecht et al., 2000). Nel trattamento in biopile con metodologia "attiva" le fasi più impattanti risultano essere i rimescolamenti e i ricaricamenti delle biopile, in quanto questi due processi vengono ripetuti svariate volte durante tutto il periodo di trattamento dei terreni (si ricordi che il rimescolamento dei terreni, e il conseguente ricarico della biopila, è operato ogni tre giorni per tutta la durata del periodo di trattamento).

4.4.2 Normalizzazione

La normalizzazione prevede di esprimere i risultati in relazione ad un sistema di riferimento. La procedura di normalizzazione operata in questo studio ha permesso di rendere i risultati relativi alle diverse categorie d'impatto comparabili tra loro, facilitandone così la comunicazione e comprensione. I risultati fino ad ora ottenuti sui quattro diversi scenari e i loro valori d'impatto rispetto alle categorie del metodo EF (Raccomandazione (UE) 2021/2279 della commissione del 15 dicembre 2021) sono stati divisi per dei fattori di normalizzazione al fine di calcolare e confrontare l'entità dei loro contributi alle categorie di impatto EF rispetto a un'unità di riferimento. I risultati ottenuti sono adimensionali e riflettono i pesi imputabili a un prodotto rispetto all'unità di riferimento. Nell'ambito del metodo EF (He et al., 2019), i fattori di normalizzazione sono espressi pro capite sulla base di un valore globale³. Di seguito si riportano la Tabella 22 e la Figura 28, contenente i risultati degli impatti dei quattro scenari normalizzati in relazione alle categorie d'impatto del metodo EF:

Damage category	Biopila passiva tra A e B	Biopila passiva > col B	Biopila attiva tra A e B	Biopila attiva > col B
Acidification	2,01E-01	2,01E-01	2,74	2,92
Climate change	1,83E-01	1,83E-01	2,24	2,39
Ecotoxicity, freshwater	1,32E-01	1,32E-01	1,66	1,77
Particulate matter	4,91E-01	4,91E-01	7,22	7,70
Eutrophication, marine	2,55E-01	2,55E-01	3,64	3,88
Eutrophication, freshwater	5,35E-02	5,35E-02	3,69E-01	3,94E-01
Eutrophication, terrestrial	3,05E-01	3,05E-01	4,37	4,66
Human toxicity, cancer	2,70E-02	2,70E-02	3,37E-01	3,59E-01
Human toxicity, non-cancer	3,16E-02	3,16E-02	2,88E-01	3,07E-01
Ionising radiation	9,52E-03	9,52E-03	3,67E-02	3,91E-02
Land use	2,45E-03	2,45E-03	1,72E-02	1,84E-02
Ozone depletion	5,52E-04	5,52E-04	6,76E-03	7,21E-03
Photochemical ozone formation	3,98E-01	3,98E-01	5,68	6,06
Resource use, fossils	2,82E-01	2,82E-01	3,37	3,60

³ 77 I fattori di normalizzazione dell'impronta ambientale da applicare sono disponibili all'indirizzo: <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml>.

Resource use, minerals and metals	1,87E-02	1,87E-02	9,72E-02	1,04E-01
Water use	2,92E-02	2,92E-02	3,73E-02	3,97E-02

Tabella 22. Tabella dei risultati delle categorie di impatto normalizzati.

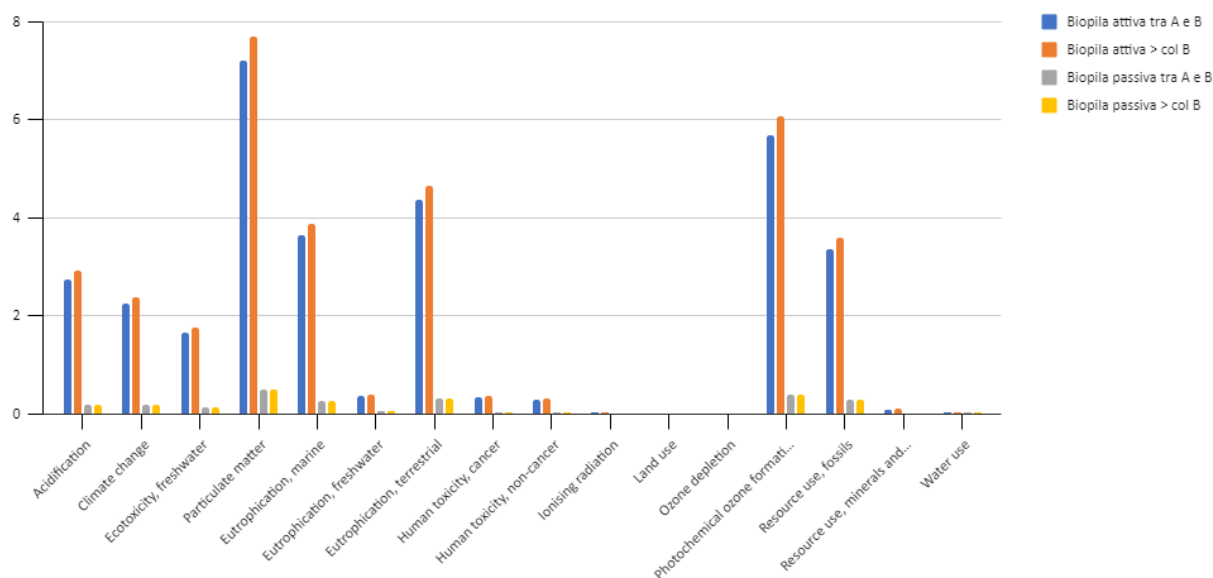


Figura 28. Grafico dei risultati delle categorie di impatto normalizzati.

Dall'osservazione del grafico in Figura 28 è possibile notare come le categorie d'impatto che risultano essere più rilevanti nel caso in analisi sono la formazione di particolato e la formazione di Ozono fotochimico, seguite dall'eutrofizzazione terrestre, marina, e dall'utilizzo di risorse fossili. Le prime due sono strettamente collegate all'utilizzo di mezzi pesanti per le fasi di carico e scarico (biopile attive e passive), ma soprattutto per i rimescolamenti e i conseguenti ricaricamenti dei cumuli di terreno contaminato (biopile attive). Ovviamente, queste attività si ripercuotono anche sul risultato relativo al consumo di risorse fossili, essendo le pale meccaniche alimentate a diesel. I valori elevati ottenuti per l'eutrofizzazione marina e terrestre fanno invece riferimento principalmente alle emissioni della pala meccanica utilizzata, espresse in moli di azoto equivalente (per l'eutrofizzazione terrestre) e kg di azoto equivalente (per l'eutrofizzazione marina) e agli impatti che potrebbero avere se queste sostanze nocive prodotte raggiungessero i suoli o il comparto ambientale marino. Queste emissioni sono dovute agli ossidi di azoto (NOx) rilasciati dagli scarichi dei mezzi utilizzati, emissioni che avvengono poiché questi mezzi sono alimentati a diesel.

4.4.3 Pesatura

In questa fase i risultati normalizzati sono stati moltiplicati dal software SimaPro (v.9.5.0.0) per una serie di fattori di ponderazione (in punti, pt) che riproducono l'importanza relativa delle categorie d'impatto del ciclo di vita considerate (S et al., 2017). I risultati ponderati delle diverse categorie di impatto sono stati quindi confrontati per valutarne l'importanza relativa. Nel nostro caso i risultati della pesatura sono stati aggregati per ognuno dei quattro scenari presi in considerazione, come è possibile osservare nel grafico di Figura 29. Di seguito si riportano la Tabella 23 e il grafico (Figura 29) riferiti alla fase di pesatura di ogni categoria d'impatto legata agli scenari considerati.

Damage category	Unit	Biopila attiva tra A e B	Biopila attiva > col B	Biopila passiva tra A e B	Biopila passiva > col B
Total	Pt	2,18	2,32	1,66E-01	1,66E-01
Acidification	Pt	1,70E-01	1,81E-01	1,25E-02	1,25E-02
Climate change	Pt	4,72E-01	5,04E-01	3,84E-02	3,84E-02
Ecotoxicity, freshwater	Pt	3,18E-02	3,39E-02	2,53E-03	2,53E-03
Particulate matter	Pt	6,47E-01	6,90E-01	4,40E-02	4,40E-02
Eutrophication, marine	Pt	1,08E-01	1,15E-01	7,54E-03	7,54E-03
Eutrophication, freshwater	Pt	1,03E-02	1,10E-02	1,50E-03	1,50E-03
Eutrophication, terrestrial	Pt	1,62E-01	1,73E-01	1,13E-02	1,13E-02
Human toxicity, cancer	Pt	7,18E-03	7,66E-03	5,76E-04	5,76E-04
Human toxicity, non-cancer	Pt	5,30E-03	5,65E-03	5,82E-04	5,82E-04
Ionising radiation	Pt	1,84E-03	1,96E-03	4,77E-04	4,77E-04
Land use	Pt	1,37E-03	1,46E-03	1,94E-04	1,94E-04
Ozone depletion	Pt	4,26E-04	4,55E-04	3,48E-05	3,48E-05
Photochemical ozone formation	Pt	2,72E-01	2,90E-01	1,90E-02	1,90E-02
Resource use, fossils	Pt	2,80E-01	2,99E-01	2,35E-02	2,35E-02
Resource use, pesa and metals	Pt	7,34E-03	7,83E-03	1,41E-03	1,41E-03
Water use	Pt	3,17E-03	3,38E-03	2,49E-03	2,49E-03

Tabella 23. Punteggi ottenuti per ogni categoria di impatto, dopo aver applicato la pesatura dei risultati normalizzati.

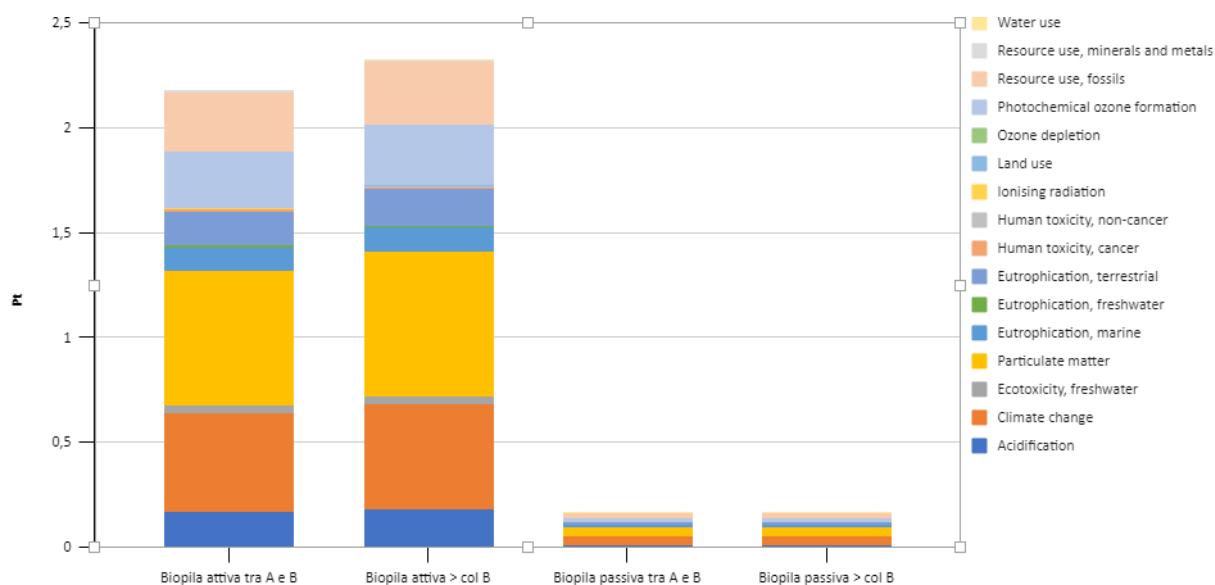


Figura 29. Grafico dei punteggi ottenuti per ogni categoria di impatto, dopo aver applicato la pesatura dei risultati normalizzati.

Le categorie d’impatto che, dopo pesatura, hanno ottenuto un punteggio maggiore sono quelle relative all’utilizzo di risorse fossili, alla formazione di particolato e al cambiamento climatico. Tutti questi risultati sono in accordo con il tipo di trattamento riservato al terreno contaminato: l’utilizzo di mezzi alimentati a carburanti derivati da combustibili fossili fornisce una spiegazione rispetto ai vari contributi nelle diverse categorie d’impatto. I diversi pesi attribuiti negli studi EF (S et al., 2017) hanno messo in evidenza due categorie d’impatto sopra tutte le altre: il cambiamento climatico e la formazione di particolato. Lo sfruttamento prolungato di mezzi alimentati a combustibili fossili (nel nostro caso diesel) causa rilevanti emissioni atmosferiche calcolate in termini di CO₂ equivalente (indicatore di categoria “climate change”) e di formazione di materiale particolato. Il particolato rappresenta un inquinante a forte impatto sulla salute umana, soprattutto per quanto riguarda la frazione fine (PM_{2,5}), che riesce a penetrare in profondità nei polmoni. Il particolato è sia nocivo in sé in quanto irritante delle mucose sia come “veicolo” che trasporta nei polmoni e nel sangue inquinanti in tracce, potenzialmente mutageni o nocivi (Grantz et al., 2003).

4.5 Interpretazione

Dopo aver concluso l’intera fase di valutazione degli impatti (LCIA) è stato possibile effettuare delle considerazioni riguardo la tecnologia di trattamento in biopile. Lo scenario che prevede l’utilizzo di biopile attive risulta di gran lunga più impattante rispetto allo scenario passivo, questo per entrambe le tipologie di contaminanti considerati. Questo è visibile da tutti i grafici e le tabelle presenti nello studio LCA riportato in questo elaborato, in cui i valori riferiti alle categorie d’impatto delle biopile attive risultano sempre maggiori rispetto a quelli riportati dalle biopile passive. La

differenza tra i livelli d'impatto tra queste due tipologie di trattamento la fa lo sfruttamento più o meno prolungato di mezzi pesanti utilizzati per il carico e lo scarico ma soprattutto per il rimescolamento e il ricaricamento periodico dei cumuli contaminati. Tra tutte le fasi di trattamento analizzate il rimescolamento e il ricaricamento delle biopile risultano essere i due processi più rilevanti a livello di impatti. Le categorie d'impatto più colpite sono risultate essere il cambiamento climatico, l'uso di combustibili fossili, la formazione di particolato e l'eutrofizzazione (sia marina che terrestre). Tutti questi dati fanno riferimento principalmente alle emissioni dovute allo sfruttamento di mezzi alimentati a diesel, una possibile soluzione per ridurre questi impatti potrebbe essere l'utilizzo di mezzi alimentati ad energia elettrica e la preferenza del trattamento in biopile di tipo passivo rispetto a quello attivo. Va ricordato che nello studio condotto non sono state considerate le attività relative al conferimento dei terreni e al loro eventuale spostamento all'interno dell'area dell'impianto, oltre al trasporto all'esterno dei cumuli una volta trattati nelle biopile. Queste attività potrebbero essere incluse in uno studio futuro che non si limiti a confrontare i due sistemi (biopile attive e passive) ma li vada a confrontare con altri sistemi di bonifica (in situ, ex situ, on situ), in modo da avere una quantificazione completa degli impatti ambientali relativi a diversi processi di trattamento.

Conclusioni

Lo studio condotto in questo elaborato di tesi ha trattato la valutazione dell'efficacia e della sostenibilità ambientale riguardante una specifica tecnica di biorisanamento, ovvero il trattamento in biopile di terreni contaminati derivanti da bonifica o spazzamento stradale, dell'impianto di Ladurner Remedia. Lo studio si è posto come primo obiettivo la valutazione dell'efficacia del trattamento in biopile di terreni contaminati. Grazie al campionamento periodico delle singole biopile presenti all'interno dell'impianto (sei biopile in totale) e alla compilazione di specifiche schede di campo è stato possibile verificare il corretto funzionamento del processo analizzato. Sono stati tracciati i consumi di Ossigeno e gli aumenti delle temperature dovuti all'attività microbica di biodegradazione dei contaminanti presenti e sono stati valutati i quantitativi di idrocarburi pesanti ((HC)>12) presenti e la domanda chimica di ossigeno (COD) dei terreni contaminati pre e post trattamento. Tutte le biopile sono state sottoposte ad una prova respirometrica e hanno risposto positivamente, mostrando una diminuzione continua della concentrazione di Ossigeno ed un aumento delle temperature (interne al cumulo e nella linea effluenti nel retro di ogni biocella) per tutto il periodo di trattamento. Inoltre, tutte le analisi di pre e post trattamento hanno riportato una significativa riduzione delle concentrazioni di (HC)>12 e della COD. Il secondo obiettivo di questo elaborato è stata la valutazione della sostenibilità del processo di trattamento in biopile, raggiunto attraverso il conseguimento di una valutazione LCA relativa a quattro diversi scenari che comprendevano diverse situazioni di tipologia di utilizzo delle biopile e presenze di contaminanti appartenenti alle due diverse categorie citate nel D.Lgs. 152/2006 (Allegato 5, Parte IV, Tabella 1). Sono state considerate e valutate le seguenti quattro alternative:

1. Biopila attiva con livelli di contaminanti "tra col. A e col. B";
2. Biopila attiva con livelli di contaminanti "> col. B";
3. Biopila passiva con livelli di contaminanti "tra col. A e col. B";
4. Biopila passiva con livelli di contaminanti "> col. B".

L'analisi ha permesso il confronto tra i risultati ottenuti in questi quattro scenari applicando il metodo Environmental Footprint (He et al., 2019) grazie alla consultazione e il successivo utilizzo del database EcoInvent (Frischknecht et al., 2005), i dati raccolti e il software SimaPro v.9.5.0.0 e quindi valutando gli impatti di ciascuno scenario rispetto ad ogni categoria d'impatto presentata dal metodo. Dall'analisi il trattamento tramite biopila attiva è risultato essere di gran lunga più impattante rispetto all'alternativa passiva, e i contaminanti appartenenti alla categoria "> col. B" (Dlgs 152/2006, Allegato 5, Parte 4, Tabella 1) hanno riportato valori d'impatto leggermente maggiori rispetto alla categoria di contaminanti "tra col. A e col. B" (riferito sempre al trattamento in biopila di tipologia attiva). Particolare attenzione va prestata allo sfruttamento dei mezzi pesanti

come le pale meccaniche: un'ipotetica riduzione del tempo di utilizzo di queste apparecchiature (quindi la scelta di utilizzare solo biopile di tipo passivo) diminuirebbe considerevolmente gli impatti globali del sistema analizzato. Un possibile ulteriore sviluppo che porterebbe un'ulteriore diminuzione degli impatti del trattamento analizzato potrebbe essere l'utilizzo di mezzi ibridi o totalmente alimentati ad energia elettrica per le operazioni di carico, scarico, eventuali rimescolamenti e ricarichi delle biopile.

Lo strumento dell'LCA è risultato essere molto versatile e completo anche in applicazione ad una tipologia di trattamento non così diffusa come quella trattata nel presente elaborato di tesi. L'LCA è risultata essere uno strumento in grado di fornire analisi oggettive e solide in grado di indirizzare verso soluzioni meno impattanti con valutazioni che presentano dati quantitativi di valori d'impatto ambientale, particolarmente significativi per l'ottenimento di un processo di progettazione o di valutazione di alternative incentrati su dati scientifici oggettivi. I risultati di questo studio potrebbero essere comparati a risultati relativi ad altri studi LCA su diverse tecnologie di trattamento di terreni da bonifica per un ipotetico confronto della sostenibilità di un sistema di trattamento in biopile rispetto ad altre alternative.

Bibliografia

- Adriano, D. C., Bollag, J.-M., Frankenberger, W. T., & Sims, R. C. (Eds.). (1999). *Bioremediation of Contaminated Soils*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr37>
- Baheri, H. (2002). Feasibility of fungi bioaugmentation in composting a flare pit soil. *Journal of Hazardous Materials*, 89(2–3), 279–286. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00318-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00318-1)
- Baldan, E., Basaglia, M., Fontana, F., Shapleigh, J. P., & Casella, S. (2015). Development, assessment and evaluation of a biopile for hydrocarbons soil remediation. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 98, 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.12.002>
- Bollag J-M, Frankenberger W.T., Sims R.C., Adriano D.C., Kral D., Viney M.K, Hatfield J., Volenec J.J, & Bigham J.M. (1999). *Bioremediation of Contaminated Soils* (D. C. Adriano, J.-M. Bollag, W. T. Frankenberger, & R. C. Sims, Eds.). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr37>
- Brugnoli E., Uricchio V. F., Massarelli C., & Zurlini G. (2014). *Tecnologia di bonifica dei siti contaminati*.
- Campioli, A., Ganassali, S., Dalla Valle, A., & Giorgi, S. (2018). Progettare il ciclo di vita della materia: nuove tendenze in prospettiva ambientale. *Techne: Journal of Technology for Architecture and Environment*, 16. <https://doi.org/10.13128/Techne-23016>
- Cavazzoli, S., Squartini, A., Sinkkonen, A., Romantschuk, M., Rantalainen, A.-L., Selonen, V., & Roslund, M. I. (2023). Nutritional additives dominance in driving the bacterial communities succession and bioremediation of hydrocarbon and heavy metal contaminated soil microcosms. *Microbiological Research*, 270, 127343. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127343>
- Cavenago, Grosso, & Rigamonti. (2021). *LE FASI OPZIONALI DI NORMALIZZAZIONE E PESATURA NELL'ANALISI DEL CICLO DI VITA: APPROCCI POSSIBILI E STATO DELL'ARTE*. <https://doi.org/https://doi.org/10.32024/ida.v8i3.332>
- Ceccanti, B., Masciandaro, G., Garcia, C., Macci, C., & Doni, S. (2006). Soil Bioremediation: Combination of Earthworms and Compost for the Ecological Remediation of a Hydrocarbon Polluted Soil. *Water, Air, and Soil Pollution*, 177(1–4), 383–397. <https://doi.org/10.1007/s11270-006-9180-4>
- Cesaretti, G. P. (2011). L'approccio della Fondazione Simone Cesaretti ai temi della sostenibilità dello sviluppo umano. *RIVISTA DI STUDI SULLA SOSTENIBILITA'*, 1, 11–13. <https://doi.org/10.3280/RISS2011-001003>
- Datta, I., & Allen, D. G. (n.d.). Biofilter Technology. In *Biotechnology for Odor and Air Pollution Control* (pp. 125–145). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/3-540-27007-8_6
- Ekvall, T. (2005). SETAC summaries. *Journal of Cleaner Production*, 13(13–14), 1351–1358. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.05.015>
- Fava, J. A., Smerek, A., Heinrich, A. B., & Morrison, L. (2014). *The Role of the Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) in Life Cycle Assessment (LCA) Development and Application* (pp. 39–83). https://doi.org/10.1007/978-94-017-8697-3_2
- Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R., Christiansen, K., & Klüppel, H.-J. (2006a). The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(2), 80–85. <https://doi.org/10.1065/lca2006.02.002>

- Frischknecht, R., Braunschweig, A., Hofstetter, P., & Suter, P. (2000). Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, *20*(2), 159–189. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(99\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(99)00042-6)
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hischer, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., & Spielmann, M. (2005). The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework (7 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *10*(1), 3–9. <https://doi.org/10.1065/lca2004.10.181.1>
- Grantz, D. A., Garner, J. H. B., & Johnson, D. W. (2003). Ecological effects of particulate matter. *Environment International*, *29*(2–3), 213–239. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00181-2](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00181-2)
- Guest, J. S., Skerlos, S. J., Barnard, J. L., Beck, M. B., Daigger, G. T., Hilger, H., Jackson, S. J., Karvazy, K., Kelly, L., Macpherson, L., Mihelcic, J. R., Pramanik, A., Raskin, L., Van Loosdrecht, M. C. M., Yeh, D., & Love, N. G. (2009). A New Planning and Design Paradigm to Achieve Sustainable Resource Recovery from Wastewater. *Environmental Science & Technology*, *43*(16), 6126–6130. <https://doi.org/10.1021/es9010515>
- He, B., Shao, Y., Wang, S., Gu, Z., & Bai, K. (2019). Product environmental footprints assessment for product life cycle. *Journal of Cleaner Production*, *233*, 446–460. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.078>
- Jørgensen, K. S., Puustinen, J., & Suortti, A.-M. (2000). Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil by composting in biopiles. *Environmental Pollution*, *107*(2), 245–254. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00144-X](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00144-X)
- Klöpffer, W. (1997). Life cycle assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, *4*(4), 223–228. <https://doi.org/10.1007/BF02986351>
- Kriipsalu, M., & Nammari, D. (2010). Monitoring of biopile composting of oily sludge. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, *28*(5), 395–403. <https://doi.org/10.1177/0734242X09337749>
- Leahy, J. G., & Colwell, R. R. (1990). Microbial degradation of hydrocarbons in the environment. *Microbiological Reviews*, *54*(3), 305–315. <https://doi.org/10.1128/mr.54.3.305-315.1990>
- Liu, W., Luo, Y., Teng, Y., Li, Z., & Ma, L. Q. (2010). Bioremediation of oily sludge-contaminated soil by stimulating indigenous microbes. *Environmental Geochemistry and Health*, *32*(1), 23–29. <https://doi.org/10.1007/s10653-009-9262-5>
- Lundie, S., Peters, G. M., & Beavis, P. C. (2004). Life Cycle Assessment for Sustainable Metropolitan Water Systems Planning. *Environmental Science & Technology*, *38*(13), 3465–3473. <https://doi.org/10.1021/es034206m>
- Ma, J., Yang, Y., Dai, X., Chen, Y., Deng, H., Zhou, H., Guo, S., & Yan, G. (2016). Effects of adding bulking agent, inorganic nutrient and microbial inocula on biopile treatment for oil-field drilling waste. *Chemosphere*, *150*, 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.01.123>
- Norris, D. Robert. (2017). *Handbook of Bioremediation (1993)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203712764>
- Norton, S. B., Rodier, D. J., van der Schalie, W. H., Wood, W. P., Slimak, M. W., & Gentile, J. H. (1992). A framework for ecological risk assessment at the EPA. *Environmental Toxicology and Chemistry*, *11*(12), 1663–1672. <https://doi.org/10.1002/etc.5620111202>

S, S., A, C., & R, P. (2017). *Development of a weighting approach for the Environmental Footprint*. KJ-NA-28562-EN-C (print), KJ-NA-28562-EN-N (online). <https://doi.org/10.2760/945290> (online), 10.2760/446145 (print)

Sazdovski, I., Bala, A., & Fullana-i-Palmer, P. (2021). Linking LCA literature with circular economy value creation: A review on beverage packaging. *Science of The Total Environment*, 771, 145322. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145322>

Silva, A. M. E. V. da, Silva, R. J. N. B. da, & Camões, M. F. G. F. C. (2011). Optimization of the determination of chemical oxygen demand in wastewaters. *Analytica Chimica Acta*, 699(2), 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2011.05.026>

Srikanth, M., Sandeep, T. S. R. S., Sucharitha, K., & Godi, S. (2022). Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review. *Bioresources and Bioprocessing*, 9(1), 42. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00532-4>

Urli, & Rosa. (2020). *Sostenibilità nella bonifica dei siti contaminati e Green remediation*.

Circular Economy Network, 2021. 3° rapporto sull'Economia Circolare in Italia.

Lgs,D "152/2006". Decreto legislativo (2006):96

SuRF Italy, 2014. Sostenibilità nelle Bonifiche in Italia

UNI EN ISO 14040:2021

UNI EN ISO 14044:2021

Appendice

Global population
6.895.889.0 18

Impact categories	Unit	NF
Acidification	mol H+ eq./person	5,56E+01
Climate change	kg CO ₂ eq./person	7,55E+03
Ecotoxicity, freshwater	CTUe/person	5,67E+04
EF-particulate matter	disease incidences/person	5,95E-04
Eutrophication, freshwater	kg P eq./person	1,61E+00
Eutrophication, marine	kg N eq./person	1,95E+01
Eutrophication, terrestrial	mol N eq./person	1,77E+02
Human toxicity, cancer	CTUh/person	1,73E-05
Human toxicity, non-cancer	CTUh/person	1,29E-04
Ionising radiation	kBq U-235 eq./person	4,22E+03
Land use*	pt/person	8,19E+05
Ozone depletion	kg CFC-11 eq./person	5,23E-02
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq./person	4,09E+01
Resource depletion, fossils	MJ/person	6,50E+04
Resource depletion, minerals and metals	kg Sb eq./person	6,36E-02
Water use*	m ³ water eq of deprived water/person	1,15E+04

*For the calculation of the NF of the impact categories "land use" and "water use", refer to Crenna et al (2019)

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-019-01604-y#Sec51>

Tabella A - 1. Fattori di normalizzazione del metodo Environmental Footprint (EF) 3.1

Impact categories	WF [%]
Acidification	6,20%
Climate change	21,06%
Ecotoxicity, freshwater	1,92%
EF-particulate matter	8,96%
Eutrophication, freshwater	2,80%
Eutrophication, marine	2,96%
Eutrophication, terrestrial	3,71%
Human toxicity, cancer	2,13%
Human toxicity, non-cancer	1,84%
Ionising radiation	5,01%
Land use	7,94%
Ozone depletion	6,31%
Photochemical ozone formation	4,78%
Resource depletion, fossils	8,32%
Resource depletion, minerals and metals	7,55%
Water use	8,51%

Source: Sala S, Cerutti AK, Pant R. (2018). Development of a weighting approach for Environmental Footprint. European Commission, Joint Research Centre, Publication Office of the European Union, Luxembourg. ISBN 978-92-79-68041-0.

Tabella A - 2. Fattori di pesatura del metodo Environmental Footprint (EF).