



**DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA VITA E DELL'AMBIENTE**  
CORSO DI LAUREA IN: RISCHIO AMBIENTALE & PROTEZIONE CIVILE

**Analisi di sostenibilità ambientale  
della bonifica di suoli contaminati da idrocarburi  
mediante desorbimento termico.**

Environmental sustainability analysis of a thermal desorption  
remediation strategy on a soil contaminated with  
hydrocarbons.

TIPO TESI: Sperimentale.

Studentessa:  
ROBERTA BIAGIOTTI

Relatrice:  
PROF.SSA FRANCESCA BEOLCHINI

Correlatrice:  
PROF.SSA ALESSIA AMATO

ANNO ACCADEMICO 2020-2021

Inserire qui l'eventuale dedica.  
Questo è un esempio di capoverso che serve per mostrare  
le caratteristiche dello stile "Dedica".  
Usare l'interruzione di riga forzata (SHIFT+INVIO; segno nascosto: ↵)  
per mantenere unite le righe.

<b>ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>CAPITOLO 1 LE BONIFICHE .....</b>	<b>8</b>
1.1 <i>La situazione dei siti contaminati in Italia .....</i>	8
1.2 <i>Siti di Interesse Nazionale (SIN).....</i>	17
1.3 <i>Il contesto legislativo.....</i>	19
1.4 <i>Tipologie di interventi su suoli contaminati .....</i>	25
<b>CAPITOLO 2 DESORBIMENTO TERMICO.....</b>	<b>33</b>
2.1 <i>Il Desorbimento Termico in letteratura.....</i>	36
<b>CAPITOLO 3 SCOPO DEL LAVORO .....</b>	<b>50</b>
<b>CAPITOLO 4 MATERIALI E METODI.....</b>	<b>51</b>
4.1 <i>Normativa di riferimento .....</i>	54
4.2 <i>Tipologie di LCA.....</i>	55
4.3 <i>Software per l'analisi .....</i>	58
<b>CAPITOLO 5 ANALISI DI SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE.....</b>	<b>59</b>
5.1 <i>Metodologia.....</i>	59
5.2 <i>Definizione scopi e obiettivi.....</i>	60
5.3 <i>Analisi Dell'inventario .....</i>	63
5.4 <i>Valutazione Degli Impatti.....</i>	64
5.5 <i>Interpretazione e Miglioramento.....</i>	68
<b>CAPITOLO 6 IL CASO STUDIO .....</b>	<b>69</b>
6.1 <i>Descrizione dell'area oggetto di studio.....</i>	69
6.2 <i>Applicazione della tecnologia.....</i>	71
6.3 <i>Monitoraggio dei contaminanti e collaudo .....</i>	73
6.4 <i>Risultati del monitoraggio .....</i>	76
<b>CAPITOLO 7 LCA APPLICATO AL CASO STUDIO.....</b>	<b>79</b>
7.1 <i>Confronto di impatti associati all'utilizzo di energia da fonte non rinnovabile e rinnovabile .....</i>	100
<b>CAPITOLO 8 CONCLUSIONI.....</b>	<b>102</b>
<b>CAPITOLO 9.....</b>	<b>104</b>
BIBLIOGRAFIA .....	104
SITOGRAFIA.....	107

FIGURA 1.1: NUMERO TOTALE DI PROCEDIMENTI DI BONIFICA. ....	8
FIGURA 1.2: SUDDIVISIONE DELLO STATO DI AVANZAMENTO DELLE BONIFICHE IN ITALIA AL 31 DICEMBRE 2019. ....	9
FIGURA 1.3: DISTRIBUZIONE DEI PROCEDIMENTI DI BONIFICA IN CORSO NELLE TRE FASI PROCEDURALI (NOTIFICA, MODELLO CONCETTUALE, BONIFICA). ....	9
FIGURA 1.4: PERCENTUALE DI PROCEDIMENTI IN FASE DI MODELLO CONCETTUALE .....	9
FIGURA 1.5: DISTRIBUZIONE DELLO STATO DELLA CONTAMINAZIONE PER PROCEDIMENTI IN CORSO. ..	10
FIGURA 1.6: PROCEDIMENTI IN CORSO – NUMERO SITI IN FASE DI NOTIFICA E PRINCIPALI MODALITÀ DI ATTIVAZIONE DEL PROCEDIMENTO. ....	11
FIGURA 1.7: ITER PROCEDURALE PER CONCLUSIONE DEL PROCEDIMENTO. ....	15
FIGURA 1.8: SUPERFICI IN KM <sup>2</sup> DEI PROCEDIMENTI DI BONIFICA REGIONALI (IN AZZURRO) E DEI SITI INTERESSE NAZIONALE (SIN IN ROSSO). ....	17
FIGURA 1.9: ESTENSIONE DI TUTTI E 59 SIN (ATTUALMENTE 42). ....	18
FIGURA 1.10: AVANZAMENTO NELL'IDENTIFICAZIONE DEI SIN ED EVOLUZIONE DEL QUADRO NORMATIVO. ....	18
FIGURA 1.11: FASI PER IL CALCOLO DEL RISCHIO PROPOSTO DALLA NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE (ISPRA). ....	24
FIGURA 1.12: SCHEMA DI INCAPSULAMENTO. ....	28
FIGURA 1.13: SCHEMA DI UNA BARRIERA IDRAULICA. ....	29
FIGURA 2.1: SCHEMA DI TRATTAMENTO TERMICO IN SITU (FONTE: FRTR, EPA). ....	34
FIGURA 3.1: SCHEMA DELLO STUDIO LCA. ....	50
FIGURA 4.1: DIAGRAMMA DI FLUSSO DI UN SISTEMA PRODUTTIVO. ....	52
FIGURA 4.2: SCHEMA DI UN IPOTETICO CICLO DI VITA DI UN PRODOTTO/SERVIZIO .....	53
FIGURA 4.3: SCHEMA DI SINTESI DELLE POSSIBILI TIPOLOGIE DI LCA .....	56
FIGURA 4.4: POTENZIALI SETTORI DI INTERESSE DI UNO STUDIO LCA .....	58
FIGURA 5.1: STRUTTURA DI UNO STUDIO LCA .....	59
FIGURA 5.2: SCHEMA DELLE CATEGORIE D'IMPATTO (MIDPOINT) E DELLE CATEGORIE DI DANNO (ENDPOINT) DEL METODO IMPACT 2002+. ....	66
FIGURA 5.3: SCHEMA RIASSUNTIVO DELLA METODOLOGIA LCA .....	68
FIGURA 6.1: RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DELL'AREA OGGETTO DI STUDIO. ....	69
FIGURA 6.2: SUDDIVISIONE DELL'AREA OGGETTO DI BONIFICA IN LOTTI OMOGENEI PER CARATTERISTICHE E VOLUMI. ....	70
FIGURA 6.3: RAFFIGURAZIONE DI SMART BURNERS <sup>®</sup> MONTATO IN TESTA AD UN TUBO SCALDANTE E TUBO DI ESTRAZIONE DEI CONTAMINANTI VOLATILIZZATI SITUATO NEL "PUNTO FREDDO". ....	71
FIGURA 6.4: SCHEMA DI POSIZIONAMENTO DI SMART BURNERS <sup>®</sup> E TUBI DI ASPIRAZIONE DEI VAPORI. ....	71
FIGURA 6.5: SCHEMA TRATTAMENTO EMISSIONI .....	73
FIGURA 6.6: ANDAMENTO DELLE TEMPERATURE DURANTE IL TRATTAMENTO DI BONIFICA DEL LOTTO PILOTA A1. ....	75
FIGURA 7.1: SCHEMA SUDDIVISIONE TEMPORALE DELLA BONIFICA. ....	79
FIGURA 7.2: CONFINI DEL SISTEMA SEMPLIFICATO .....	81
FIGURA 7.3: CONFINI DEL SISTEMA PREPARAZIONE E ALLESTIMENTO (FASE 1). ....	82
FIGURA 7.4: CONFINI DEL SISTEMA START-UP E BONIFICA (FASE 2). ....	84
FIGURA 7.5: CONFINI DEL SISTEMA DIMISSIONE (FASE 3). ....	85
FIGURA 7.6: CONFINI DEL SISTEMA DEL TRATTAMENTO DELLE EMISSIONI (UVT) .....	86
FIGURA 7.7: CONFINI DEL SISTEMA DEL SISTEMA DUAL PUMP .....	86
FIGURA 7.8: CONFINI DEL SISTEMA DELLA LOGISTICA .....	86
FIGURA 7.9: GRAFICI RELATIVI ALLE EMISSIONI DELLA FASE DELL'INVENTARIO. ....	90
FIGURA 7.10: GRAFICI CLASSIFICAZIONE E CARATTERIZZAZIONE RIFERITI AL LOTTO A5. ....	96
FIGURA 7.11: GRAFICO RELATIVO ALLE FASI DI NORMALIZZAZIONE E PESATURA RIPORTANTE IL P.E. PER OGNI FASE DEL PROCESSO. ....	97
FIGURA 7.12: GRAFICO DEGLI IMPATTI SULLE CATEGORIE AMBIENTALI. ....	98
FIGURA 7.13: CONFRONTO TRA GLI IMPATTI DERIVANTI DALL'UTILIZZO DI ENERGIA NON RINNOVABILE E RINNOVABILE. ....	101



TABELLA 1.1: NUMERO DI SITI CONTAMINATI A LIVELLO REGIONALE E PERCENTUALE RISPETTO AL TOTALE DEI PROCEDIMENTI IN CORSO. ....	13
TABELLA 1.2: NUMERO DI SITI CONTAMINATI E NUMERO DI SITI NEI CORRISPONDENTI <i>STEP</i> PROCEDURALI. ....	14
TABELLA 1.3: PRIMI 20 COMUNI PER PROCEDIMENTI IN CORSO. ....	16
TABELLA 1.4: PRIMI 20 COMUNI PER NUMERO DI PROCEDIMENTI CONCLUSI. ....	16
TABELLA 1.5: ELENCO MECCANISMI DI MNR. ....	27
TABELLA 1.6: PRINCIPALI TECNOLOGIE DI BONIFICA E LORO CLASSIFICAZIONE. ....	31
TABELLA 2.1: EFFICACIA DEL DESORBIMENTO TERMICO PER DIVERSE MATRICI IN FUNZIONE DEL TIPO DI CONTAMINANTE. ....	35
TABELLA 2.2: RIFERIMENTI LETTERATURA SCIENTIFICA ....	47
TABELLA 6.1: CARATTERISTICHE DEL LOTTO PILOTA (A1). ....	70
TABELLA 6.2: CONCENTRAZIONI DI CONTAMINANTI NEL VOLUME A PRIMA DELLA BONIFICA. ....	77
TABELLA 6.3: CONCENTRAZIONI DI CONTAMINANTI DOPO LA BONIFICA. ....	77
TABELLA 7.1: DATI PRIMARI DI PROCESSO. ....	87

## ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

SIN	Siti di Interesse Nazionale.
ISPRA	Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.
C	Concentrazione.
CSC	Concentrazione soglia di contaminazione.
CSR	Concentrazione soglia di rischio.
MISO	Messa in sicurezza operativa.
MISP	Messa in sicurezza permanente.
PA	Messa in sicurezza permanente.
MATTM	Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.
SNPA	Sistema nazionale a rete per la Protezione dell'Ambiente.
ARPA	Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente.
APPA	Agenzia Provinciale per la Protezione dell'Ambiente.
MCS	Modello Concettuale del Sito.
MNR	Recupero Naturale Monitorato.

## ABSTRACT

Dopo un breve richiamo e una descrizione della metodologia *Life Cycle Assessment* il cui scopo è quello di stabilire e valutare gli impatti ambientali associati a un prodotto o alla fornitura di un servizio nel corso del suo intero ciclo di vita, il lavoro tratta l'applicazione della metodologia ad un caso studio.

Nello specifico viene descritta l'applicazione della metodologia *Life Cycle Assessment* ad un caso concreto relativo alla bonifica mediante desorbimento termico di terreno insaturo contaminato da idrocarburi nell'ex-discarica Petrolifera di Gela (CL), Sicilia.

Vengono, infine, fornite considerazioni sul processo.

## **INTRODUZIONE e SCOPO DELLA TESI**

L'acquisita consapevolezza della gravità che, nel nostro Paese, assumono i problemi di contaminazione dei terreni e del rilevante impegno scientifico, tecnico ed economico richiesto per conseguire il risanamento, ha prodotto una rapida crescita nel settore delle bonifiche.

Con il termine "bonifica" si intende "l'insieme degli interventi atti ad eliminare le fonti di inquinamento e le sostanze inquinanti o a ridurre le concentrazioni presenti nel suolo, nel sottosuolo, nelle acque superficiali o nelle acque sotterranee, ad un livello uguale o inferiore ai valori delle concentrazioni soglia di rischio.

L'obiettivo finale delle bonifiche ambientali è, quindi, quello di salvaguardare l'ambiente e la salute pubblica.

La rapida crescita del settore risulta strettamente collegata oltre che con una maggiore consapevolezza ambientale, anche con la disponibilità di strumenti normativi organici, in grado di fornire precisi indirizzi su cui basare gli interventi, con superamento delle incertezze e della frammentarietà che caratterizzavano, fino a qualche anno fa, la situazione italiana.

La bonifica dei siti costituisce un problema complesso non soltanto per gli aspetti tecnologici ma anche per le connesse implicazioni ambientali e socio-economiche.

La correttezza delle decisioni, da assumere in un contesto non univocamente definito, data la molteplicità di vincoli e gli obiettivi spesso tra loro conflittuali, condiziona sia l'esito finale dell'intervento sia il razionale utilizzo delle risorse economiche.

Una solida padronanza delle tecnologie oggi disponibili costituisce l'indispensabile premessa a qualsiasi intervento ed i progressi sono stati rilevanti: processi che fino a qualche anno fa venivano considerati sperimentali trovano oggi applicazione relativamente diffusa su piena scala.

Un contributo importante proviene, anche, da iniziative di grandi industrie, soprattutto nel settore chimico, petrolchimico, petrolifero e siderurgico, trovandosi a dover affrontare, internamente all'azienda, situazioni pregresse di contaminazione anche gravissime, prodottasi in decenni di attività condotta con scarsa attenzione per i problemi dell'ambiente.

In molti casi, tuttavia, l'attuale disponibilità di tecnologie resta largamente insufficiente a risolvere i problemi della contaminazione a costi sostenibili.

La rilevanza dell'impegno economico e della sua problematica sostenibilità in alcune situazioni specifiche alimentano il dibattito in merito a diversi criteri per la definizione dei livelli di decontaminazione e degli obiettivi di intervento mediante strumenti di analisi di rischio che consentono di individuare un punto di equilibrio tra la non rinunciabile necessità di tutela dell'ambiente e della salute e le esigenze economiche produttive delle singole aziende e del sistema nazionale.

Fiduciosa del grande passo in avanti che verrà fatto in ambito di bonifiche, oggi e negli anni a venire, il mio elaborato si pone l'obiettivo di eseguire un'analisi di sostenibilità ambientale di una bonifica di terreno contaminato da idrocarburi, mediante desorbimento termico, analisi fino ad ora mai condotta prima.

# Capitolo 1 LE BONIFICHE

## 1.1 La situazione dei siti contaminati in Italia

Ad oggi, Marzo 2021, il numero totale dei siti oggetto di bonifica, relativi esclusivamente a procedimenti regionali, ossia, escludendo i Siti di Interesse Nazionale (SIN), sono 34.478.

Tra questi, 16.264 sono soggetti a procedimento in corso e 17.862 lo hanno concluso (Figura 1.1).

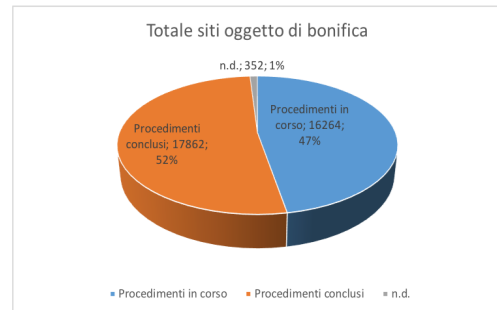


Figura 1.1: Numero totale di procedimenti di bonifica. Edizione 2021. (ISPRA, Rapporti 337/21).

Il dato nazionale, riportato dall' Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, (ISPRA) mostra che il 56% dei procedimenti in corso, più della metà dei totali, si trova nella fase di “notifica”, fase relativa all' attivazione del procedimento, e si tratta principalmente di siti il cui stato della contaminazione non è noto o lo è in modo preliminare.

Le successive fasi di “modello concettuale” e “bonifica” sono equamente distribuite, rispettivamente 21% e 20% mentre, il restante 3%, è costituito da procedimenti per i quali l'informazione non è disponibile (Figura 1.2)

I successivi passaggi procedurali sono così distribuiti (Figura 1.3):

- Caratterizzazione in corso: 11%
- Caratterizzazione conclusa: 7%
- Analisi di rischio approvata: 3%
- Intervento in corso: 16%
- Intervento concluso non certificato, in attesa di certificazione: 4%
- Iter non noto: 3%

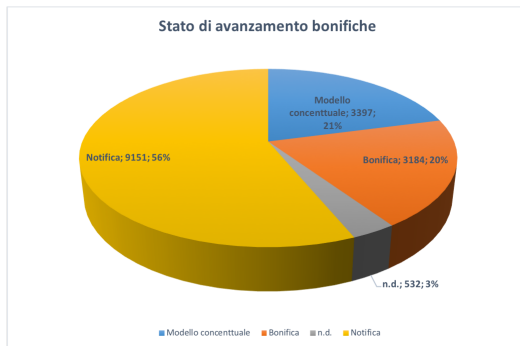


Figura 1.2: Suddivisione dello stato di avanzamento delle bonifiche in Italia al 31 dicembre 2019.

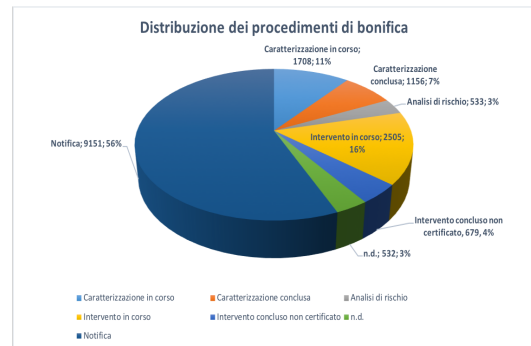


Figura 1.3: Distribuzione dei procedimenti di bonifica in corso nelle tre fasi procedurali (notifica, modello concettuale, bonifica).

La fase di “notifica” rappresenta la porta di accesso al procedimento di bonifica, vi appartiene un elevato numero di siti per i quali non vi sono riscontri analitici o, qualora presenti, sono preliminari e quindi accomunati da uno stadio iniziale dell’iter, si tratta di circa 9000 siti che costituiscono il 56% di tutti i procedimenti in corso (Figura 1.2-1.3).

La fase “modello concettuale” raggruppa gli *step* procedurali che riguardano la formulazione del modello del sito ossia “piano di caratterizzazione approvato”, “caratterizzazione conclusa” e “analisi di rischio approvata”, situazione per la quale le concentrazioni di contaminanti sono superiori alle concentrazioni soglia di rischio, ( $C > CSR$ ).

A livello nazionale nella fase di modello concettuale sono censiti circa 3400 siti, pari al 21% del totale con procedimento in corso (Figura 1.5).

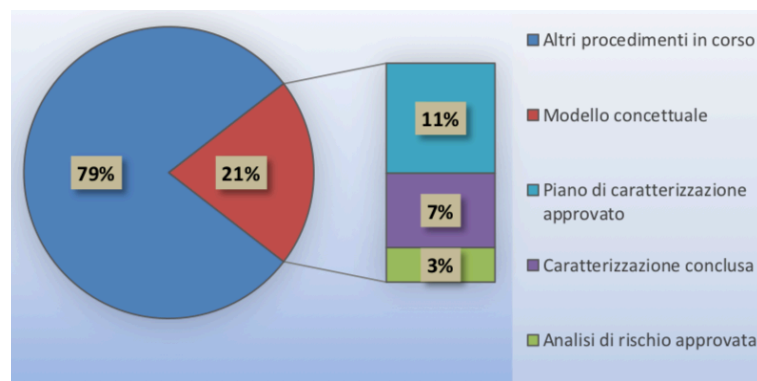


Figura 1.4: Percentuale di procedimenti in fase di modello concettuale riferita al totale dei procedimenti in corso e distribuzione degli *step* procedurali che compongono la fase.

La norma vigente impone l'approvazione di progetti di bonifica o di messa in sicurezza, operativa o permanente, al fine di riportare le concentrazioni rilevate nel sito sotto determinate soglie o comunque di ricondurre ad accettabilità il rischio sanitario e ambientale.

Il totale dei procedimenti afferenti alla fase "bonifica" risulta dalla somma dei siti aventi "intervento concluso in attesa di certificazione" e "intervento approvato" e consta di circa 3200 procedimenti pari al 19% di quelli in corso.

Le informazioni di dettaglio relativamente alla modalità di intervento di bonifica, MISO, MISP o di intervento misto, sono state fornite per il 69% dei siti con intervento approvato e sono mostrate in Figura 1.5:

- 1.308 interventi di bonifica;
- 277 interventi di messa in sicurezza permanente (MISP);
- 101 interventi di messa in sicurezza operativa (MISO);
- 51 interventi misti;
- 768 interventi per i quali non è nota la modalità di intervento.

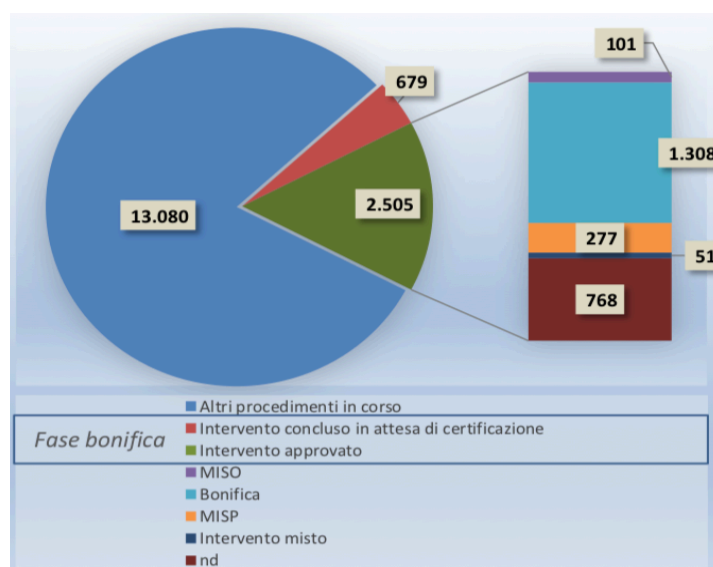


Figura 1.5: Distribuzione dello stato della contaminazione per procedimenti in corso.



La modalità di attivazione (in seguito al D.Lgs. 152/06, al DM 471/99 e di riclassificazione SIN) dei 9151 procedimenti in fase di notifica è nota per il 79% dei procedimenti ed è mostrata in Figura 1.6:

- 4.019 procedimenti avviati ai sensi della norma vigente D.Lgs. 152/06 e ss.mm.ii. (44%);
- 307 procedimenti avviati ai sensi della norma previgente D.M. 471/99 (3%);
- 2.900 procedimenti restituiti alla competenza regionale a seguito di deperimetrazione dei SIN (32%).

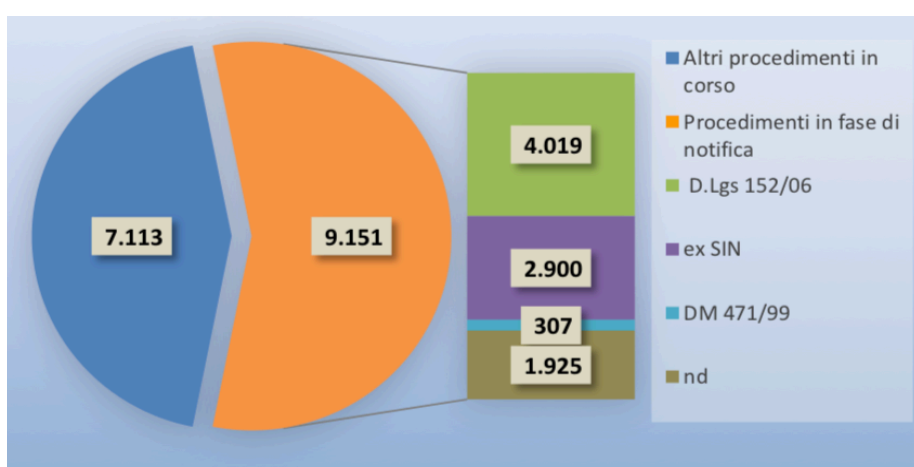


Figura 1.6: Procedimenti in corso – Numero siti in fase di notifica e principali modalità di attivazione del procedimento.

A livello regionale la distribuzione degli stati di contaminazione per i procedimenti in corso è estremamente eterogenea nonostante *sia auspicabile che le Regioni adottino un approccio omogeneo nella compilazione delle anagrafi con riferimento allo stato di contaminazione al fine di restituire una risposta equivalente sull'intero territorio nazionale e rendere tali dati comparabili.*<sup>1</sup>

Tale eterogeneità è riconducibile principalmente ai diversi approcci tenuti dalle regioni nella modalità di compilazione delle anagrafi, per esempio, Bolzano registra solo siti contaminati; Marche, Piemonte, Sardegna, Toscana e Trento registrano solo siti potenzialmente contaminati e contaminati.

<sup>1</sup> Definizione tratta dal Rapporto “Lo stato delle bonifiche dei siti contaminati in Italia: i dati regionali”. <https://www.isprambiente.gov.it>

Vi è il caso particolare della Campania in cui sono presenti numerose aree precedentemente comprese all'interno del perimetro di diversi SIN e prive di riscontri analitici: tale circostanza ha comportato la distribuzione fortemente sbilanciata sui siti in attesa di accertamenti rispetto alle altre classi.

Anche nel caso della Sicilia i procedimenti in attesa di accertamenti rappresentano la quasi totalità dei procedimenti in corso, in questo caso l'elevata percentuale si spiega con la presenza di numerosi siti censiti precedentemente all'entrata in vigore del D. Lgs.152/06 e tuttora privi di riscontri analitici.

In Piemonte, Toscana, Marche, Puglia, Sardegna, Trento, Bolzano e Valle d'Aosta, non vengono censiti siti privi di riscontri analitici ma il procedimento viene registrato nella banca dati solo a seguito di un superamento della concentrazione soglia di contaminazione (CSC) pertanto all'apertura del procedimento lo stato di contaminazione attribuito è quello di "potenzialmente contaminato".

I siti in attesa di accertamenti analitici rappresentano una classe eterogenea, non rappresentativa di un impatto potenziale o effettivo sulle matrici ambientali bensì di un procedimento amministrativo ancora privo di riscontri.

Per tale motivo costituiscono una classe a sé stante che non rappresenta un vero e proprio stato di contaminazione.

I siti potenzialmente contaminati sono quelli per i quali è stato registrato il superamento delle concentrazioni soglia di contaminazione (CSC), indice di un potenziale effetto sulle matrici ambientali e sulla salute dell'uomo.

Questi siti ammontano a 5.379 e rappresentano il 33% dei procedimenti in corso.

I siti potenzialmente contaminati possono essere identificati in fase di notifica oppure a seguito di caratterizzazione.

I siti contaminati sono quei siti per i quali vi è un impatto conclamato sulle matrici ambientali, aventi livelli di contaminazione superiore ai "livelli di accettabilità" che, a seconda dei casi, possono essere fissati pari alle concentrazioni soglia di

contaminazione (CSC), oppure alle concentrazioni soglia di rischio (CSR) derivanti da una analisi di rischio sanitario-ambientale sito-specifica.

È necessario, in questi casi, un intervento di bonifica o messa in sicurezza che riduca la contaminazione nelle matrici ambientali oppure che riconduca ad accettabilità il rischio associato a tale contaminazione.

In tabella Tabella 1.1 viene riportato il numero dei siti contaminati per regione, sull'intero territorio nazionale sono 4689, ossia il 29% rispetto al totale dei procedimenti in corso.

Tabella 1.1: Numero di siti contaminati a livello regionale e percentuale rispetto al totale dei procedimenti in corso.

<i>Regione / Provincia Autonoma</i>	<i>Siti contaminati</i>	<i>% siti contaminati rispetto al totale di procedimenti in corso</i>
<i>Abruzzo</i>	<i>138</i>	<i>16%</i>
<i>Basilicata</i>	<i>38</i>	<i>16%</i>
<i>Calabria</i>	<i>56</i>	<i>49%</i>
<i>Campania</i>	<i>238</i>	<i>7%</i>
<i>Emilia-Romagna</i>	<i>363</i>	<i>66%</i>
<i>Friuli-Venezia Giulia</i>	<i>62</i>	<i>31%</i>
<i>Lazio</i>	<i>208</i>	<i>20%</i>
<i>Liguria</i>	<i>180</i>	<i>54%</i>
<i>Lombardia</i>	<i>961</i>	<i>34%</i>
<i>Marche</i>	<i>102</i>	<i>18%</i>
<i>Molise</i>	<i>9</i>	<i>30%</i>
<i>Piemonte</i>	<i>495</i>	<i>60%</i>
<i>Puglia</i>	<i>159</i>	<i>45%</i>
<i>Sardegna</i>	<i>102</i>	<i>17%</i>
<i>Sicilia</i>	<i>11</i>	<i>1%</i>
<i>Toscana</i>	<i>1.081</i>	<i>57%</i>
<i>Trento</i>	<i>47</i>	<i>33%</i>
<i>Bolzano</i>	<i>27</i>	<i>100%</i>
<i>Umbria</i>	<i>28</i>	<i>31%</i>
<i>Valle d'Aosta</i>	<i>14</i>	<i>45%</i>
<i>Veneto</i>	<i>370</i>	<i>30%</i>
<b>ITALIA</b>	<b>4.689</b>	<b>29%</b>

Tra i siti attualmente contaminati, circa 1000, pari al 39% di quelli con indicazione fornita, hanno come obiettivo di bonifica la CSR.

A livello nazionale, a fronte di 4.689 siti contaminati, risultano 2.505 interventi di bonifica e/o messa in sicurezza approvati, pari al 53% dei siti contaminati, 679 interventi di bonifica e/o messa in sicurezza conclusi in attesa di certificazione, pari al

14% dei siti contaminati e infine 1.505 siti, pari al 32% dei siti contaminati per i quali ancora non è stata avviata la fase di intervento.

Di questi ultimi, 533, pari all'11% dei siti contaminati, sono siti con analisi di rischio approvata e certificazione di sito contaminato, i rimanenti 972 siti, pari al 21% dei siti contaminati, sono in una fase dell'iter precedente a quella dell'approvazione dell'analisi di rischio.

Nella Tabella 1.2 successiva è riportato, per ciascuna Regione o Provincia autonoma, il numero di siti contaminati e quello dei corrispondenti *step* procedurali.

Tabella 1.2: Numero di siti contaminati e numero di siti nei corrispondenti *step* procedurali.

Regione / Provincia Autonoma	Siti contaminati	Bonifica/messa in sicurezza		Analisi di rischio approvata (C>CSR)	Senza indicazione
		approvata	conclusa in attesa di certificazione		
Abruzzo	138	59	15	25	39
Basilicata	38	13	21	5	-1*
Calabria	56	34	0	16	6
Campania	238	107	83	44	4
Emilia-Romagna	363	260	103	0	0
Friuli-Venezia Giulia	62	36	4	7	15
Lazio	208	112	57	29	10
Liguria	180	95	12	45	28
Lombardia	961	494	239	52	176
Marche	102	84	0	18	0
Molise	9	4	1	3	1
Piemonte	495	360	31	28	76
Puglia	159	126	20	13	0
Sardegna	102	70	0	26	6
Sicilia	11	4	0	7	0
Toscana	1.081	332	56	99	594
Trento	47	28	7	6	6
Bolzano	27	20	0	0	7
Umbria	28	16	3	8	1
Valle d'Aosta	14	5	5	0	4
Veneto	370	246	22	102	0
<b>ITALIA</b>	<b>4.689</b>	<b>2.505</b>	<b>679</b>	<b>533</b>	<b>972</b>

I procedimenti conclusi a livello nazionale sono 17.862.

Al netto di ciò è interessante osservare, laddove disponibile, il dato nazionale relativo alla modalità con la quale si è pervenuti alla conclusione del procedimento (Figura 1.7).

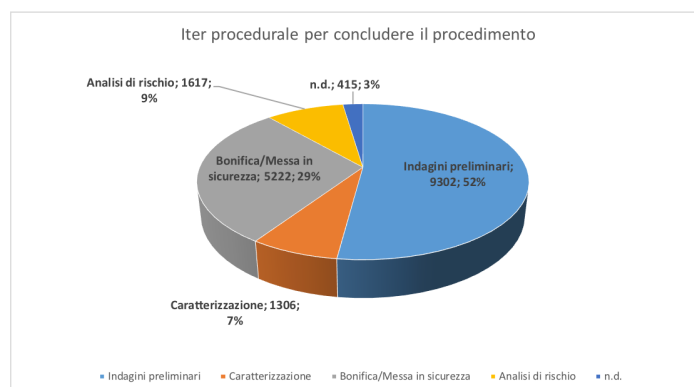


Figura 1.7: Iter procedurale per conclusione del procedimento.

Più della metà dei procedimenti, il 52%, si sono conclusi a seguito delle indagini preliminari, il 7% a seguito della caratterizzazione e il 9% a seguito dell'analisi di rischio.

Nel 29% dei casi è stato necessario effettuare un intervento (bonifica o messa in sicurezza) per riportare le concentrazioni rilevate al di sotto dei valori soglia.

Alla data del 31 Dicembre 2019 il territorio nazionale conta 7.904 comuni, di questi:

- 3.742 comuni hanno sul proprio territorio almeno un procedimento di bonifica in corso;
- 3.607 comuni hanno sul proprio territorio almeno un procedimento di bonifica concluso;
- 5.171 comuni sono interessati da almeno un procedimento in corso o concluso;
- 2.733 comuni non sono mai stati interessati da procedimenti di bonifica.

Nelle Tabella 1.3 e Tabella 1.4 seguente si riportano i primi 20 comuni d'Italia per numero di procedimenti in corso e rappresenta, in estrema sintesi, il carico amministrativo di gestione delle procedure di bonifica afferenti al territorio.

Tabella 1.3: Primi 20 comuni per procedimenti in corso.

Comune	Provincia	Regione	Procedimenti in corso		
			Numero	Superfici (ha)	Numero siti con superficie
Milano	Milano	Lombardia	511	610	404
Roma	Roma	Lazio	343	0	0
Marcianise	Caserta	Campania	161	91	59
Napoli	Napoli	Campania	145	713	54
Torino	Torino	Piemonte	143	295	86
Solofra	Avellino	Campania	133	58	133
Massa	Massa Carrara	Toscana	128	452	128
Livorno	Livorno	Toscana	118	478	118
Genova	Genova	Liguria	118	182	51
Giugliano in Campania	Napoli	Campania	112	446	102
Caivano	Napoli	Campania	112	203	64
Civitanova Marche	Macerata	Marche	111	0	0
Firenze	Firenze	Toscana	102	132	102
Nola	Napoli	Campania	95	152	70
Castellammare di Stabia	Napoli	Campania	89	109	76
Carrara	Massa Carrara	Toscana	83	313	83
Gela	Caltanissetta	Sicilia	82	11	2
Caserta	Caserta	Campania	77	168	56
Pomigliano d'Arco	Napoli	Campania	69	297	53
Scafati	Salerno	Campania	69	65	67

Tabella 1.4: Primi 20 comuni per numero di procedimenti conclusi.

Comune	Provincia	Regione	Numero di procedimenti conclusi			
			totale	con intervento	senza intervento	informazione non disponibile
Milano	Milano	Lombardia	1.770	807	963	0
Civitanova Marche	Macerata	Marche	221	0	221	0
Firenze	Firenze	Toscana	202	65	137	0
Genova	Genova	Liguria	157	32	102	23
San Giorgio di Nogaro	Udine	Friuli Venezia Giulia	128	4	124	0
Torino	Torino	Piemonte	116	19	97	0
Venezia	Venezia	Veneto	115	37	78	0
Monza	Monza e della Brianza	Lombardia	113	37	76	0
Trieste	Trieste	Friuli-Venezia Giulia	113	5	108	0
Busto Arsizio	Varese	Lombardia	108	33	75	0
Padova	Padova	Veneto	96	80	16	0
Pisa	Pisa	Toscana	93	25	68	0
Brescia	Brescia	Lombardia	91	26	65	0
Cremona	Cremona	Lombardia	87	8	79	0
Bergamo	Bergamo	Lombardia	85	34	51	0
Ravenna	Ravenna	Emilia-Romagna	84	46	38	0
Como	Como	Lombardia	82	22	60	0
Legnano	Milano	Lombardia	81	24	57	0
Trento	Trento	Trentino-Alto Adige	80	21	59	0
Cologno Monzese	Milano	Lombardia	79	31	48	0

Il comune di Milano è il comune d'Italia con più procedimenti in corso e, anche conclusi.

Tra i primi venti comuni compaiono anche Roma, Torino, Genova, Firenze, Venezia. Si pone l'attenzione sul fatto che parte del territorio di molti dei comuni in tabella ricade in Siti di Interesse Nazionale (SIN) che sono stati oggetto di deperimetrazione.

## 1.2 Siti di Interesse Nazionale (SIN)

Si aggiungono ai siti inquinati a livello regionale quelli la cui contaminazione è di interesse nazionale, Siti di Interesse Nazionale (SIN), descritti nell'Annuario dei dati ambientali ISPRA.

La superficie complessiva terrestre dei SIN è pari a 1.721 km<sup>2</sup> (Figura 2.1) e rappresenta lo 0,57% della superficie del territorio italiano.

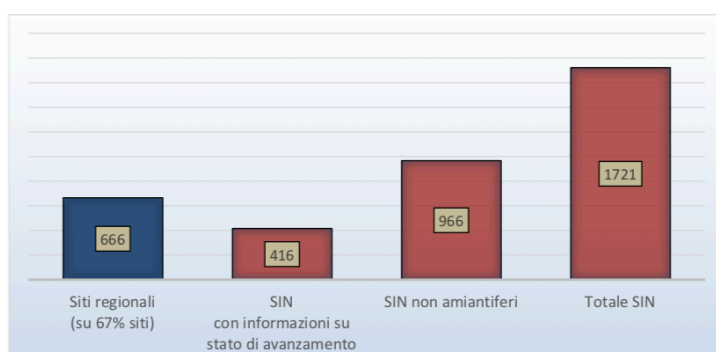


Figura 1.8: Superfici in km<sup>2</sup> dei procedimenti di bonifica regionali (in azzurro) e dei siti interesse nazionale (SIN in rosso).

Esistono SIN caratterizzati da una contaminazione prevalente specifica per esempio da amianto o fluoroedenite e, pertanto, interessati da specifiche tipologie di interventi che riguardano la messa in sicurezza di tali materiali.

*I siti d'interesse nazionale, ai fini della bonifica, sono individuabili in relazione alle caratteristiche del sito, alle quantità e pericolosità degli inquinanti presenti, al rilievo dell'impatto sull'ambiente circostante in termini di rischio sanitario ed ecologico, nonché di pregiudizio per i beni culturali ed ambientali. (Art. 252, comma 1 del D.Lgs. 152/06 e ss.mm.ii.).*

I siti d'interesse nazionale sono stati individuati con norme di varia natura e di regola sono stati perimetrati mediante decreto del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), d'intesa con le regioni interessate.

La procedura di bonifica dei SIN è attribuita alla competenza del MATTM che si avvale per l'istruttoria tecnica del Sistema nazionale a rete per la Protezione

dell'Ambiente (SNPA) e dell'Istituto Superiore di Sanità (ISS), nonché di altri soggetti qualificati pubblici o privati.

L'art. 36-bis della Legge 07 agosto 2012 n. 134 ha apportato alcune modifiche ai criteri di individuazione dei SIN (art. 252 del D.Lgs. 152/06 e ss.mm.ii.): è stata effettuata una ricognizione degli allora 57 siti classificati di interesse nazionale e, con il D.M. 11 gennaio 2013, il numero dei SIN è stato ridotto a 39, attualmente sono 42 (Figura 2.2-2.3).

La competenza amministrativa sui siti che non soddisfacevano i nuovi criteri è passata alle rispettive Regioni.

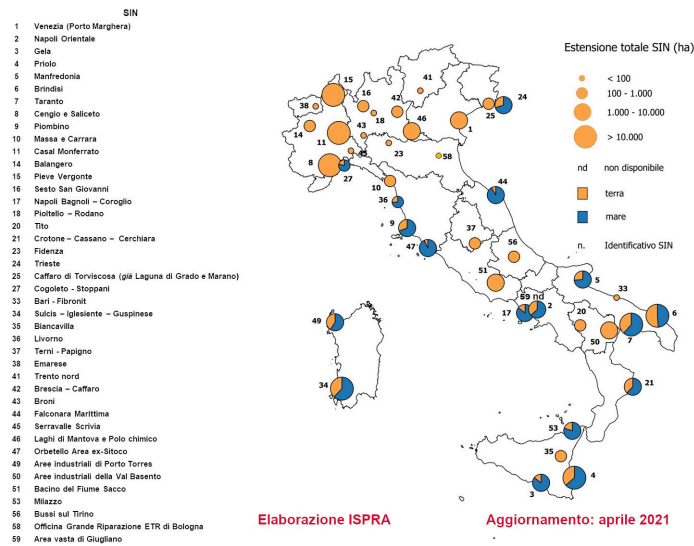


Figura 1.9: Estensione di tutti e 59 SIN (attualmente 42).

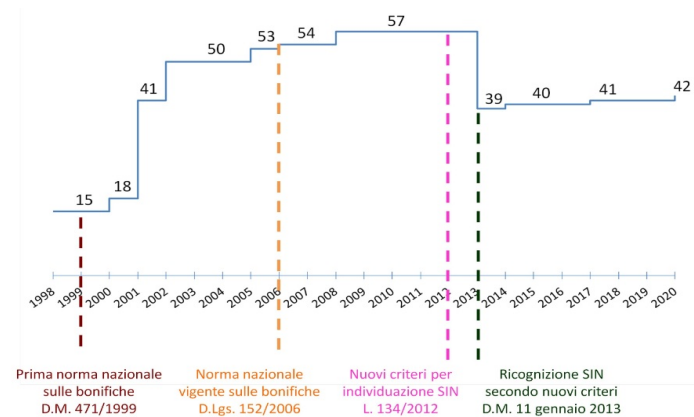


Figura 1.10: Avanzamento nell'individuazione dei SIN ed evoluzione del quadro normativo.



### 1.3 Il contesto legislativo

La Legge 28 giugno 2016, n.132 ha istituito il Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA), che ha tra i suoi obiettivi principali quello di assicurare omogeneità ed efficacia dell'azione conoscitiva ambientale, così come quello di produrre, promuovere e diffondere i dati tecnico-scientifici e le conoscenze ufficiali sullo stato dell'ambiente e sulla sua evoluzione, sulle fonti e sui fattori di inquinamento, sulle pressioni ambientali, sui relativi impatti e sui rischi naturali e ambientali e la loro trasmissione sistematica ai diversi livelli istituzionali preposti al governo delle materie ambientali e diffusione al pubblico dell'informazione ambientale.

Nel 2016 SNPA ha quindi attivato la Rete dei Referenti sui Siti Contaminati con l'obiettivo di costruire una struttura condivisa dei dati relativi alle procedure di bonifica che, a prescindere da struttura e contenuti delle singole anagrafi, consentisse di costruire un quadro completo a livello nazionale (Araneo F., Bartolucci E.,2021; Lo stato delle bonifiche dei siti contaminati in Italia: i dati regionali - Edizione 2021. ISPRA, Rapporti 337/21).

L'ISPRA, insieme alle 21 Agenzie Regionali (ARPA) e Provinciali (APPA) per la protezione dell'ambiente, a partire dal 14 gennaio 2017 fa parte di SNPA.

La legislazione nazionale in materia di bonifica dei siti contaminati, introdotta con il D.M. 471/99, è stata profondamente modificata dal *D.Lgs. 152/2006* e ss.mm.ii. "Norme in materia ambientale" che, alla Parte Quarta, Titolo V "Bonifica di siti contaminati", *disciplina gli interventi di bonifica e ripristino ambientale dei siti contaminati e definisce le procedure, i criteri e le modalità per lo svolgimento delle operazioni necessarie per l'eliminazione delle sorgenti dell'inquinamento e comunque per la riduzione delle concentrazioni di sostanze inquinanti, in armonia con i principi e le norme comunitari, con particolare riferimento al principio "chi inquina paga".*

Un sito si definisce contaminato quando viene registrato il superamento delle concentrazioni soglia di rischio di cui al D.Lgs. 152/06 e ss.mmii. oppure quando viene registrato il superamento delle concentrazioni soglia di contaminazione che ne

comporta la diretta attribuzione di sito contaminato senza il passaggio all'analisi di rischio.

In accordo alla normativa, l'avvio di un procedimento di bonifica è legato al verificarsi di un evento potenzialmente in grado di contaminare un sito o al rinvenimento di una contaminazione storica.

Una volta effettuate le indagini preliminari e, qualora necessaria, la caratterizzazione, il sito viene dichiarato non contaminato se non sono registrati superamenti delle CSC, o potenzialmente contaminato nel caso si sia verificato il superamento delle CSC anche per un solo parametro.

I siti non contaminati escono dalla procedura senza alcuna necessità di ulteriori interventi, mentre per i siti potenzialmente contaminati che hanno concluso la fase di caratterizzazione è applicata la procedura di analisi del rischio sito-specifica per la determinazione delle concentrazioni soglia di rischio.

Qualora accertato il superamento delle CSR il sito è dichiarato contaminato e deve essere presentato, approvato ed eseguito un intervento di bonifica o messa in sicurezza che consenta di minimizzare e/o di ricondurre ad accettabilità il rischio derivante dallo stato di contaminazione presente.

Per alcuni casi particolari, riconducibili a specifiche tipologie di siti tra cui i punti vendita carburante, siti di ridotte dimensioni, contaminazione relativa alla sola matrice suolo-sottosuolo, sono state definite delle procedure "semplificate" che, in taluni casi, prevedono la possibilità di effettuare interventi di bonifica del suolo volti al raggiungimento di concentrazioni inferiori o uguali ai valori di concentrazione soglia di contaminazione senza effettuare l'analisi di rischio.

L'esistenza di un procedimento di bonifica non implica necessariamente un intervento di bonifica perché il procedimento di bonifica può chiudersi anche senza necessità di intervento sul sito.

Per la gestione dei siti accertati come contaminati sono previsti dalla normativa interventi di:

- messa in sicurezza operativa (MISO): interventi eseguiti in un sito con attività in esercizio atti a garantire un adeguato livello di sicurezza per le persone e per l'ambiente, in attesa di ulteriori interventi di messa in sicurezza permanente o bonifica da realizzarsi alla cessazione dell'attività; comprende inoltre gli interventi di contenimento della contaminazione da mettere in atto in via transitoria fino all'esecuzione della bonifica o della messa in sicurezza permanente, al fine di evitare la diffusione della contaminazione all'interno della stessa matrice o tra matrici differenti;
- messa in sicurezza permanente (MISP): interventi atti a isolare in modo definitivo le fonti inquinanti rispetto alle matrici ambientali circostanti e a garantire un elevato e definitivo livello di sicurezza per le persone e per l'ambiente; in tali casi devono essere previsti piani di monitoraggio e controllo e limitazioni d'uso rispetto alle previsioni degli strumenti urbanistici;
- bonifica: interventi atti ad eliminare le fonti di inquinamento e le sostanze inquinanti o a ridurre le concentrazioni delle stesse presenti nel suolo, nel sottosuolo e nelle acque sotterranee ad un livello uguale o inferiore ai valori al CSR o, nel caso delle acque sotterranee, il rispetto delle CSC

All'interno del D.Lgs. 152 del 2006, gli articoli che nello specifico trattano la gestione delle aree inquinate sono il 196 "*Competenze delle Regioni*", il 251 "*Censimento ed Anagrafe dei siti da bonificare*" ed il 252 "*Siti di Interesse Nazionale*".

L'Art. 196 del D. Lgs. 152/06 prevede, al comma 1 lettera c), che è di competenza delle Regioni l'elaborazione, l'approvazione e l'aggiornamento dei Piani per la bonifica di aree inquinate di propria competenza. Allo stesso comma, lettera h), viene previsto che è di competenza delle Regioni la redazione di Linee guida e di Criteri per la predisposizione e l'approvazione dei Progetti di bonifica e di Messa in sicurezza, nonché l'individuazione delle tipologie di progetti non soggetti ad autorizzazione, nel rispetto di quanto previsto all'articolo 195, comma 1, lettera r) dello stesso D. Lgs. 152/06. Al comma 2 è previsto che per l'esercizio delle funzioni di cui al comma 1 le Regioni si avvalgono anche delle Agenzie regionali per la protezione dell'ambiente.

L'Art. 251 prevede che le Regioni predispongono l'Anagrafe dei siti oggetto di bonifica sulla base dei criteri definiti da ISPRA.

L'anagrafe deve contenere le seguenti informazioni:

- Elenco dei siti sottoposti a bonifica e ripristino ambientale;
- Individuazione dei soggetti cui compete la bonifica;
- Enti pubblici di cui la Regione intende avvalersi, in caso di inadempienza dei soggetti obbligati, ai fine dell'esecuzione d'ufficio della bonifica,

L'Art.252 interviene sulla definizione dei Siti di Interesse Nazionale. Viene previsto che all'individuazione di questi si provvede con decreto del Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare d'intesa con le Regioni interessate, secondo i seguenti principi:

- a) gli interventi di bonifica devono riguardare aree e territori, compresi i corpi idrici, di particolare pregio ambientale;
- b) la bonifica deve riguardare aree e territori tutelati ai sensi del D. Lgs. 42/04;
- c) il rischio sanitario ed ambientale che deriva dal rilevato superamento delle concentrazioni soglia di rischio deve risultare particolarmente elevato in ragione della densità della popolazione o dell'estensione dell'area interessata;
- d) l'impatto socio-economico causato dall'inquinamento dell'area deve essere rilevante
- e) la contaminazione deve costituire un rischio per i beni di interesse storico e culturale di rilevanza nazionale;
- f) gli interventi da attuare devono riguardare siti compresi nel territorio di più Regioni.

La procedura di bonifica di cui all'articolo 242 dei siti di interesse nazionale è attribuita alla competenza del Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare (MATTM), sentito il Ministero delle attività produttive.

Il MATTM può avvalersi anche di ISPRA, ARPA, e dell'Istituto Superiore di Sanità nonché di altri soggetti qualificati pubblici o privati.

L'ISPRA, in quanto organo di supporto tecnico ha tra le sue attività istituzionali il compito di redigere e aggiornare, anche in collaborazione con altri enti e istituti coinvolti, le linee guida per le attività di caratterizzazione e bonifica dei siti contaminati.

La caratterizzazione ambientale di un sito è identificabile con l'insieme delle attività che permettono di ricostruire i fenomeni di contaminazione a carico delle matrici ambientali, in modo da ottenere informazioni di base su cui prendere decisioni realizzabili e sostenibili per la messa in sicurezza e/o bonifica del sito (Allegato 2 al Titolo V, Parte Quarta del D.Lgs. 152/06 e ss.mm.ii.)

L'analisi di rischio sanitario-ambientale è attualmente lo strumento più avanzato di supporto alle decisioni nella gestione dei siti contaminati che consente di valutare, in via quantitativa, i rischi per la salute umana connessi alla presenza di inquinanti nelle matrici ambientali.

Il punto di partenza per l'applicazione dell'analisi di rischio è lo sviluppo del Modello Concettuale del Sito (MCS), basato sull'individuazione e parametrizzazione dei 3 elementi principali:

1. Sorgente di contaminazione;
2. Percorsi di migrazione degli inquinanti attraverso le matrici ambientali;
3. Bersagli o recettori della contaminazione nel sito o nel suo intorno.

Si può determinare un rischio per la salute umana unicamente nel caso in cui, in un dato sito, i 3 elementi siano presenti e collegati tra loro.

Il calcolo del rischio così come codificato dalla National Academy of Science (NAS, 1983) e come mostrato in Figura 3.1, segue quattro fasi:

1. Raccolta dati e identificazione del pericolo;
2. Valutazione tossicologica;
3. Valutazione dell'esposizione;
4. Caratterizzazione e stima del rischio.



Figura 1.11: Fasi per il calcolo del rischio proposto dalla National Academy of Science (ISPRA).

Il rischio stimato viene confrontato con i criteri di accettabilità definiti dalla normativa vigente.

L'analisi di rischio può essere applicata come sopra descritto in modo diretto (*forward*) stimando il rischio associato allo stato di contaminazione rilevato nel sito; oppure in modo inverso (*backward*), a partire dai criteri di accettabilità del rischio, per la determinazione dei livelli di contaminazione accettabili e degli obiettivi di bonifica per il sito in esame.

Nell'ambito dei procedimenti di bonifica dei siti contaminati esistono diverse applicazioni software, prodotte a livello nazionale ed internazionale, che consentono il calcolo delle CSR, ai sensi dell'Allegato 1, Parte IV, Titolo V del D.Lgs 152/06 e ss.m.ii.

Gli Enti di Controllo, ISPRA, ARPA, SNPA e Istituto Superiore di Sanità, verificano i risultati delle simulazioni, valutando, tra l'altro, se gli stessi siano conformi alla normativa vigente e se rispondano agli indirizzi tecnici dei documenti di riferimento (Manuali e Linee Guida) emanati sia dal MATTM sia da SNPA sia da altri Enti (es. Istituto Superiore di Sanità e l'Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni, INAIL).

## 1.4 Tipologie di interventi su suoli contaminati

Le tecniche di recupero ambientale sono varie e differenti in base alla tipologia della matrice su bisogna operare (suolo saturo, suolo insaturo o sedimenti) ed in base alla tipologia di contaminante.

I contaminanti possono essere di tipo organico, se degradabili o inorganico, ossia sostanze non degradabili ma di cui si può modificare la speciazione allo scopo di renderli meno mobili quindi più stabili e meno biodisponibili.

Le strategie di intervento in caso di suoli o sedimenti contaminati possono essere raggruppate in tre macro categorie:

- Recupero Naturale monitorato;
- Tecnologie di messa in sicurezza (MISE);
- Tecnologie di bonifica.

### ***Recupero Naturale Monitorato***

Il termine Recupero Naturale Monitorato (MNR) definisce la progressiva riduzione di uno stato di contaminazione ad opera dei processi chimici, fisici e biologici che naturalmente si verificano nell'ambiente.

Esperienze in campo hanno evidenziato, in alcune situazioni favorevoli, l'efficacia di tali meccanismi, che comprendono erosione, diffusione, bioturbazione, advezione, volatilizzazione (per i sedimenti anche diluizione, dispersione e sedimentazione), nell'indurre, in tempi ragionevoli e senza intervento antropico, una riduzione progressiva di massa, tossicità o mobilità delle sostanze inquinanti (Wiedermeir *et al.*, 1998; USEPA, 1999).

In tali circostanze il ricorso alla capacità intrinseca di risanamento del sottosuolo, con un monitoraggio a lungo termine che ne documenti efficienza, può configurarsi a tutti gli effetti come un intervento di bonifica.

Il recupero naturale monitorato viene effettuato nel caso in cui la contaminazione è considerata tollerabile, ossia quando si è in presenza di un rischio basso.

Il concetto alla base del MNR è che la quantità di inquinanti rilasciati dalla sorgente possa essere compensata dai processi che avvengono nell'ambiente portando o alla rimozione degli inquinanti o all'impedimento di un'ulteriore migrazione.

La velocità ed il grado con cui si verificano i processi biologici, chimici e fisici sono funzione del tipo di sostanza e delle condizioni idrogeologiche e geochemiche del sito. Tutte le sostanze antropiche rilasciate nell'ambiente sono soggette a fenomeni di attenuazione naturale; l'effetto di questi processi e efficacia nell'attivazione della contaminazione risulta ampiamente variabile per le diverse sostanze per differenti contesti idrogeologici (Rifai *et al.*, 1995).

In generale, i contaminanti inorganici possono essere unicamente trasformati in forme che presentano minor mobilità, tossicità o biodisponibilità attraverso processi non distruttivi, di natura abiotica o mediati biologicamente, mentre nel caso di contaminazione da sostanze organiche, i processi distruttivi di biodegradazione possono assumere un ruolo preponderante rispetto agli altri processi di attenuazione (Roling *et al.*, 2002; NRC, 2000).

La scelta dell'applicabilità o meno del MNR non può prescindere, come del resto per ogni altra tecnologia di bonifica, dall'analisi dei principali vantaggi e delle limitazioni che ne possono derivare.

Gli aspetti positivi sono legati all'assenza di operazioni di scavo e trasporto di materiali, alla ridotta interferenza con le attività e le infrastrutture presenti in superficie e al possibile abbattimento dei costi di intervento.

Le limitazioni spesso sono da collegare alla scarsa comprensione dei processi di trasformazione degli inquinanti, alla tempistica e soprattutto alle condizioni del sottosuolo.



Tabella 1.5: Elenco meccanismi di MNR.

Erosione	Azione fisica disagregatrice e asportatrice esercitata sulla parte emersa della superficie terrestre dagli agenti naturali in movimento.
Diffusione	Allargamento del fronte di contaminazione legato ai fenomeni di diffusione molecolare promossi dai gradienti di concentrazione. Matematicamente descritta attraverso le leggi di Fick.
Bioturbazione	Processi biologici, chimici e fisici conseguenti all'azione di organismi possono portare all'alterazione, alla deformazione e alla distruzione di strutture inorganiche dei sedimenti stessi, fino all'omogeneizzazione completa.
Advezione	Meccanismo più rilevante nel trasporto degli inquinanti nel saturo. Movimento di soluti per effetto del moto delle acque di falda. La velocità di immigrazione per advezione dipende dalle proprietà dell'acquifero, soprattutto conducibilità idraulica, porosità effettiva e gradiente idraulico, mentre sono ininfluenti le caratteristiche del contaminante.
Volatilizzazione	Trasferimento di inquinanti dalla fase acquosa alla fase vapore (gas interstiziale). Dipende dalla tensione di vapore e dalla costante di Henry delle sostanze. Rimuove parte dei contaminanti in fase acquosa trasferendo nei gas interstiziali.
Diluizione	L'afflusso di acque nel sottosuolo, per effetto delle precipitazioni atmosferiche, di infiltrazioni da corpi d'acqua superficiali o sistemi acquiferi confinati, comporta una riduzione delle concentrazioni d'inquinanti. Causa la diluizione del contaminante nel plume e può fornire nuovi accettori di elettroni, specialmente O <sub>2</sub> disciolto.
Dispersione	Miscelazione dei fluidi dovuta all'interazione fra il movimento advettivo della struttura del mezzo poroso in cui si sviluppa. Dipende dalle proprietà dell'acquifero e dalla scala di studio del fenomeno, ma non da quelle dei contaminanti. Produce allargamenti in direzione longitudinale, trasversale e verticale del pennacchio di contaminazione e riduzioni della concentrazione dei soluti.
Sedimentazione	Metodo di separazione delle fasi sfruttando la forza di gravità. Risulta tanto più efficace quanto maggiore è la densità delle particelle in sospensione rispetto a quella del liquido che fa da solvente. Un altro parametro che influisce sulla decantazione è la dimensione delle particelle sospese. Più sono piccole meno la decantazione risulta efficace.
Biodegradazione/Trasformazioni mediante microorganismi	Reazioni di ossido riduzione in condizioni aerobiche e/o anaerobiche mediate da microrganismi in cui le sostanze contaminanti fungono da substrato o reagente. In genere comporta nette riduzioni della massa di inquinante. Nel caso degli inorganici può comportare una variazione dello stato di ossidazione con modifiche delle caratteristiche di mobilità della sostanza.

### ***Tecnologie di Messa in Sicurezza***

Le tecnologie di messa in sicurezza sono utilizzate per prevenire la dispersione della contaminazione senza necessariamente giungere alla degradazione e/o alla trasformazione o all'estrazione di contaminanti stessi.

Si ricorre a sistemi statici o, se si parla di suoli saturi, a sistemi dinamici.

- Sistemi statici: INCAPSULAMENTO
- Confinamento ed isolamento dell'area contaminata ad opera di strutture inerti, solitamente cemento, che non permettono i processi di diffusione del contaminante il quale, altrimenti, spontaneamente tenderebbe a muoversi da una zona ad alta concentrazione ad una a più bassa concentrazione (Figura 1.12).

Il processo prevede una prima fase di stabilizzazione in cui i composti inquinanti vengono trasformati, mediante reazioni chimiche, in composti poco solubili ed una seconda fase di solidificazione in cui i composti tossici vengono intrappolati in un ammasso con caratteristiche meccaniche di solidità.

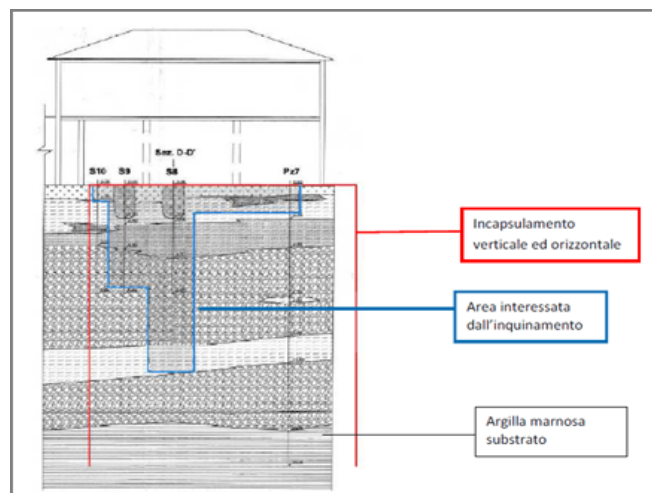


Figura 1.12: Schema di incapsulamento.

- Sistemi dinamici: BARRIERE IDRAULICHE

È il più antico sistema di intervento sulle acque sotterranee contaminate, ma anche quello ancora più utilizzato.

È costituito dalla creazione di una barriera idraulica mediante trincee o pozzi (Figura 1.13).

Una barriera idraulica provoca l'interruzione della migrazione a valle del pennacchio inquinante e il prelievo di sostanze contaminanti dal sottosuolo per essere poi sottoposte a trattamento prima dello scarico (pump and treat).

La realizzazione di una barriera idraulica costituisce un intervento che presenta alcuni vantaggi tra cui la rapida messa in opera e la notevole profondità operativa.

La tecnologia di intervento è ormai consolidata ma presenta problemi di ottimizzazione dal punto di vista tecnico-economico in relazione alle differenti situazioni idrogeologiche, alle caratteristiche di eterogeneità dell'acquifero, alla tipologia di contaminanti, all'uso delle acque e alla presenza di vincoli antropici.

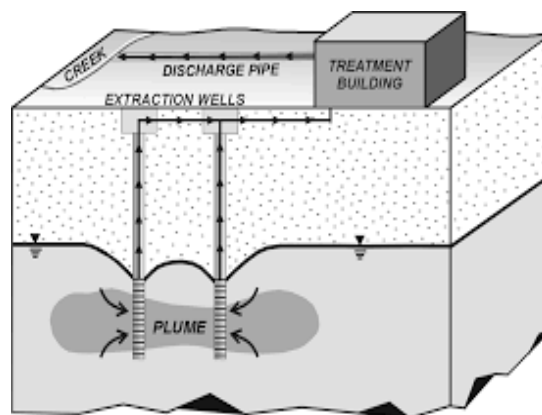


Figura 1.13: Schema di una barriera idraulica.

### ***Tecnologie di Bonifica***

Le tecnologie di intervento sui siti contaminati possono essere classificate in vari modi, con riferimento agli obiettivi principali (contenimento o trattamento), ai processi utilizzati per l'intervento (fisico, chimico, biologico, termico) o alla localizzazione del processo (in situ o ex situ).

I processi in situ avvengono senza escavazione ed asportazione della matrice mentre i processi ex situ prevedono escavazione della matrice con possibilità di trattamento sul luogo della contaminazione (on site) oppure in un sito alternativo (ex site).

I trattamenti ex site possono non essere sostenibili a causa del costo dei trasporti ed alla possibilità di contaminare un'area non contaminata.

I processi termici devono essere considerati come ultima possibilità di trattamento, ossia devono essere messi in atto solo quando processi biologici, fisici e chimici non sortiscono effetto sui contaminanti, perché, a causa delle alte temperature raggiunte, non sono compatibili con la sostenibilità ecologica.

Le tecnologie di bonifica possono essere classificate anche in base alla loro azione sui contaminanti (Tabella 4.2):

- **Trasformazione:** Processi di degradazione che si configurano ottimali in presenza di contaminanti organici degradabili;
- **Separazione:** Processi di trasferimento di materia utilizzabili in presenza di contaminanti organici non degradabili o di composti inorganici;
- **Immobilizzazione:** Processi che non rimuovono il contaminante ma fanno sì che i metalli o le sostanze inorganiche non si possano diffondere.

Tabella 1.6: Principali tecnologie di bonifica e loro classificazione.

<u>SEPARAZIONE</u>		<u>TRASFORMAZIONE</u>		<u>IMMOBILIZZAZIONE</u>	
In situ	Ex situ	In situ	Ex situ	In situ	Ex situ
SOIL WASHING	FLUSHING	TRATTAMENTI CHIMICI	BARRIERE REATTIVE	SOLIDIFICAZIONE	
ESTRAZIONE CON SOLVENTE	SOIL VAPOUR EXTRACTION (SVE)	INCENERIMENTO	OSSIDAZIONE CHIMICA	STABILIZZAZIONE	
DESORBIMENTO TERMICO	AIR SPARGING (AS)	<u>TRASFORMAZIONE BIOLOGICA</u>		VETRIFICAZIONE	
		BIOREATTORI SLURRY	RECUPERO NATURALE MONITORATO		
		LANDFARMING	BIOVENTING		
		BIOPILE	BIOSPARGING		
			BARRIERE REATTIVE		

L'applicabilità delle diverse tecnologie di bonifica va valutata in funzione di una serie di parametri: la tipologia degli inquinanti, la concentrazione e la distribuzione spaziale ed anche le caratteristiche della matrice, i volumi di terreno coinvolti, l'uso, le dimensioni e la collocazione delle aree su cui intervenire, sia, infine, le condizioni operative degli impianti deputati al risanamento, ai costi ad esso connessi e all'impatto sull'ambiente circostante.

Le indicazioni del DM 471/99 stabiliscono alcuni criteri generali: privilegiare le tecniche che riducono permanentemente e significativamente la concentrazione nelle diverse matrici ambientali, gli effetti tossici e la mobilità delle sostanze inquinanti; preferire gli interventi atti a trattare e riutilizzare il suolo nel sito, mediante trattamenti in situ o on site, riducendo la movimentazione del materiale e conseguentemente i rischi derivanti dal trasporto e dalla messa in discarica di terreno inquinato; evitare ogni rischio aggiuntivo (rispetto a quello esistente) di inquinamento dell'aria, delle

acque sotterranee e superficiali, del suolo e del sottosuolo, nonché ogni inconveniente derivante da rumori e odori; evitare rischi igienico-sanitari per la popolazione durante lo svolgimento degli interventi ed operare la scelta delle tecnologie anche sulla base di aspetti economici, che devono comprendere i costi di gestione a lungo termine connessi alle eventuali misure di sicurezza e ai relativi controlli e monitoraggi.

La normativa privilegia le tecniche atte a eliminare gli inquinanti nel mezzo fisico entro cui si trovano, senza trasferimenti ad altra matrice.

I sistemi che meglio rispondono a tali requisiti, ove la natura della contaminazione lo consente, sono quelli di natura biologica dato che le tecniche di natura chimico-fisica e termica si basano in genere sull'allontanamento di inquinanti dal suolo, ma non sulla loro definitiva eliminazione.

Spesso, però, i processi biologici richiedono lunghi tempi di recupero e non sempre consentono il concreto conseguimento di concentrazioni residue allineate ai limiti normativi.

## Capitolo 2

### DESORBIMENTO TERMICO

I trattamenti di desorbimento termico sono processi in situ o ex situ che consentono di bonificare matrici solide (terreni, fanghi, sedimenti) contaminate da sostanze che passano in fase vapore a temperature relativamente basse.

Si utilizza, generalmente, su contaminanti di natura organica come idrocarburi policiclici aromatici (IPA), policlorobifenili (PCB), pesticidi, benzene, toluene, etilbenzene e xilene (BTEX), solventi alogenati ma anche metalli pesanti volatili (Mercurio, Cadmio e Arsenico).

Nei processi di desorbimento termico si sottopone la matrice contaminata ad un riscaldamento (diretto o indiretto) così da provocare la vaporizzazione delle sostanze inquinanti.

I contaminanti, passati in fase gassosa, vengono recuperati mediante pozzi di estrazione con tecnologia *Soil Vapour Extraction* (SVE), e dovranno essere successivamente sottoposta a idonei trattamenti di decontaminazione.

La SVE è una tecnica di bonifica adatta per il trattamento dei composti organici volatili e semi-volatili in terreni omogenei e a tessitura medio-grossolana con permeabilità medio-alta, in corrispondenza della zona insatura.

La tecnologia SVE (Figura 2.1) si basa dunque sull'estrazione ed il recupero dell'aria interstiziale del sottosuolo attraverso l'applicazione di una depressione nella zona insatura del terreno.

La depressione indotta favorisce, oltre che la rimozione della frazione più volatile degli idrocarburi, anche il richiamo di aria dall'esterno con conseguente ossigenazione dello strato di terreno insaturo.

Il processo di decontaminazione della matrice solida del terreno sfrutta quindi due proprietà tipiche dei composti idrocarburi: volatilità e biodegradabilità.

Le temperature di trattamento del processo di desorbimento termico sono variabili, ma generalmente comprese tra 90° e 650°C; in queste condizioni è possibile avere parziale decomposizione (pirolisi/ossidazione) della sostanza organica desorbita e non completa distruzione (USEPA, 1992; USEPA 1998).

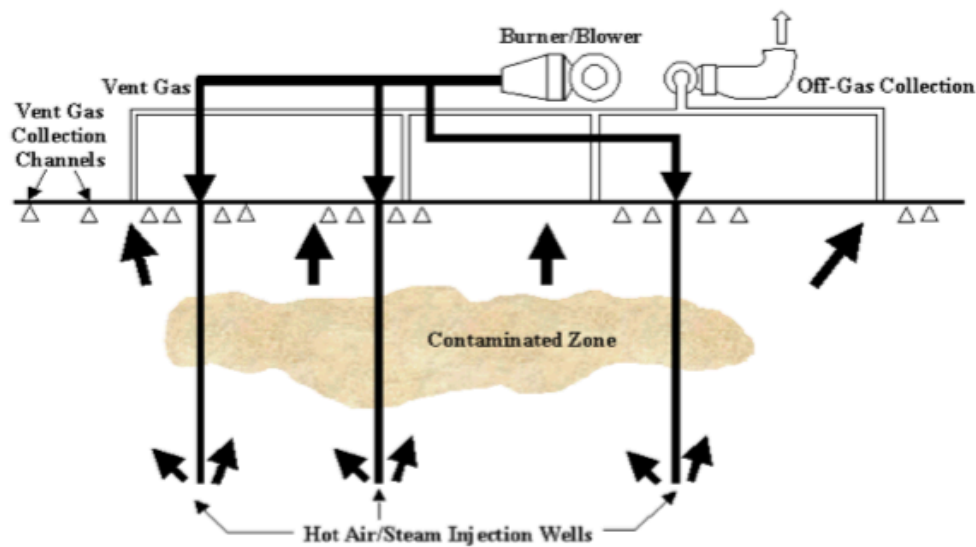


Figura 2.1: Schema di Trattamento termico in situ (Fonte: FRTR, EPA).

Trattamenti operanti a più alte temperature ( $>1000^{\circ}\text{C}$ ) comportano una simultanea distruzione dell'inquinante e vengono generalmente classificati quali trattamenti di termodistruzione.

In tutti i sistemi di desorbimento termico è necessaria la fase di post-trattamento dei residui delle emissioni gassose.

I gas in uscita dall'unità di desorbimento contengono particolato, metalli ed eventuali sottoprodotti/prodotti di reazione e gas acidi.

I sistemi di controllo delle emissioni possono essere divisi in sistemi a recupero e in sistemi a distruzione.

La scelta del tipo di sistema dipende dalla concentrazione dei contaminanti nel materiale in alimentazione, dai requisiti normativi per le emissioni e da considerazioni di tipo economico (USEPA, 1998; Andreottola *et al.*, 2000; USEPA, 1997).



Tabella 2.1: Efficacia del desorbimento termico per diverse matrici in funzione del tipo di contaminante.

	Alogenati volatili	Alogenati semivolatili	Non alogenati volatili	Non alogenati semivolatili	PCB	Pesticidi	Diossine/Furani	Cianuri organici	Metalli volatili (Hg)	Metalli volatili (escluso Hg)	Metalli non volatili	Amianto	Materiali radioattivi	Corrosivi inorganici	Cianuri inorganici
	Organici									Inorganici					
Terreno	■	■	■	■	■	■	▲	■	■	□	□	□	□	□	□
Fango	■	■	■	■	■	▲	▲	■	▲	□	□	□	□	□	□
Sedimento	▲	▲	▲	▲	■	▲	▲	■	■	□	□	□	□	□	□

■: Efficacia dimostrata (prove di trattabilità eseguite con successo a diverse scale); ▲: Efficacia potenziale;  
□: Nessuna efficacia.

La rimozione del particolato dai gas aspirati con SVE avviene mediante cicloni, filtri a maniche e *scrubber* a umido.

Il particolato rimosso potrebbe non essere totalmente decontaminato e necessitare quindi di ulteriori trattamenti.

I contaminanti veicolati ai gas possono essere distrutti in un'unità di post-combustione tramite ossidazione termica o catalitica (sistemi a distruzione), oppure separati tramite un sistema a carboni attivi o recuperati attraverso un'unità di condensazione (sistemi a recupero).

Solitamente i desorbitori termici non generano quantità rilevanti di gas acidi; tuttavia nel trattamento mediante ossidazione termica di gas contenenti cloro e/o zolfo si producono acido cloridrico (HCl) ed anidride solforosa (SO<sub>2</sub>), che devono essere rimossi dal gas per evitare corrosione dei materiali di cui è composta l'attrezzatura.

La neutralizzazione dei gas acidi può essere effettuata con *scrubber* a umido, le cui acque e fanghi devono essere sottoposti ad ulteriore trattamento.

I residui del sistema di controllo delle emissioni sono rifiuti secondari, generati nel corso del processo.

Il tipo di trattamento adatto a questi residui dipende dal tipo di sistema di controllo delle emissioni adoperato.

Tutti i sistemi richiedono il trattamento di acqua, particolato e/o fanghi derivanti dal trattamento degli effluenti gassosi.

Nel caso di contaminazione da composti aromatici clorurati è plausibile che la matrice contenga anche diossine o furani che verranno rimossi nel trattamento di desorbimento; pertanto il sistema di trattamento delle emissioni gassose deve essere in grado di trattare anche questa tipologia di inquinanti.

## 2.1 Il Desorbimento Termico in letteratura

Esistono numerosi articoli di letteratura scientifica che trattano studi riguardanti applicazioni di desorbimento termico sia in laboratorio che su piena scala, in tutto il Mondo.

Si evidenzia che, in tutti gli studi che vengono riportati in seguito, i contaminanti inizialmente presenti nella matrice, per la maggior parte di origine petrolifera, superano le concentrazioni definite dalla normativa.

L'efficacia del recupero varia in relazione alla tipologia di contaminante e della composizione della matrice posta a bonifica (sabbia, ghiaia, argilla): per mercurio e arsenico l'efficacia si attesta tra il 24% e 76% ed il 5.5% e 77.3%, rispettivamente, mentre, per gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) l'efficacia è tra il 77% ed il 99%. In letteratura sono presenti esperimenti in cui il calore necessario al desorbimento termico ha differente origine e, talvolta, è affiancato ad ulteriori tecnologie allo scopo di aumentarne l'efficienza.

Il trattamento termico è in grado di rimuovere efficacemente i volatili inquinanti ma altera anche la speciazione del carbonio organico (C) e i comportamenti degli inquinanti residui nei suoli contaminati.

È stata esaminata la distribuzione e la bioaccessibilità degli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) nei suoli interessati da trattamento termico (temperatura compresa tra 105 e 650 ° C) utilizzando la microspettroscopia a infrarossi a base di sincrotrone e l'estrazione di n-butanolo, un blando solvente estraente, che ha permesso un'efficacia del recupero del 90% (*Cheng et al., 2021*).

Il recente studio condotto da *Leontari et al.*, presso l'Università di Creta, Grecia, ha valutato la potenzialità di riutilizzo del suolo contaminato come fonte alternativa per

la produzione di materiali da costruzione mediante geopolimerizzazione: il suolo è stato bonificato mediante desorbimento termico con lo scopo di rimuovere gli inquinanti organici (idrocarburi petroliferi totali, TPH e idrocarburi aromatici policiclici, IPA) ed il terreno trattato, che presentava la massima eliminazione di TPH e IPA, è stato utilizzato per la formazione di malte geopolimeriche con l'obiettivo di stabilizzare i metalli tossici e produrre un possibile materiale redditizio. I risultati hanno mostrato che il geopolimero ha un contenuto trascurabile di inquinanti organici e i metalli tossici sono stati immobilizzati dando così significativi vantaggi di riciclaggio.

La valorizzazione dei residui industriali per la produzione di materiali da costruzione è una soluzione promettente per la gestione sostenibile dei rifiuti (*Leontari et al, 2021*).

Si è voluto studiare gli effetti di inquinanti in tre paesaggi molto differenti: l'ecosistema artico senza alberi permafrost, la foresta boreale e i prati a clima bosco-temperato.

Gli effetti termici applicati sperimentalmente per il desorbimento dei contaminanti petroliferi dal suolo hanno permesso di trovare un regime ottimale: la temperatura di trattamento da 25 a 250° C riduce le concentrazioni ad un valore accettabile e, al tempo stesso, risultano rispettose per l'ambiente.

I risultati suggeriscono la soluzione per una bonifica che sia in grado di preservare la fertilità del suolo in ambienti con climi temperati e resilienti ma anche freddi e fragili (*Bykova et al., 2021*).

Uno studio recente, tutto italiano, condotto da *Bianco et al.* nel 2020, ha proposto un confronto tra diverse tecnologie ex situ: biorisanamento anaerobico, lavaggio del suolo e desorbimento termico, tutte finalizzate alla rimozione di idrocarburi policiclici aromatici dai sedimenti marini.

Lo studio vuole esaminare e confrontare le tecniche in termini di prestazioni, costi e bilancio energetico.

Dopo 42 giorni di biorisanamento anaerobico, la più alta biodegradazione di fenantrene (PHE) è stata del 68% in condizioni denitrificanti e del 64% in condizioni metanogene, accompagnata dalla produzione di N<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> e dall'accumulo di acidi grassi volatili.

Durante il lavaggio del suolo, più del 97% di PHE è stato rimosso dopo 60 minuti. Durante lo stesso tempo di trattamento, il desorbimento termico a bassa temperatura, 200°C, ha consentito una rimozione del PHE dell'88%.

L'analisi economica ha indicato che il desorbimento termico a bassa temperatura ha comportato un costo maggiore (1782 €/m<sup>3</sup>) rispetto al biorisanamento e al lavaggio del suolo (228€/m<sup>3</sup> e 371€/m<sup>3</sup>, rispettivamente), anche il bilancio energetico ha suggerito che quest'ultime siano tecnologie più sostenibili in richiedono un'energia inferiore, 16kWh/m<sup>3</sup> e 14 kWh/m<sup>3</sup>, rispettivamente rispetto a 417 kWh m<sup>3</sup> per il desorbimento (*Bianco et al., 2020*).

Un altro studio è stato condotto presso il Dipartimento di Ingegneria Ambientale di Pechino, Cina, relativo ad una bonifica di terreno inquinato da IPA che prevede il desorbimento termico attraverso l'utilizzo combinato ultrasuoni e microonde.

Richiede una potenza ultrasonica di 800 W, una potenza microonde di 350 W con irraggiamento per 10 minuti.

L'effetto del trattamento combinato si è dimostrato migliore rispetto alle condizioni di una singola fonte di calore (*Sang et al, 2019*).

È stato utilizzato un forno di pirolisi per osservare gli effetti provocati nel terreno lisciviato a seguito della rimozione degli idrocarburi.

Sono state studiate diverse condizioni ottenute attraverso la regolazione della temperatura di riscaldamento del suolo, del tempo di esposizione al calore ed al contenuto di olio ed acqua iniziale.

I risultati, ottenuti con un piccolo dispositivo di prova, mostrano che le migliori condizioni per il processo di bonifica prevedono un contenuto di olio iniziale dell'11,3%, un contenuto di acqua iniziale del 20%, una temperatura di desorbimento termico di 300° C ed un tempo di desorbimento termico di 4 ore (*Yang et al., 2019*).

La tecnologia del desorbimento termico a bassa temperatura è stata applicata a suoli contaminati da diesel.

Sotto analisi è stato posto l'effetto della temperatura a 180°C e 340 ° C sul suolo, del tempo di permanenza da 5 a 20 minuti e della tessitura del suolo (sabbia, argilla bentonitica e argilla caolinitica).

Il tasso di rimozione del diesel era maggiore nei campioni contenenti una percentuale maggiore di caolinite rispetto a quella di bentonite.

I costi della bonifica possono essere ridotti riutilizzando il calore di scarto generato in diverse industrie, coprendo il calore richiesto per il processo di desorbimento a bassa temperatura (*Zivdar et al, 2018*).

In uno studio condotto nel 2019 dall'Università di Risanamento ambientale di Beijing, Cina, sono stati presi come oggetto di studio cloruro di vinile, cis-1, 2-dicloroetilene, benzene e le acque sotterranee di una fabbrica di reagenti chimici.

La bonifica è avvenuta tramite un test pilota mediante la tecnica di desorbimento termico elettrico in situ.

I risultati hanno rivelato che i tassi medi di rimozione di cloruro di vinile e clorobenzene dal terreno trattato con desorbimento termico elettrico in situ hanno raggiunto rispettivamente il 100% e il 99%.

I tassi medi di rimozione di cloruro di vinile, cis-1, 2-dicloroetilene, benzene e clorobenzene dalle acque sotterranee erano tutti superiori al 90%.

I risultati, quindi, suggeriscono che la tecnologia di desorbimento termico elettrico in situ può essere applicata per risanare il sito contaminato da inquinanti organici di idrocarburi clorurati su larga scala (*Chi et al, 2019*).

Presso il “*CAS Key Laboratory of Low-Carbon Conversion Science and Engineering, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences*”, nel 2019, è stato sviluppata la tecnologia di bonifica di suolo contaminato da petrolio mediante desorbimento termico assistita da microonde, il recupero dell'olio e la ri-vegetazione.

I risultati hanno indicato che la concentrazione del contaminante del petrolio era ridotta allo standard normativo dopo 20 minuti di trattamento a 250–300 ° C.

Il terreno risanato a 250 ° C è stato utilizzato per il test di crescita delle piante e non è stato osservato alcun effetto negativo o perdita di fertilità, bensì, è stato raggiunto il tasso di germinazione ottimale del trifoglio (*Luo et al, 2019*).

Un ulteriore studio è stato condotto per individuare la potenziale capacità del riscaldamento a microonde (MWH) per il risanamento dei sedimenti marini caratterizzati da grave contaminazione da idrocarburi (HC).

Sono state analizzate l'efficacia della decontaminazione e la sostenibilità ambientale.

I risultati principali hanno rivelato che l'applicazione di un trattamento a microonde a 650 W ha portato a una rimozione, dopo solo 15 minuti, degli idrocarburi.

Una dose di acido citrico (CA) di 0,1 M ha portato a una maggiore eliminazione.

Le rimozioni di idrocarburi ottenute in un tempo di bonifica così breve sono difficilmente possibili con altre tecniche, rendendo il trattamento studiato una potenziale scelta eccellente.

L'analisi di sostenibilità ambientale ha evidenziato che la tecnologia a microonde è l'alternativa più sostenibile dal punto di vista ambientale per le applicazioni di decontaminazione dei sedimenti, con un danno totale inferiore del 75,74% rispetto a quello associato alla tecnologia elettrocinetica (*Falciglia et al., 2018*).

I terreni contaminati dal petrolio provenienti da una ex discarica e dal sito di una stazione di servizio in Corea sono stati trattati mediante desorbimento termico.

Sono state determinate le efficienze di rimozione dei diversi componenti dell'olio come idrocarburi totali del petrolio (TPH), idrocarburi poliaromatici (IPA), miscele complesse non risolte (UCM) e IPA alchilati (Alk-PAH) mediante desorbimento termico.

Sono stati studiati gli effetti delle temperature, da 200°C a 600° C e dei tempi di trattamento da 15 a 60 minuti, sull'efficienza del desorbimento termico.

Sono state osservate rimozioni quasi complete di TPH, UCM, IPA e Alk-IPA dopo 15 minuti a 400 ° C.

Le temperature di trattamento di 400 e 600 ° C non hanno mostrato una differenza significativa.

Lo studio mostra che i diversi componenti dell'olio nei terreni contaminati possono essere trattati mediante desorbimento termico fornendo un'efficienza di rimozione elevata ed un tempo relativamente breve che può essere vantaggioso per il trattamento

di suoli altamente contaminati o esposti alle intemperie dove l'efficienza del trattamento biologico è bassa (*Choi et al., 2020*).

Il desorbimento termico è un modo efficace per rimuovere gli idrocarburi dal suolo. L'esposizione del suolo a temperature comprese tra 100 e 400 ° C per volatilizzare gli idrocarburi può alterare le proprietà chimiche del suolo che potrebbero modificare la dinamica del fosforo (P).

Una serie di esperimenti di assorbimento e desorbimento del suolo in laboratorio sono stati condotti su terreni nativi e trattati con desorbimento termico (TD) per determinare il comportamento del fosforo rispetto alla disponibilità per l'assorbimento da parte delle piante.

L'aumento relativo medio dell'assorbimento di fosforo dopo il trattamento TD era compreso tra il 14 e il 26%.

Questo aumento della capacità di assorbimento del suolo è probabilmente dovuto alla potenziale creazione di materiali *biochar* e trasformazioni minerali degli ossidi di ferro e alluminio durante il trattamento.

Il desorbimento di fosforo era minimo nei terreni trattati con TD, indicando che l'interazione tra fosforo e siti di legame era forte.

La quantità di fosforo trattenuta da questi terreni può essere di interesse agronomico e dovrebbe essere considerata quando si sviluppano piani di fertilità.

Sulla base di questi risultati, i suoli trattati con TD non rappresentano una minaccia apparente per le acque superficiali vicine (*Croat et al., 2020*).

È stata testata una nuova procedura per la decontaminazione dei fanghi di dragaggio inquinati da mercurio situati presso la Laguna di Marano-Grado, Italia, condotta da Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche, Università degli Studi di Udine, basata sullo scambio cationico associato a desorbimento termico a bassa temperatura. Sono stati utilizzati tre diversi Sali: cloruro di sodio (NaCl), cloruro di tetrametilammonio ((CH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>NCl) e cloruro di tetrabutilammonio ((C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>4</sub>NCl).

I risultati mostrano che l'associazione dello scambio cationico con il trattamento termico porta ad un miglioramento significativo nella rimozione del mercurio dal

materiale contaminato a bassa temperatura rispetto ai campioni che non sono stati trattati con il sale.

Nei campioni trattati con una temperatura simile ma senza sale non è stata rilevata alcuna bonifica del mercurio.

I risultati mostrano che la temperatura di decontaminazione termica può essere notevolmente abbassata con questo approccio di bonifica, che è il primo esempio basato sullo scambio cationico dell'inquinante con un sale appropriato (*Comuzzi et al, 2011*).

Ulteriori articoli scientifici presentano i risultati di uno studio sperimentale condotto per analizzare il comportamento degli IPA durante la decontaminazione termica non ossidante di campioni di terreno contaminati da prodotti petroliferi.

Lo studio si è concentrato sulla valutazione dei livelli di concentrazione per diverse specie di IPA presenti nei prodotti di pirolisi dopo il trattamento di campioni di suolo contaminati, trattati in atmosfera inerte, con azoto, controllata.

Il periodo di trattamento variava tra i 30 ei 60 minuti a una temperatura compresa tra 350° C e 650° C.

Lo studio identifica e quantifica il livello di concentrazione di idrocarburi policiclici aromatici dalle fasi solida e gassosa dei prodotti di pirolisi nonché dei condensati prodotti durante il processo.

I risultati degli esperimenti hanno rivelato che la pirolisi è un processo efficiente che potrebbe essere utilizzato per rimuovere gli IPA dal suolo contaminato (*Bulmau et al, 2014*).

Il desorbimento termico è stato ampiamente utilizzato come metodo efficiente per rimediare alla contaminazione da mercurio ma il classico approccio di trattamento richiede generalmente una temperatura elevata, superiore a 600 ° C, che influiva negativamente sulla composizione del terreno e sul consumo energetico.

Per lo studio è stata sviluppata una nuova tecnica con accoppiamento di desorbimento termico e lisciviazione con Na<sub>2</sub>S per bonificare il terreno fortemente inquinato da mercurio cercando, però, di mantenere una temperatura ridotta, 350 ° C per 60 minuti.



Questo nuovo metodo di bonifica collaborativo potrebbe non solo realizzare un desorbimento termico a basse temperature ma anche fornire una guida utile per il suolo gravemente contaminato da mercurio (*Lu et al, 2019*).

Il desorbimento termico è stato combinato con l'aggiunta di idrossido di calcio per bonificare il terreno contaminato da policlorobifenili (PCB).

Le condizioni del test di desorbimento termico hanno visto una variazione da 300 a 600 ° C, sia con terreno bianco che con 1% di idrossido di calcio, Ca(OH)<sub>2</sub>, aggiunto. I risultati hanno mostrato che l'efficienza di rimozione ha raggiunto il 94,0% in presenza di idrossido di calcio, superiore a quella del 90,9% nel terreno bianco (*Liu et al, 2019*).

L'università di Scienze e Ingegneria Ambientale di Suzhou, in Cina, ha studiato l'effetto del desorbimento termico in situ a bassa temperatura sul clorobenzene nel suolo.

Per i terreni con particelle di piccole dimensioni presentava un'elevata efficienza di adsorbimento degli inquinanti dovuta alla grande superficie specifica quindi il tempo per il desorbimento termico era lungo.

L'umidità del suolo influenza il tasso di volatilizzazione del clorobenzene e l'effettiva porosità e permeabilità all'aria del suolo.

Un contenuto di umidità troppo alto o basso non ha favorito la bonifica del desorbimento termico in situ (*Jiang et al, 2019*).

Le sostanze perfluoroalchiliche e polifluoroalchiliche (PFAS) sono altamente resistenti alla degradazione biotica e abiotica e possono resistere a temperature molto elevate.

Le opzioni di trattamento più comuni includono carbone attivo granulare e resine.

In questo studio è stata utilizzata la tecnica del desorbimento termico per permettere la volatilizzazione di PFAS dal terreno.

Per ridurre al minimo il trattamento dei vapori uno *scrubber* è stato incorporato nella linea di trattamento per trasferire il PFAS alla fase liquida in una soluzione concentrata a basso volume.

I risultati hanno mostrato che il riscaldamento del suolo a 350° C e 400° C riduce le concentrazioni di PFAS nel suolo rispettivamente del 99,91% e del 99,998% (Crownover et al, 2019).

La crescente necessità di risparmio energetico ha portato il *Department of Fluid Mechanics, Polytechnic University of Catalonia (UPC)*, Spagna, a considerare la possibilità di ottenere un desorbimento termico a basse temperature alimentato da energia da fonti rinnovabili.

Il desorbimento termico solare a temperature fino a 500° C è una tecnologia innovativa applicata alla rimozione del mercurio e dell'arsenico dal suolo inquinato dalle operazioni minerarie.

Quando il terreno viene riscaldato da un sistema solare a bassa e alta temperatura, la pressione del vapore inquinante aumenta, producendo un trasferimento di massa alla fase gassosa, che viene quindi estratta dalle pompe a vuoto e dai sistemi di ventilazione (Navarro et al, 2009).

La contaminazione da petrolio greggio è una grave minaccia ambientale per il suolo e le piante che vi crescono.

Lo studio condotto da “*Department of Botany, PMAS-Arid Agriculture University*”, Rawalpindi, in Pakistan, fornisce la prima prova sperimentale per confrontare l'efficacia del *pyrochar* (*biochar* a pirolisi lenta), il desorbimento termico e la loro applicazione combinata per la degradazione del suolo contaminato da petrolio greggio in relazione alla crescita di lattuga.

Il *Pyrochar* è stato prodotto mediante pirolisi della segatura a 350° C, mentre il desorbimento termico è stato effettuato mediante pirolisi del suolo a 500° C.

I risultati dell'analisi del suolo hanno mostrato che l'efficienza di degradazione del petrolio greggio per l'applicazione combinata era più alta 40% rispetto all'utilizzo di una singola tecnica.

L'applicazione combinata ha migliorato la crescita delle piante con un notevole aumento nella percentuale di germinazione e del vigore della lattuga: è osservabile un aumento significativo della biomassa fresca e secca, della superficie fogliare, della

clorofilla totale, del potenziale idrico, del potenziale osmotico e dell'indice di stabilità della membrana.

Questo studio ha confermato l'efficacia del *pirochar*: il desorbimento termico e la loro applicazione combinata per la decontaminazione del suolo da petrolio greggio su scala di laboratorio e anche nel migliorare l'usabilità del suolo per la germinazione e la crescita della lattuga (*Ilyas et al, 2021*).

Uno studio di fattibilità a supporto di un processo di desorbimento termico è stato condotto per il risanamento del suolo impattato da nerofumo, ossia il residuo solido risultante dalla gassificazione del petrolio greggio.

L'obiettivo di questo studio è determinare la temperatura richiesta per desorbire idrocarburi policiclici aromatici (IPA), i composti di interesse normativo, dal nerofumo. Sono riportati risultati su scala di banco.

È stato osservato che una piccola frazione residua di composti contaminanti persiste nei solidi anche a temperature superiori a 650° C.

Sebbene lo stato specifico di questi IPA persistenti sia sconosciuto, possono risiedere all'interno di un residuo estremamente non volatile o essere altrimenti fortemente sequestrati nella matrice solida (*Harmon et al, 2001*).

La contaminazione da mercurio, Hg, di suoli e sedimenti è uno dei tanti problemi ambientali nella riserva di *Oak Ridge, Oak Ridge, Tennessee*.

Il terreno contaminato da mercurio è stato trattato termicamente per ridurre la concentrazione di mercurio.

Sono state esaminate le caratteristiche del suolo e la risposta alla crescita delle piante del terreno non trattato e trattato.

Il terreno trattato a 350° C ha mantenuto la maggior parte delle sue proprietà originarie del suolo, ma il terreno trattato a 600° C ha mostrato notevoli cambiamenti nella composizione mineralogica e nelle caratteristiche fisico-chimiche.

L'aggiunta di azoto con funzione di fertilizzante ha avuto effetti benefici nel terreno trattato a 350° C ma ha avuto pochi effetti benefici nel terreno trattato a 600° C.

Alcuni cambiamenti delle caratteristiche del suolo indotti dal trattamento termico non possono essere evitati.

Le caratteristiche del suolo e i risultati dei test di fitotossicità, però, suggeriscono che i cambiamenti che si verificano dopo il trattamento a 350° C non limitano l'uso del terreno trattato ai fini di riempimento del sito scavato per la bonifica su vasta scala. (Roh et al, 2000).

Uno studio condotto da “*Fujian Provincial Key Laboratory of Soil Environmental Health and Regulation*”, in Cina, ha valutato il trattamento termico indotto da microonde a temperatura relativamente bassa, 300–350° C, per la decontaminazione di suoli inquinati con alta concentrazione di mercurio nell'interesse di affrontare le questioni relative ai metodi tradizionali di desorbimento termico con elevato consumo di energia, costi elevati e danni irreversibili ai suoli.

È stato riscontrato che l'aggiunta di carbone attivo granulare (CAG) aumenta significativamente la velocità di riscaldamento e accelera la decomposizione degli inquinanti del mercurio.

Gli additivi CAG hanno mostrato cambiamenti trascurabili durante l'intero processo di decontaminazione e l'aumento della quantità di suolo non ha influenzato evidentemente la velocità di riscaldamento.

Questi risultati permettono di fornire informazioni fondamentali per la bonifica su scala crescente di suoli contaminati con alte concentrazioni di mercurio a temperature relativamente basse con una convenienza economica ed energetica (Cao et al, 2018).

Le tecnologie di bonifica termica sono molto efficienti per la rimozione di contaminanti organici lipofili.

Esistono tre diversi approcci per l'applicazione del riscaldamento a microonde per il risanamento: 1) riscaldamento di materiale contaminato in un forno, 2) riscaldamento in situ di superfici contaminate e 3) riscaldamento in situ di ambienti del suolo sotterraneo.

I risultati ottenuti hanno confermato i dati dei test di laboratorio e le elevate efficienze di rimozione di diversi contaminanti sono state ottenute a temperature basse e con un basso consumo energetico.

Lo studio ha anche permesso di acquisire importanti conoscenze empiriche su innovative tecnologie di bonifica che hanno permesso di determinare limiti pratici per ulteriori scale-up e applicazioni sul campo o per convalidare futuri modelli numerici (Krouzek et al, 2018).

Per una più semplice visualizzazione degli articoli scientifici da cui sono state tratte le informazioni si rimanda alla Tabella 2.2 sottostante.

Tabella 2.2: Riferimenti letteratura scientifica

	<b>Contaminanti e concentrazione</b>	<b>Applicazione</b>	<b>Tecnologia e Metodi</b>	<b>Recupero</b>	<b>Riferimento biblio</b>
1	IPA 2967-3678 mg/Kg	Piena scala	105°-650° infrarossi Integrazione con solvente n-butanolo.	90% (400°)	Cheng et al., 2021
2	IPA, Idrocarburi Petroliiferi (TPH) 302,01 mg/Kg	Piena Scala	60°-250° (10-30 min)	89,88%	Leontari et al., 2021
3	Idrocarburi Petroliiferi 2000-5000 mg/kg	Piena Scala	25°-250°	80%	Bykova et al., 2021
4	IPA Concentrazioni N.D.	Laboratorio	200° (60 min)	88%	Bianco et al., 2020
5	Idrocarburi Petroliiferi Concentrazioni N.D.	Laboratorio	169,4° - 187,9° (600 W 1400 W) Integrazione con microonde e ultrasuoni.	77,8%	Sang at al, 2019
6	Idrocarburi Petroliiferi Concentrazioni N.D.	Laboratorio	300°(4ore)	93,8%	Yang et al., 2019
7	Idrocarburi Petroliiferi - Diesel- 20000mg/kg	Laboratorio	180°-340° (5-20 min)	96,5%	Zivdar et al, 2018
8	Cloruro di vinile, cis-1, 2- dicloroetilene, benzene. Concentrazioni N.D.	Laboratorio	100°-110°	CloroBenzene 99% Cloruro di vinile 100%	Chi et al, 2019
9	Idrocarburi Petroliiferi 95300mg/Kg	Laboratorio	250°-300° (20 min)	90% (300°)	Luo et al, 2019
10	Idrocarburi 33530mg/Kg	Laboratorio	650 W Microonde	76,9% (5 min) 96,5% (10min) 99,7%(15min)	Falciglia et al., 2018

11	Idrocarburi 3900e5600 mg/kg	Laboratorio	160°-280° (5-30 min)	89% (200° per 30 min)	Falciglia et al, 2020
12	Idrocarburi Petroliiferi: 1965mg/Kg, Miscele complesse non risolte (UCM): 1441mg/Kg, IPA alchilati: 61mg/Kg.	Piena scala	200°-600° (15-60 min)	99%	Choi et al., 2020
13	Idrocarburi Concentrazioni N.D.	Laboratorio	100°-400°	ND	Croat et al., 2020
14	Mercurio 20 e 200 ppm	Laboratorio	Desorbimento termico a 120° ed integrazine con un Sale: NaCl (cloruro di sodio); (CH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> NCl (cloruro di tetrametilammonio); (C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> ) <sub>4</sub> NCl (cloruro di tetrabuttilammonio).	24% - 60%	Comuzzi et al, 2011
15	IPA 0.989 mg/kg <sub>dw</sub>	Laboratorio	650° (60 min)	90%	Bulmau et al, 2014
16	Mercurio 168mg/kg	N.D.	350° (60 min) Integrazione con lisciviazione con solfuro di sodio (Na <sub>2</sub> S)	Da 168 mg/kg a 1mg/kg	Lu et al, 2019
17	Policlorobifenili (PCB) 528mg/g	Laboratorio	300°-600° Integrazione con idrossido di calcio Ca(OH) <sub>2</sub>	94%	Liu et al, 2019
18	Clorobenzene Concentrazione N.D.	N.D.	130°	99%	Jiang et al, 2019
19	Perfluoroalchilici (PFAS) Concentrazione N.D.	N.D.	350°-400°	99%	Crownover et al, 2019
20	Mercurio: 23- 4000mg/Kg Arsenico: 9,6- 1610mg/kg	Laboratorio	400°-500°	Mercurio: 76% Arsenico: 5.5- 77.3%	Navarro et al, 2009
21	Petrolio Concentrazione N.D.	Laboratorio	Desorbimento termico a 500°C ed integrazione con Pirochar (biochar a pirolisi lenta-350°)	19,6% solo DT + 40% con aggiunta di Pirochar	Ilyas et al, 2021
22	Idrocarburi petroliferi totali 5033 ppm	Laboratorio	399°	Da 5033ppm a 253ppm	Fann et. al, 1995

23	IPA 4100mg/Kg	Laboratorio	250°-300°	Da 4100ppm a 100 ppm in 10 giorni	Harmon et al, 2001
24	Mercurio Concentrazione N.D.	Scala Pilota	350°-600°	N.D.	Roh et al, 2000
25	Mercurio Concentrazione N.D.	Laboratorio	300°-350° Desorbimento mediante microonde	86,9% a 400W (350°) per 40 min.	Cao et al, 2018
26	THC 15600 - 31000 mg/Kg	Scala Pilota	350°- 400° Desorbimento mediante microonde a 6Kw e 2,45 GHz	80%	Krouzek et al, 2018

## Capitolo 3

### SCOPO DEL LAVORO

L'elaborato ha come obiettivo l'analisi della sostenibilità ambientale, mediante la metodologia *Life Cycle Assessment* (LCA), del processo di bonifica operato con la tecnica del desorbimento termico di un terreno insaturo inquinato da idrocarburi all'interno dell'ex-discarica di Gela (CL).

L'analisi di sostenibilità ambientale prevede la costruzione di bilanci di materia e di energia e la loro traduzione in impatti ambientali.

Lo scopo ultimo è quello di poter operare una successiva gestione degli impatti tramite una loro riduzione e compensazione.

Tenendo conto della scarsa disponibilità, in letteratura, di studi sull'analisi del ciclo di vita o di sostenibilità ambientale applicati a reali casi studio di bonifiche ambientali, i risultati del nostro elaborato rappresentano un interessante punto di partenza verso l'applicazione di scelte sostenibili.

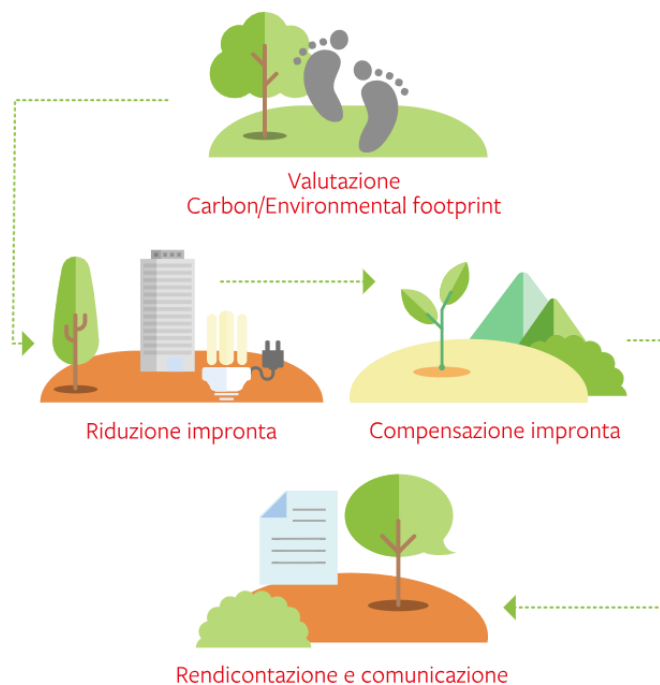


Figura 3.1: Schema dello studio LCA



## Capitolo 4 MATERIALI E METODI

### **Life Cycle Assessment**

La *Life Cycle Assessment* (LCA) è una procedura che consente l'identificazione dei carichi ambientali associati ad un prodotto, processo o attività, seguendo l'oggetto dello studio lungo tutto il suo ciclo di vita.

L'LCA è uno strumento di valutazione che permette un'analisi degli impatti generati sull'ambiente dal ciclo di vita di un processo o prodotto lungo il percorso definito "dalla culla alla tomba" che va dall'estrazione delle materie prime fino al trattamento dei rifiuti prodotti dal sistema, ricorrendo ad un approccio olistico che evita il trasferimento degli impatti da una fase del ciclo di vita all'altra e da una matrice ambientale (acqua, aria, suolo) verso un'altra (Chiavetta, 2009).

Tale percorso, che si esplica sia a monte sia a valle della fase di utilizzo, inizia con l'estrazione delle materie prime, attraversa la fase di lavorazione, distribuzione, uso e riuso del prodotto e termina con lo smaltimento finale, individuando e quantificando i consumi di materia ed energia e le emissioni nell'ambiente.

L'LCA rappresenta un supporto fondamentale allo sviluppo di schemi di etichettatura per quanto riguarda la definizione dei criteri ambientali di riferimento per un dato gruppo di prodotti come etichette ambientale di tipo I, Ecolabel, o come principale strumento finalizzato ad ottenere una *Environmental Product Declaration* (EPD), etichetta ambientale di tipo III.

In Italia l'LCA è lo strumento cardine anche per il *Made Green in Italy*, il primo schema certificativo nazionale sull'Impronta ambientale di prodotto, strutturato secondo il nuovo approccio europeo della *Product Environmental Footprint* (PEF).

A livello europeo l'importanza strategica dell'adozione della metodologia LCA come strumento di base e scientificamente adatto all'identificazione di aspetti ambientali significativi è espressa all'interno del Libro Verde COM 2001/68/CE e della COM 2003/302/CE sulla Politica Integrata dei Prodotti, ed è suggerita, almeno in maniera indiretta, anche all'interno dei Regolamenti Europei EMAS (Reg. 1221/2009) ed Ecolabel (Reg. 61/2010).

Le potenziali applicazioni LCA sono molteplici: sviluppo e miglioramento di prodotti e/o processi, marketing ambientale, pianificazione strategica, attuazione di una politica pubblica.

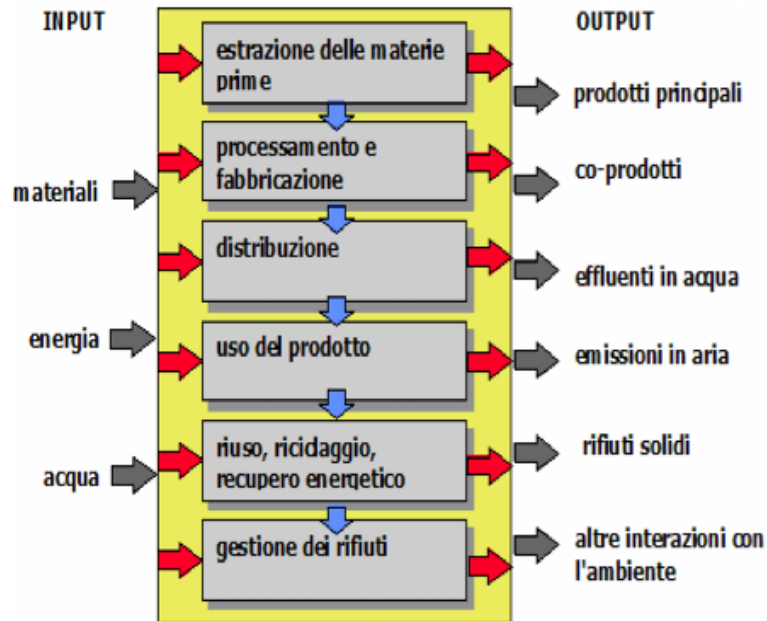


Figura 4.1: Diagramma di flusso di un sistema produttivo

Il termine LCA, con cui in principio si intendeva indistintamente *Life Cycle Assessment o Life Cycle Analysis* fu coniato durante il congresso della *Society of Enviromental Toxicology and Chemistry* (SETAC) di Smuggler Notch, Vermont, (USA) nel 1990 per caratterizzare più dettagliatamente le analisi svolte fino ad allora con il nome di *Resource and Enviromental Profile Analysis* (REPA).

La definizione che venne stabilita è la seguente:

*“è un procedimento oggettivo di valutazione di carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o 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.”*

Nella definizione vengono sottolineati alcuni aspetti: l'oggettività del procedimento, vale a dire l'esecuzione di fasi analitiche precise e ben determinate, nonché lo studio di dati confrontabili e scientificamente verificabili e la considerazione dell'intero ciclo di vita, che presuppone una visione globale del sistema in esame.

L'obiettivo da perseguire, nella prospettiva di un possibile miglioramento, è rappresentato dalla valutazione degli impatti ambientali imputabili allo stato in essere del processo o dell'attività studiati.

La quantificazione dei carichi ambientali del ciclo di vita di un prodotto o servizio avviene attraverso la contabilizzazione di tutti i consumi di materie prime, acqua e fonti energetiche, detti "input" e di tutte le emissioni gassose, liquide e solide, di rifiuti e di altri rilasci, detti "output".

L'LCA valuta, inoltre, i "crediti ambientali" dovuti alla produzione evitata di materiali ed energia grazie al riuso, al riciclo o alla termovalorizzazione del prodotto considerato.

Grazie all'identificazione di criticità ambientali, in gergo "bottleneck", cioè "colli di bottiglia", si può mirare all'ottimizzazione dei processi e dell'uso delle risorse.



Figura 4.2: Schema di un ipotetico ciclo di vita di un prodotto/servizio

## 4.1 Normativa di riferimento

La normativa di riferimento nel campo della LCA è la serie ISO 14040 (ISO14040, 2006 e ISO14044, 2006).

Le edizioni delle norme internazionali ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, elaborate in seno all'ISO/TC 207 "*Environmental management*" SC 5 "*Life Cycle Assessment*", sono state pubblicate dall'UNI come norme UNI EN ISO.

Le norme ISO 14040 e ISO 14044 descrivono come realizzare uno studio LCA completo per qualsiasi tipologia di prodotti, non si tratta dunque di norme specifiche di prodotto, ma di norme contenenti requisiti generali applicabili a tutti i prodotti, indipendentemente dalla loro natura.

La **UNI EN ISO 14040:2006**, "Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento", fornisce in un quadro generale le pratiche, le applicazioni e le limitazioni dell'LCA, ed è destinata ad una vasta gamma di potenziali utenti e parti interessate, anche con una conoscenza limitata della valutazione del ciclo di vita.

La presente norma è la versione ufficiale della norma europea EN ISO 14040 (edizione luglio 2006) e descrive i principi ed il quadro di riferimento per la valutazione del ciclo di vita (LCA), è la norma principale in quanto specifica la struttura dello studio di LCA per condurre lo studio e per poi diffonderlo mediante report.

Non definisce, però, i dettagli specifici delle tecniche di valutazione.

La **UNI EN ISO 14044:2006**, "Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida", è stata elaborata per la preparazione, la gestione e la revisione critica del ciclo di vita.

Fornisce le linee guida per la fase di valutazione dell'impatto dell'LCA, la fase di interpretazione dei risultati, la valutazione relativa alla natura e alla qualità dei dati raccolti.

## 4.2 Tipologie di LCA

Il sopra citato approccio *“from cradle to grave”* fornisce la descrizione più accurata dei carichi ambientali del sistema studio in un LCA.

La scelta di seguire l’oggetto dello studio dalla culla alla tomba è dettata principalmente da due ragioni: in primo luogo, una singola operazione industriale può apparentemente essere resa più efficiente e “più pulita” trasferendo l’inquinamento in altri comparti ambientali, così che i benefici derivanti da queste azioni vengono controbilanciati da problemi generati altrove, senza conseguire nel complesso alcun reale miglioramento; in secondo luogo tale approccio permette di passare da una tipologia di studio tipica dell’ingegneria tradizionale, focalizzata sull’efficienza dei singoli sistemi produttivi, ad una visione globale dell’intera catena produttiva.

Tuttavia, condurre uno studio LCA completo può risultare a volte molto oneroso, sia in termini di tempo che di denaro: in risposta a queste considerazioni, sono stati individuati metodi per semplificare la metodologia di LCA, per renderla più veloce e meno dispendiosa, senza rinunciare alle caratteristiche fondamentali di uno studio completo e senza perdere l’accuratezza e l’attendibilità dei risultati.

A seconda dello scopo e degli obiettivi dello studio, una LCA può essere condotta più o meno dettagliatamente.

Le strategie semplificative possono riguardare la limitazione degli obiettivi, la riduzione della quantità di dati richiesti o il restringimento dei confini del sistema, in quest’ultimo caso le semplificazioni introdotte producono degli studi di LCA definiti come segue (Figura 4.3):

- *“from cradle to gate”* (dalla culla al cancello): lo studio inizia con l’approvvigionamento delle materie prime e delle fonti di energia e si conclude con l’immissione del prodotto finito sul mercato, escludendo quindi la fase di utilizzo e di smaltimento dello stesso;
- *“from gate to gate”* (dal cancello al cancello): lo studio analizza unicamente la realtà aziendale quindi comprende le fasi di fabbricazione e assemblaggio del prodotto.

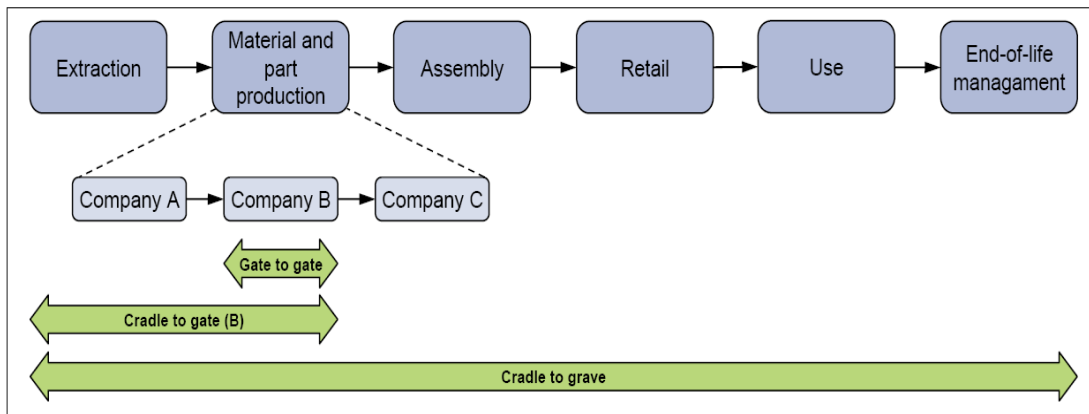


Figura 4.3: Schema di sintesi delle possibili tipologie di LCA

- “*from cradle to cradle*” (dalla culla alla culla): lo studio comprende anche la rivalorizzazione del prodotto a fine vita attraverso il recupero di energia e materiali, nell’ottica di diminuire progressivamente la quantità di rifiuti da conferire in discarica.

Nella pratica, chi conduce una valutazione LCA, col fine di progettare o riprogettare un prodotto ecosostenibile, è interessato alle differenze tra le possibili alternative di progettazione in esame.

Si possono distinguere varie tipologie di LCA sulla base del tipo di dati a disposizione, della loro qualità e dello scopo per il quale lo studio viene eseguito.

La classificazione originaria sulle tipologie di LCA è quella offerta dalla *CIT Ekologik*, società svedese di consulenza in ecologia ambientale del prodotto e dell’amministrazione, che coopera con alcune importanti organizzazioni mondiali come la *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), e rappresenta la Svezia nel comitato *International Standards Organization* (ISO) nell’ambito delle norme concernenti l’LCA.

La classificazione proposta dalla *CIT Ekologik* è la seguente:

- *Streamlined LCA* - LCA semplificata o parziale: una LCA di questo tipo in genere costituisce la base sulla quale poggiano le decisioni prese per conferire la giusta direzione allo sviluppo di nuovi prodotti o servizi, soprattutto quando questi non sono troppo complessi.  
Spesso i dati utilizzati in una LCA semplificata sono per la maggior parte di tipo qualitativo.  
Richiede un tempo di realizzazione breve, variabile da alcune settimane fino ad un paio di mesi;
- *Screening LCA* - LCA selettiva: questo tipo di LCA si utilizza principalmente nel caso in cui si vogliono individuare e “selezionare” le fasi di vita di un prodotto che determinano gli impatti ambientali più consistenti.  
Si ricorre per lo più a dati standard, senza approfondire la ricerca delle informazioni né dare loro effettiva valutazione.  
Solo in seguito, dai risultati così ottenuti e da un’analisi di sensibilità, si individuano i dati critici dei quali è necessario migliorare la qualità.  
La LCA di screening, pur non essendo uno studio esaustivo, è un sistema rapido per la valutazione degli aspetti realmente importanti del ciclo di vita di un prodotto o servizio sui quali è necessario focalizzare l’attenzione.
- *Detailed LCA* - LCA dettagliato: è lo studio necessario nel caso di una valutazione completa, che presuppone a monte uno o più studi di tipo selettivo.  
Un’analisi di questo tipo è indispensabile nel caso in cui i risultati debbano essere utilizzati per comunicazioni pubbliche.  
Una LCA dettagliata prevede una elevata qualità di dati e comprende, dunque, la raccolta sistematica di valori specifici del caso in esame (dati primari) da preferire a dati presi da bibliografia (dati secondari).

### 4.3 Software per l'analisi

Per l'analisi in oggetto è stato utilizzato il *software* e le banche dati GaBi 9.5, combinato con il *database* per *Life Cycle Engineering*, programma tra i maggiormente riconosciuti a livello mondiale.

GaBi viene impiegato per realizzare studi LCA, *Carbon & Water Footprint*, EPD, PEF e studi di eco-progettazione.

GaBi permette di modellizzare ogni elemento di un prodotto o sistema di prodotti in un'ottica di ciclo di vita, fornisce alle aziende elementi per prendere le migliori decisioni di produzione e sull'intero ciclo di vita di un qualsiasi prodotto.

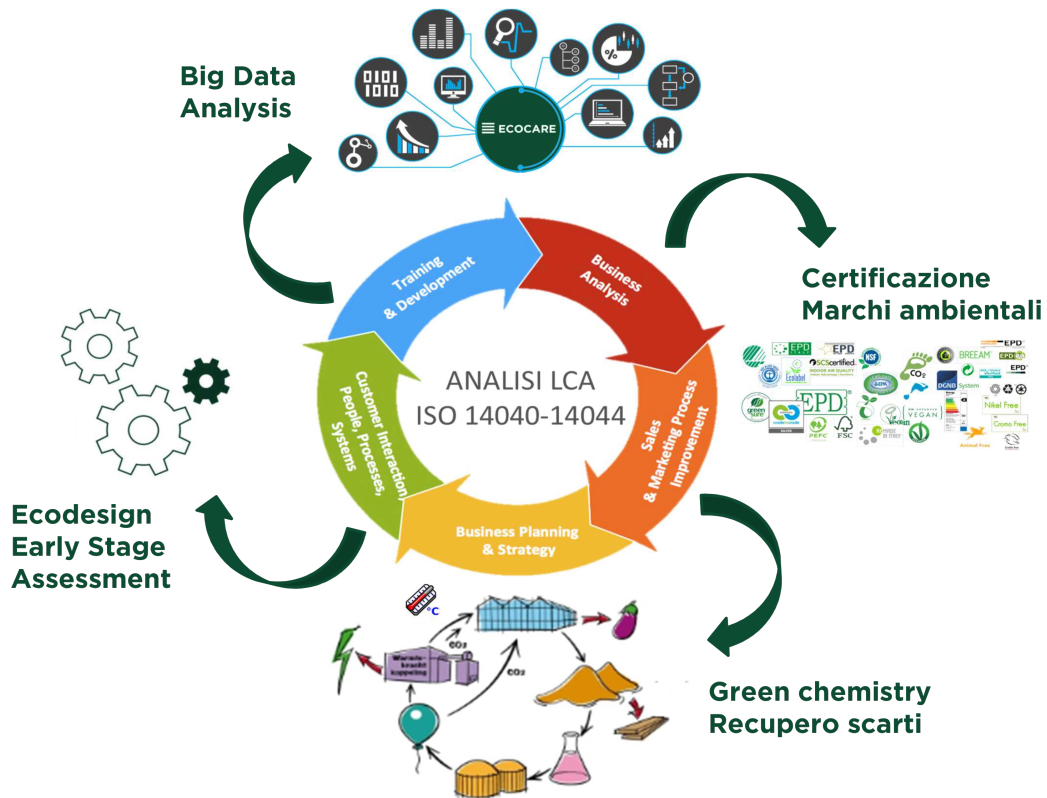


Figura 4.4: Potenziali settori di interesse di uno studio LCA



## Capitolo 5 ANALISI DI SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE

### 5.1 Metodologia

A livello internazionale l'analisi di sostenibilità ambientale è regolamentata dalle norme ISO della serie 14040, in base alle quali lo studio viene strutturato sulla base delle seguenti fasi di lavoro:

- Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dell'analisi (ISO 14041),
- Compilazione di un inventario degli input e degli output di un determinato sistema (ISO 14041),
- Valutazione del potenziale impatto ambientale correlato a tali input ed output (ISO 14042),
- Interpretazione dei risultati (ISO 14043).



Figura 5.1: Struttura di uno studio LCA

## 5.2 Definizione scopi e obiettivi

Questa fase rappresenta uno stadio di rilevante importanza nello sviluppo di una analisi di sostenibilità ambientale in quanto chiarisce la ragione principale per la quale lo studio viene eseguito, consentendo di comprendere anche l'utilizzo che sarà fatto dei risultati, descrive il sistema oggetto dello studio e i suoi confini, elenca le categorie di dati da sottoporre allo studio e definisce il livello di dettaglio che si vuole raggiungere.

Tale fase rappresenta, in sintesi, la pianificazione iniziale di uno studio di sostenibilità.

Devono essere definiti:

1. Obiettivo dello studio,
2. Unità funzionale,
3. Confini del sistema,
4. Allocazione,
5. Categorie di dati,
6. Qualità dei dati.

### ***Obiettivo dello studio***

Devono essere chiaramente descritti:

- L'applicazione prevista;
- Le motivazioni per effettuare lo studio;
- Il tipo di pubblico a cui è destinato

Deve inoltre essere specificato se i risultati sono destinati ad essere usati per effettuare asserzioni comparative e/o se sono destinate alla divulgazione al pubblico.

L'obiettivo dello studio deve essere chiaro e coerente con l'applicazione prevista.

### ***Unità funzionale***

L'unità funzionale è la grandezza rispetto al quale tutti i dati in ingresso ed in uscita da sistema in esame sono riferiti.

L'unità funzionale deve essere definita e rappresenta una prestazione quantificabile e oggettivamente riscontrabile dal sistema in esame.

### ***Confini del sistema***

I confini del sistema definiscono le unità di processo da includere nel sistema in cui si costruisce il modello e devono essere scelti in maniera tale che tutti i flussi in ingresso e in uscita siano flussi elementari.

La scelta dei confini, il livello di aggregazione dei dati e il modello scelto per il sistema devono essere coerenti con l'obiettivo dello studio.

Quando non c'è sufficiente tempo, dati o risorse per condurre uno studio completo, si può decidere di escludere delle unità di processo dalla composizione del modello.

In questo caso qualunque decisione di eliminare fasi del ciclo di vita, processi o flussi in ingresso o in uscita deve essere chiaramente indicata e giustificata.

### ***Allocazione***

Una analisi di inventario si basa essenzialmente sulla capacità di correlare delle unità di processo all'interno di un sistema con flussi elementari di materiali ed energia. Tuttavia, sono davvero pochi i processi industriali che producono un solo flusso in uscita o che sono fondati sulla linearità tra materie prime in ingresso e in uscita. Nella maggior parte dei casi, infatti, i processi industriali comportano più di un prodotto, senza contare che alcuni prodotti intermedi o di scarto possono essere riciclati e riutilizzati come se fossero materie prime.

La conseguenza di tutto ciò è che i flussi di materiali ed energia, nonché i rilasci nell'ambiente ad essi associati, dovranno essere ripartiti nel sistema di prodotto considerato.

Tale processo prende il nome di allocazione e dovrà essere documentato e giustificato per ognuna delle unità di processo considerate e dovrà essere condotto secondo procedure chiaramente definite.

Le procedure di allocazione, che dovrebbero approssimare al meglio le relazioni che sussistono tra i flussi in ingresso e in uscita, possono basarsi su:

- Proprietà fisiche: peso o volume dei vari prodotti
- Valore economico di ciascun prodotto.

Se possibile il processo di allocazione dovrebbe essere sempre evitato, mediante la divisione delle unità di processo da allocare in due sotto-processi e collegando i dati in ingresso e in uscita relativi a tali sotto-processi, oppure tramite l'espansione del sistema in modo che quest'ultimo includa funzioni aggiuntive relative ai coprodotti (JRC, 2010).

### ***Categorie di dati***

I dati selezionati per LCA dipendono dall'obiettivo e dal campo di applicazione dello studio.

Possono essere raccolti a partire dai siti di produzione associati ai processi unitari entro i confini del sistema, oppure ottenendoli e calcolandoli da altre fonti: dati misurati, calcolati o stimati.

### ***Qualità dei dati***

I requisiti di qualità dei dati dovrebbero comprendere:

- Copertura temporale: l'anzianità dei dati e la minima estensione di tempo rispetto ai quali i dati dovrebbero essere raccolti;
- Copertura geografica: la zona geografica nella quale dovrebbero essere raccolti i dati relativi ai processi unitari, per soddisfare l'obiettivo dello studio;
- Copertura tecnologica: tecnologia specifica o combinazione di tecnologie;
- Precisione: misura della variabilità dei valori dei dati per ciascuna categoria di dati espressi;
- Rappresentatività: valutazione qualitativa del grado con cui l'insieme dei dati riflette la popolazione realmente interessata;
- Riproducibilità: valutazione qualitativa del grado con cui le informazioni riguardo la metodologia e i valori dei dati permettono a un esecutore indipendente di riprodurre i risultati riportati nella relazione dello studio;
- Le fonti dei dati;
- L'incertezza dell'informazione.

### 5.3 Analisi Dell'inventario

L'analisi dell'inventario rappresenta la fase più delicata ed impegnativa in termini di tempo di un'analisi del ciclo di vita di un processo.

In questa fase sono individuati e quantificati i flussi in ingresso e in uscita dal sistema oggetto di studio, lungo il suo intero ciclo di vita.

L'analisi dell'inventario (LCI) è la costruzione vera e propria del modello della realtà, deve essere in grado di rappresentare nella maniera più fedele possibile tutti gli scambi tra i singoli processi inclusi nei confini del sistema analizzato.

Questa fase prevede i seguenti passi:

1. Diagramma di flusso, che identifica e visualizza le operazioni principali del processo e le loro relazioni;
2. Schede di raccolta dati, tramite le quali, per ogni operazione unitaria, vengono indicati tutti gli input e gli output associati.

I dati raccolti possono essere: primari se provenienti da rilevamenti diretti, secondari se ricavati dalla letteratura, banche dati e altri studi e terziari se definiti sulla base di stime e valori medi.

3. Risultati, presentati secondo diverse categorie, ossia, materie prime, combustibili primari, energia (produzione da combustibili, diretta, trasporti), rifiuti solidi, emissioni gassose ed emissioni liquide.

## 5.4 Valutazione Degli Impatti

Lo scopo di questa fase è di valutare la portata degli impatti ambientali del sistema, trasformando ogni flusso di sostanze della tabella di inventario in un contributo agli impatti stessi mediante gli indicatori di impatto.

Questa valutazione possiede come matrice di base l'inventario dell'oggetto in esame, cioè il complesso bilancio materiale ed energetico in uscita dalla LCI, e permette di ottenere risultati di più immediata comprensione che consentiranno di definire i miglioramenti ambientali da apportare al sistema dello studio.

Tale approccio si articola in 4 fasi:

1. Classificazione
2. Caratterizzazione
3. Normalizzazione
4. Pesatura

Per la ISO le prime due fasi, cioè classificazione e caratterizzazione, sono obbligatorie, mentre la normalizzazione e la pesatura rappresentano elementi facoltativi da utilizzare in funzione dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio di sostenibilità.

### ***Classificazione***

Vengono identificate le categorie di impatto attribuendo le emissioni inquinanti ed i consumi di materie prime, energia ed acqua alle specifiche categorie da essi provocati.

### ***Caratterizzazione***

Nella fase di caratterizzazione vengono moltiplicate le quantità individuate nella fase di analisi dell'inventario per la loro attitudine o incidenza a provocare un impatto ambientale per una determinata categoria di impatto.

L'incidenza riguarda una sostanza presa a riferimento, emblematica per quella categoria.

Ad esempio: per l'effetto serra, la sostanza di riferimento è l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e si esprimono i contributi di tutti i gas serra in kg di CO<sub>2</sub> equivalente.

Dire per esempio che il metano ha un potenziale effetto serra pari a 25 kg di CO<sub>2</sub> vuol dire che 1 kg di metano ha un'incidenza sull'effetto serra pari a 25 kg di CO<sub>2</sub>.

L'impatto totale sull'effetto serra del prodotto analizzato sarà dato dalla somma di tutti i contributi dei gas serra espressi in kg di CO<sub>2</sub> equivalenti.

I valori dei differenti potenziali d'impatto non sono però direttamente confrontabili tra loro perché aventi unità di misura differenti.

Tra gli indicatori si fa riferimento a due tipologie diverse:

- *Midpoints*: esempio, le categorie d'impatto del Riscaldamento Globale e dell'Assottigliamento dello Strato di Ozono sono basate su fattori di equivalenza dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC); il *Global Warming Potential* (GWP) e l'Ozone Depletion Potential (ODP). La categoria d'impatto dell'Acidificazione è basata sul numero di protoni H<sup>+</sup> che possono essere rilasciati per chilogrammo di sostanza emessa. Queste categorie d'impatto hanno unità piuttosto astratte.

Per esempio, l'unità del Riscaldamento globale è "kg di CO<sub>2</sub> equivalente" e l'unità dell'Acidificazione è "kg di SO<sub>2</sub> equivalente".

- *Endpoints*: esempio, l'indicatore per il Cambiamento Climatico è espresso come *Disability Adjusted Life Years* (DALY), in italiano "Attesa di Vita Corretta per Disabilità", espressa come il numero di anni persi a causa della malattia, per disabilità o per morte prematura.

L'indicatore di categoria d'impatto per l'acidificazione è espressa come percentuale di biodiversità diminuita in un'area durante un certo periodo. Questi indicatori sono certo più difficili da calcolare poiché in questo modello devono essere fatte molte ipotesi, sono perciò più incerti ma il loro significato è più facile da capire e valutare.

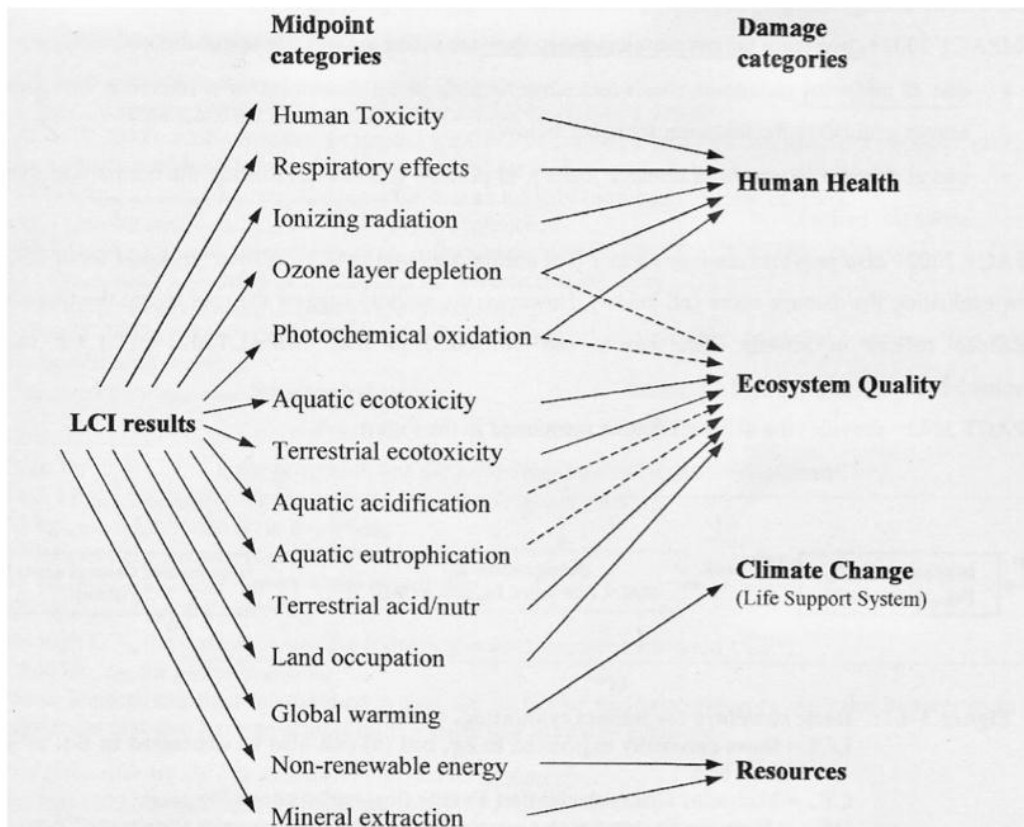


Figura 5.2: Schema delle categorie d'impatto (*midpoint*) e delle categorie di danno (*endpoint*) del metodo IMPACT 2002+. Le frecce tratteggiate indicano i meccanismi ambientali che collegano le categorie d'impatto alle categorie di danno di cui si assume l'esistenza, ma che non vengono modellati in maniera quantitativa a causa di conoscenze scientifiche incomplete. (Fonte: Humbert, Margni, & Joliet, 2005, IMPACT 2002+: User Guide Draft for version 2.1).

## ***Normalizzazione***

Secondo la norma, la normalizzazione è una fase opzionale, è quindi una scelta di chi compie l'analisi.

I valori precedentemente ottenuti vengono normalizzati, cioè divisi per un valore di riferimento in modo da poter stabilire la magnitudo di ciascun effetto ambientale rispetto ad un valore di riferimento, rappresentato in genere dai dati medi su scala mondiale, regionale, europea, e riferiti ad un determinato intervallo di tempo.

Tale fase ha la finalità di rendere maggiormente comprensibile l'entità dei diversi impatti del sistema analizzato.



## ***Pesatura***

La procedura di pesatura è la fase più controversa e difficile dell'analisi d'impatto del ciclo di vita.

Quest'ultima fase comporta l'assegnazione di un peso alle diverse categorie di impatto, ossia, gli impatti potenziali relativi a ciascuna delle categorie, tipicamente normalizzati, sono moltiplicati per un fattore di pesatura.

Esistono numerose possibili modalità di calcolo dei fattori, con approcci profondamente differenti:

- Valutazione di un gruppo di esperti
- Distanza dall'obiettivo (si basa sulla differenza tra carico ambientale attuale e livello limite)
- Monetizzazione (si basa sulla spesa per rimuovere gli effetti dell'impatto)

Tale procedura è pertanto legata a scelte soggettive che possono condurre a risultati profondamente differenti.

Al termine di normalizzazione e pesatura i risultati relativi alle diverse categorie di impatto possono essere sommati ottenendo un unico indice che rappresenta il potenziale impatto complessivo del sistema studiato da un punto di vista ambientale.

## 5.5 Interpretazione e Miglioramento

Per interpretazione del ciclo di vita si intende il processo che permette di capire la ragionevolezza del risultato finale di tutto l'impatto ambientale, trarre le conclusioni, spiegare le limitazioni dei risultati ottenuti, saper fornire delle raccomandazioni sulla base degli stessi risultati.

In questa fase vengono analizzati in maniera critica i risultati delle fasi precedenti (sarebbe opportuno interpretare i dati ottenuti al termine di ciascuna fase) ed identificate le componenti del sistema in cui possono essere apportati dei cambiamenti al fine di ridurre l'impatto ambientale dei processi considerati, coerentemente con gli obiettivi prefissati.

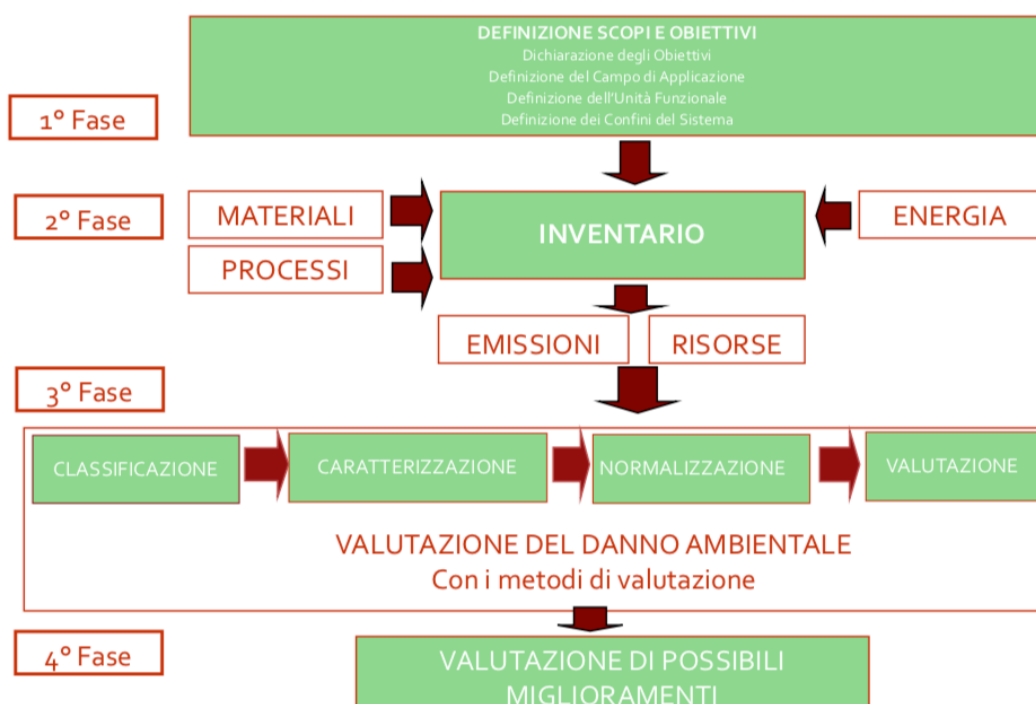


Figura 5.3: Schema riassuntivo della metodologia LCA

## Capitolo 6 IL CASO STUDIO

### 6.1 Descrizione dell'area oggetto di studio

Il sito oggetto dello studio è costituito da un'ex-discardica di residui oleosi depositati negli anni passati all'interno della Raffineria di Gela (CL), ex-discardica petrolifera. L'attività di bonifica è effettuata mediante la tecnologia di desorbimento termico in situ, ISTD (*In-Situ Thermal Desorption*) con lo scopo di rendere il terreno idoneo ad ospitare futuri nuovi impianti di trattamento.

La contaminazione del sito, che interessa uno spessore medio di terreno insaturo al di sotto del fondo della vasca pari a  $\approx 4$  m dal piano campagna, riguarda idrocarburi leggeri e pesanti, benzene, idrocarburi policiclici aromatici, composti clorurati, tra cui clorometano, cloruro di vinile, 1,2 dicloroetano e mercurio.

L'estensione totale dell'area è di circa  $8.400 \text{ m}^2$  e può essere schematizzata come un rettangolo coi lati Nord e Sud di lunghezza pari a circa 53 metri e quelli Est ed Ovest di circa 60 metri.

Il volume di terreno insaturo risulta suddiviso da un sistema di palancole in due porzioni, A e B ed in n. 24 lotti/batch:

- Zona A, n. 12 lotti di superficie media pari a  $\approx 290 \text{ m}^2$
- Zona B, n. 12 lotti di superficie compresa tra  $228 \text{ m}^2$  e  $400 \text{ m}^2$

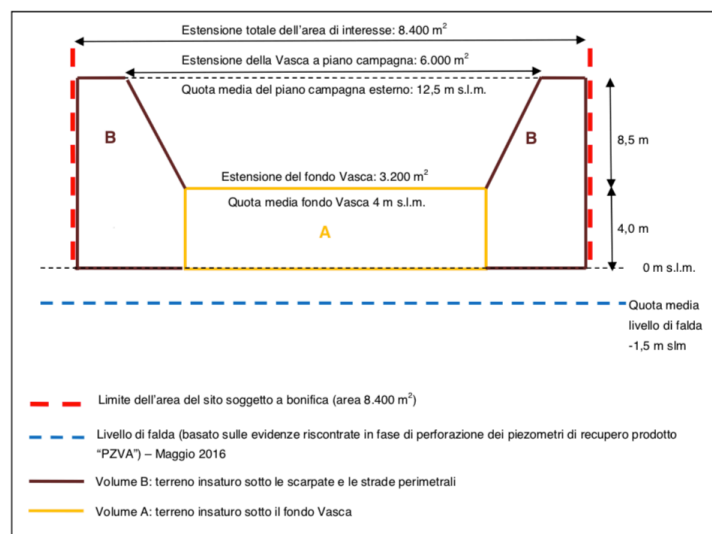


Figura 6.1: Rappresentazione schematica dell'area oggetto di studio

La falda si attesta alla quota di -1,50 m s.l.m. (anche) a causa della depressione indotta dai pozzi barriera posti immediatamente a valle della Vasca.

Il trattamento di bonifica pilota è avvenuto all'interno della zona A (lotto A1), è iniziato il 20 settembre 2017 ed è terminato il 13 dicembre 2017.

Tabella 6.1: Caratteristiche del lotto pilota (A1).

Lotto A1	
Area del suolo inquinato	304 m <sup>2</sup>
Profondità del trattamento	+4,5 mslm
Volume	1605,12 m <sup>3</sup>
Massa	2889,2 t
Profondità falda acquifera	-1,60 mslm

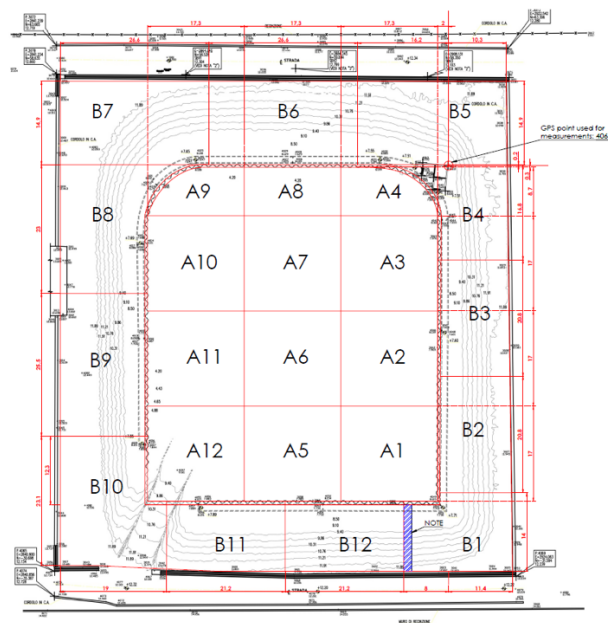


Figura 6.2: Suddivisione dell'area oggetto di bonifica in lotti omogenei per caratteristiche e volumi.

## 6.2 Applicazione della tecnologia

La tecnologia ISTD (dettagliatamente spiegata al “Capitolo 2 - DESORBIMENTO TERMICO) è un metodo di trattamento in situ in cui il terreno contaminato viene riscaldato per conduzione termica.

Il riscaldamento del suolo del caso studio viene eseguito attraverso bruciatori a gas denominati “*Smart-Burners*®” installati su n.143 tubazioni verticali infisse nel terreno. In corrispondenza di ciascun elemento scaldante sono stati installati tubi fessurati che con n. 24 condotte posizionate in corrispondenza dei punti più distanti, anche detti “punti freddi”, vengono utilizzati per l’aspirazione e l’estrazione dei contaminanti vaporizzati, mediante l’impianto *Soil Vapour Extraction* (SVE) e con un’unità di trattamento vapori opportunamente dimensionati.

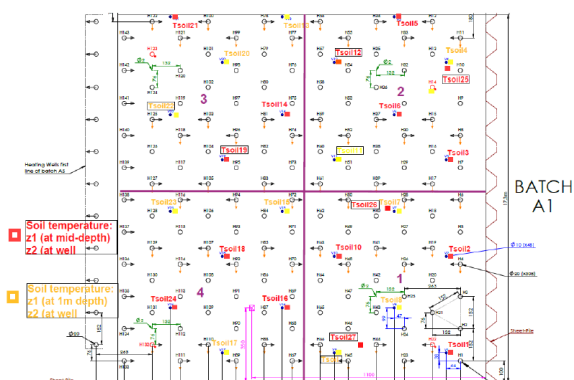


Figura 6.4: Schema di posizionamento di *Smart Burners*® e tubi di aspirazione dei vapori.

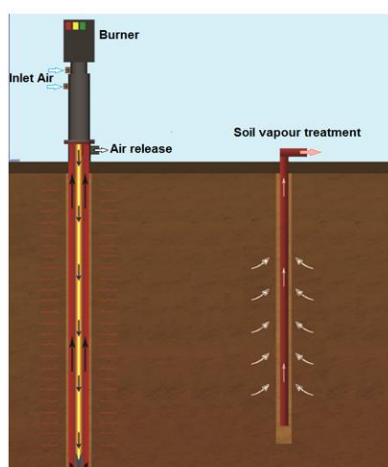


Figura 6.3: Raffigurazione di *Smart Burners*® montato in testa ad un tubo scaldante e tubo di estrazione dei contaminanti volatilizzati situato nel "punto freddo".

Il monitoraggio del sistema e l'andamento delle temperature avvengono attraverso n. 4 punti di misura nel suolo e n. 48 termocoppie ubicate a differenti profondità.

I gas esausti dei bruciatori sono aspirati utilizzando un ventilatore ed un circuito indipendente rispetto a quello dei vapori contaminati estratti dal suolo.

Il sistema di trattamento vapori, *Vapour Treatment Unit* (VTU), è composto da una sezione di abbattimento dei vapori di tipo fisico che permette di trattare tutti i contaminanti organici ed il mercurio mediante condensazione ed adsorbimento su filtri a carbone attivo, zeoliti e riduzione catalitica, in funzione per l'intera durata del processo di bonifica, 24h/24h (Figura 6.5).

La portata massima dell'impianto di trattamento vapori è di 2.000 m<sup>3</sup>/h.

I gas interstiziali estratti dovranno essere inviati ad un separatore di condensa, a monte della soffiante, che separa l'acqua estratta con i vapori, la quale è raccolta e inviata al trattamento presso l'unità di Trattamento Acque Superficiali (TAS) di Raffineria.

A valle della soffiante il flusso gassoso viene convogliato alla sezione di abbattimento criogenica e i contaminati vengono condensati e separati dal flusso per poi essere inviati al TAS o a recupero nel ciclo di raffineria.

A valle della sezione criogenica è presente un adsorbitore rigenerativo, per separare eventuali contaminanti residui, e quindi una sezione di filtrazione su carboni attivi di sicurezza prima dell'invio al camino.

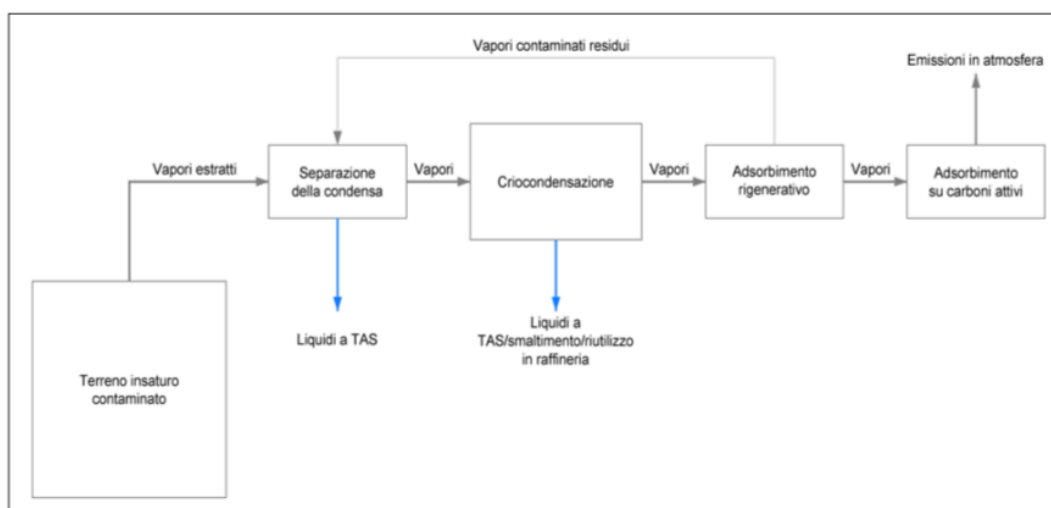


Figura 6.5: Schema trattamento emissioni

Il sistema di bonifica presenta anche un sistema automatico, costituito da un sistema *Dual Pump* in emungimento all'interno della vasca e un sistema di disoleazione, per garantire un adeguato abbassamento del livello di falda al di sotto dei volumi di terreno sottoposti a bonifica al fine di impedire effetti di ri-contaminazione per risalita capillare di prodotto, al termine delle operazioni di bonifica, in funzione per l'intera durata del processo di bonifica 24h/24h.

### 6.3 Monitoraggio dei contaminanti e collaudo

L'andamento della bonifica e l'efficacia del trattamento vengono monitorati mediante un protocollo di monitoraggio che prevede la misura della temperatura mediante le termocoppie installate nel terreno, la misura delle concentrazioni di monossido di carbonio, e dei composti organici volatili-semivolatili e del mercurio nei gas estratti a monte dell'impianto di trattamento vapori finale, finalizzato al rispetto delle emissioni in atmosfera.

In particolare, dovranno essere monitorate:

- Temperatura: termocoppie, installate nel terreno in corrispondenza dei "punti freddi" e a differenti profondità, verificano il raggiungimento della temperatura di progetto.

- Monossido di carbonio, i composti organici volatili e semivolatili e mercurio: nei vapori estratti e nei punti di monitoraggio per verificare l'efficacia del trattamento e per indicare il raggiungimento del termine del trattamento.

Il punto di scarico dell'impianto di trattamento vapori è il camino a valle dei filtri a carbone attivo.

Le emissioni in atmosfera provenienti dal camino di scarico sono analizzate periodicamente: vengono ricercate e misurate le concentrazioni di NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, e TOC che verranno confrontati con i rispettivi limiti normativi previsti dal D. Lgs. 152/06, parte V, Allegato 1, per gli impianti di combustione con potenza termica nominale inferiore a 50 MW ed integrati, per le sostanze per cui non sono stabiliti valori di emissione nella parte III, con i limiti previsti nella parte II dell'Allegato 1 medesimo.

Il monitoraggio avviene in campo mediante strumentazione portatile installata in configurazione fissa.

Lo strumento di misura di campo esegue misure ogni 5 – 15 minuti e sono registrate nella memoria dello strumento.

I contaminati indice della contaminazione saranno campionati mediante adsorbimento su fiala a carboni attivi ed analizzati in laboratorio.

Gli stessi parametri saranno monitorati anche sulla corrente gassosa in ingresso all'impianto di trattamento (*IN & OUT*).

Il trattamento di riscaldamento del terreno termina quando si ottiene una temperatura minima di 200°C nei “punti freddi” e viene mantenuta per 20 giorni oppure quando si raggiunge una temperatura di 250°C negli stessi punti ed il suo mantenimento per 3 giorni e quando un ulteriore prolungamento del trattamento non determina incrementi significativi di vapori estratti.



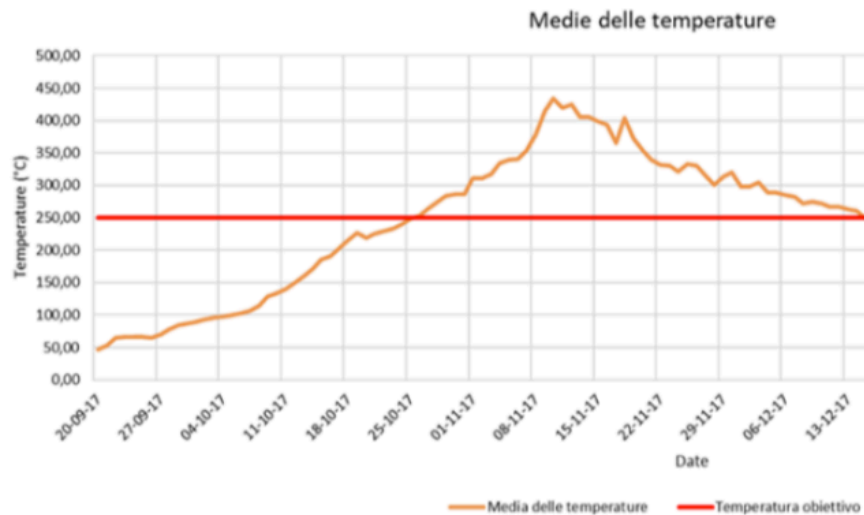


Figura 6.6: Andamento delle temperature durante il trattamento di bonifica del lotto pilota A1.

Il prelievo dei campioni di terreno per il collaudo degli interventi di bonifica in situ viene eseguito quando i monitoraggi confermano l'effettivo raggiungimento di temperature prossime a quelle naturali o, comunque, sufficientemente basse da permettere l'esecuzione dei sondaggi.

La metodologia di campionamento utilizzata è uguale per ciascuno lotto, con delle piccole divergenze a seconda che si trovi all'interno o all'esterno della "vasca".

Per il lotto pilota A1, come per ciascun lotto successivo, sono effettuati n°2 sondaggi ubicati in prossimità di "punti freddi", concordandone preliminarmente la posizione con gli Enti di controllo.

Per il lotto in esame, A1, e per tutti gli altri lotti interni alla "vasca", sono prelevati i seguenti campioni di terreno insaturo:

1. Superficiale: prelevato nel primo metro di terreno trattato (a circa 3-4 m s.l.m.);
2. Intermedio: prelevato a circa 10 m da p.c. esterno alla Vasca (a circa 1,5-2,5 m s.l.m.);
3. Profondo: in prossimità dell'ultimo metro limite di trattamento (da +1 a 0 m s.l.m.).

I sondaggi di collaudo sono eseguiti a carotaggio continuo, con recupero totale della carota di terreno attraversato, utilizzando un carotiere con diametro minimo di 101mm.

La perforazione è eseguita a secco, senza l'ausilio di fluidi di perforazione, in modo da eliminare il rischio di dilavamento dei materiali attraversati e per non inficiare la rappresentatività dei campioni prelevati.

I fori di sondaggio saranno sostenuti per mezzo di una tubazione metallica di rivestimento che sarà installato a rotazione, limitando al massimo l'uso di fluidi di circolazione.

Su apposito modulo di campo saranno annotate le informazioni relative al punto di collaudo indicando il lotto di esecuzione del sondaggio, la data, la profondità di prelievo dei campioni e loro identificativo ed eventuali evidenze rilevanti riscontrate in fase di esecuzione del sondaggio e prelievo del campione.

#### **6.4 Risultati del monitoraggio**

Sulla base dell'elaborazione dei dati riferiti alle misure dirette e indirette durante il trattamento del primo lotto, A1, e del collaudo finale di verifica, i risultati hanno mostrato valori di concentrazione dei COCs al di sotto dei valori obiettivo confermando il raggiungimento degli obiettivi di bonifica.

La rimozione dei contaminanti nella matrice del suolo ha permesso di raggiungere concentrazioni residue ben al di sotto delle soglie obiettivo, con valori quasi sempre sotto il limite di rilevabilità.

Il collaudo finale inoltre ha mostrato coerenza con i dati del monitoraggio: in corrispondenza del raggiungimento della temperatura obiettivo è stata evidenziata la massima estrazione dei vapori e quindi la completa rimozione dei contaminanti nel sottosuolo.

Tabella 6.2: Concentrazioni di contaminanti nel volume A PRIMA della bonifica.

Contaminanti	Concentrazione media (mg/kg)	Concentrazione massima (mg/kg)	Obiettivi di bonifica (mg/kg)
IDROCARBURI <= C12	3610	26600	250
IDROCARBURI > C12	19745	130000	750
BENZENE	44	720	2
ETILBENZENE	48	352	50
STIRENE	12	140	50
TOLUENE	77	680	50
XILENI	140	1000	50
COMPOSTI AROMATICI TOTALI	275	2058	100
BENZO (a) ANTRACENE	7	82	10
BENZO (a) PIRENE	4,0	57	10
BENZO (b) FLUORANTENE	2,1	33	10
BENZO (g,h,i) PERILENE	0,9	9	10
BENZO (k) FLUORANTENE	0,7	9	10
CRISENE	7	74	50
DIBENZO (a,e) PIRENE	0,3	3	10
DIBENZO (a,h) ANTRACENE	0,5	5	10
DIBENZO (a,h) PIRENE	0,1	1	10
DIBENZO (a, i) PIRENE	0,2	2	10
DIBENZO (a,l) PIRENE	0,3	4	10
INDENO (1,2,3-cd) PIRENE	0,7	10	5
PIRENE	19	196	50
IPA TOTALI	41	485	100
CLOROMETANO (CLORURO DI METILE)	31	166	6,1
CLORURO DI VINILE	2,3	29	1,3
1,2-DICLOROETANO (DCA)	48	730	0,46
MERCURIO	12	42	-

Tabella 6.3: Concentrazioni di contaminanti DOPO la bonifica.

**DOPO IL TRATTAMENTO**

*Campionamenti intermedi di verifica  
(Hot sampling)*

*Collaudo ufficiale in presenza degli  
Enti di controllo – ARPA SICILIA*

Contaminanti (mg/kg)	Obiettivi di bonifica mg/kg	Risultati del campionamento del 03/11				COLLAUDO UFFICIALE 17/01/2018		
		S2 - 1,5 m	SA1 0,1-1,1 m	SA1 2-3 m	SA1 4-5 m	0-1 m	2-3m	4-5m
IDROCARBURI <=12	250	<4	< 0.14	< 0.12	< 0.12	<10	<10	<10
IDROCARBURI >=12	750	<4	7,4	< 2.3	320	<40	48	<40
BENZENE	2	0,07	0,0062	0,0041	0,0085	<0.02	<0.02	<0.02
ETILBENZENE	50	0,35	< 0.0033	< 0.0028	< 0.0028	<0.05	<0.02	<0.02
STIRENE	50	<0,05	< 0.0033	< 0.0028	< 0.0028	<0.02	<0.02	<0.02
TOULENE	50	0,11	< 0.0033	< 0.0028	0,0038	<0.5	<0.5	<0.5
XILENI	50	<0,10	< 0.0067	< 0.0056	< 0.0055	<1.5	<1.5	<1.5
COMPOSTI AROMATICI TOTALI	100		< 0.0067	< 0.0056	0,0038	<0.2	<0.2	<0.2
BENZO (a) ANTRACENE	10	<0,05	0,061	0,008	0,28	<1	<1	<1
BENZO (a) PIRENE	10	<0,05	0,017	0,0034	0,15	<1	<1	<1
BENZO (b) FLUORANTENE	10	<0,05	0,023	0,0022	0,049	<1	<1	<1
BENZO (g,h,i) PERILENE	10	<0,05	0,023	0,0024	0,027	<1	<1	<1
BENZO (k) FLUORANTENE	10	<0,05	0,02	0,0015	0,039	<1	<1	<1
CRISENE	50	0,07	0,16	0,02	0,3	<1	<1	<1
DIBENZO (a,e) PIRENE	10	<0,05	0,003	< 0.00047	0,0098	<1	<1	<1
DIBENZO (a,h) ANTRACENE	10	<0,05	< 0.0023	< 0.00047	< 0.0047	<1	<1	<1
DIBENZO (a,h) PIRENE	10	<0,05	< 0.0023	< 0.00047	< 0.0047	<1	<1	<1
DIBENZO (a, i) PIRENE	10	<0,05	< 0.0023	< 0.00047	< 0.0047	<1	<1	<1
DIBENZO (a,l) PIRENE	10	<0,05	< 0.0023	< 0.00047	< 0.0047	<1	<1	<1
INDENO (1,2,3-cd) PIRENE	5	<0,05	0,0067	0,0074	0,021	<1	<1	<1
PIRENE	50	0,11	0,08	0,013	0,55	<1	<1	<1
IPA TOTALI	100	0,18	0,39	0,05	1,43	<10	<10	<10
CLOROMETANO (CLORURO DI METILE)	6,1	<0,05	< 0.0033	< 0.0028	< 0.0028	<0.02	<0.02	<0.02
CLORURO DI VINILE	1,3	<0,02	< 0.00067	< 0.00056	< 0.00055	<0.01	<0.01	<0.01
1,2-DICLOROETANO (DCA)	0,46	<0,05	< 0.00067	< 0.00056	< 0.00055	<0.2	<0.2	<0.2
MERCURIO	-	<0,05	< 0.095	< 0.10	< 0.11	<0.02	<0.03	<0.03

Sulla base dell'elaborazione dei dati riferiti alle misure dirette e indirette durante il trattamento dei lotti e del collaudo finale di verifica (campionamento e analisi dei terreni a diverse profondità), i risultati hanno mostrato valori di concentrazione dei COCs al di sotto dei valori obiettivo, confermando il raggiungimento degli obiettivi di bonifica.

## Capitolo 7

# LCA APPLICATO AL CASO STUDIO

Sulla base della pubblicazione delle norme ISO 14040, appartenenti alla più generale serie ISO 14000 sulla gestione ambientale, recepita in Italia dall'Ente Nazionale di Unificazione UNI<sup>a</sup>, la procedura LCA si compone di 4 fasi.

### *Definizione degli scopi e degli obiettivi*

È la fase preliminare in cui vengono definiti le finalità dello studio, l'unità funzionale, i confini del sistema studiato, il fabbisogno e l'affidabilità dei dati, le assunzioni e i limiti.

Si è deciso di suddividere il processo di bonifica, individuando i flussi di materia ed energia in ingresso ed in uscita, in 4 fasi temporali:

1. Preparazione ed allestimento,
2. *Start-up*,
3. Bonifica
4. Dismissione.

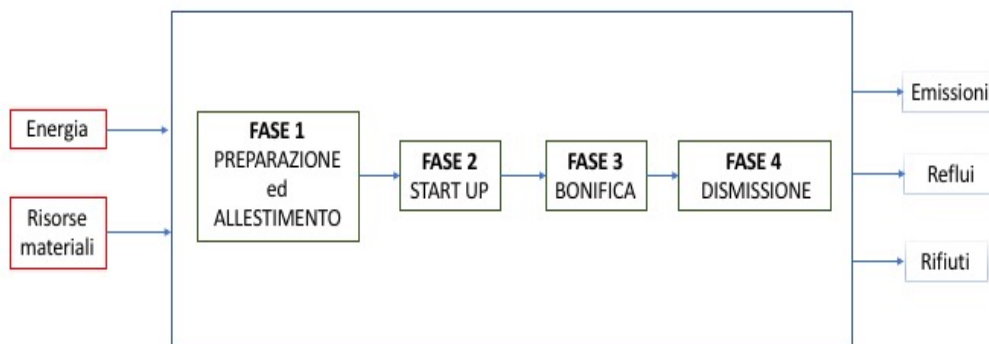


Figura 7.1: Schema suddivisione temporale della bonifica.

I destinatari dello studio sono le aziende che attuano la bonifica stessa con lo scopo di poter individuare le fasi che eventualmente possano essere modificate per conferire una maggiore sostenibilità ambientale all'intero processo.

I confini del sistema sono raffigurati in Figura 7.2 e racchiudono l'intero processo di bonifica, con un approccio "*from cradle to grave*".

Viene definita come unità funzionale il lotto A5, ricordando l'omogeneità tra tutti i lotti A interni alla vasca, quindi, tutti i dati in ingresso ed in uscita dal sistema sono riferiti ad esso.

Si assume che:

- L'acqua potabile utilizzata durante alcune perforazioni è di quantità non significativa ai fini dello studio;
- L'impatto associato al catalizzatore, ai carboni attivi e alle zeoliti non influenzi il carico ambientale in quanto al termine del trattamento non raggiungono i fine vita e le loro proprietà li rendono ancora utilizzabili per ulteriori futuri trattamenti;
- Il terreno di risulta dei sondaggi ha quantità non significative ai fini dello studio;
- L'olio proveniente dalla disoleazione e dal recupero del surnatante viene inviato ai cicli produttivi della raffineria di proprietà del cliente dove viene completamente riutilizzato;
- Le acque di risulta dal pompaggio e dalla separazione dei condensati provenienti dal trattamento delle emissioni e dal sistema *Dual Pump* vengono inviate all'impianto di trattamento TAS della Raffineria e successivamente riutilizzate in un sistema di cogenerazione energetica;
- Le acque reflue (sottoposte a evaporazione e biodegradazione) provenienti dalla logistica vengono raccolte in una vasca Imhoff con capacità 5000 litri e svuotata ogni 4 anni, i rifiuti provenienti dalla stessa sono di quantità non significative;
- Al termine del trattamento del lotto descritto, i tubi in acciaio per scaldare il terreno e necessari all'aspirazione dei fumi, insieme a raccordi, guarnizioni e valvole vengono riutilizzati per trattamenti successivi;

si è deciso, quindi, di comprenderli all'interno dei confini del sistema assumendo un valore pari a 0, che ci consenta di mantenere condizioni conservative in termini di impatto ambientale prodotto.

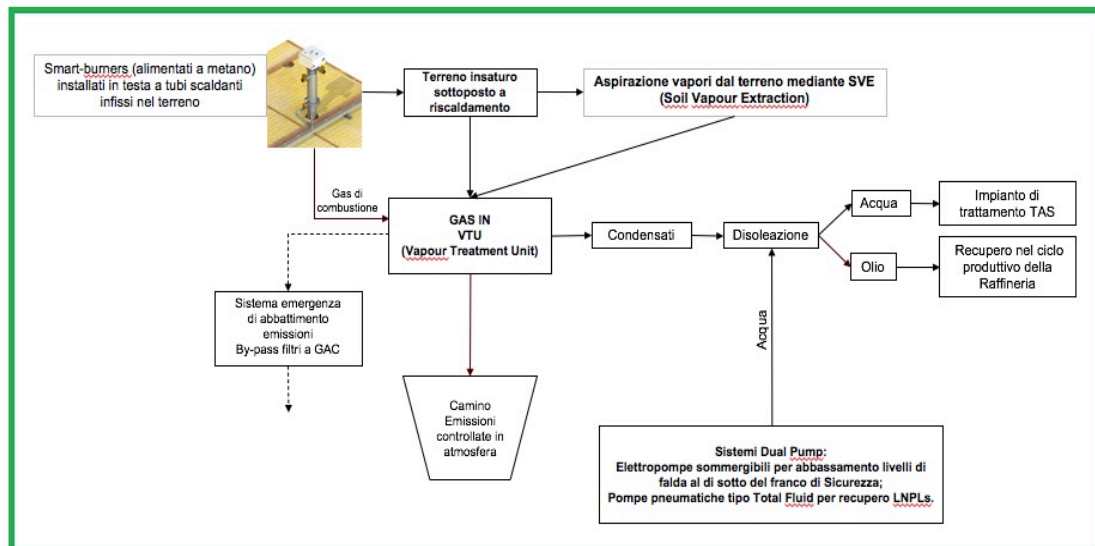


Figura 7.2: Confini del sistema semplificato

### ***Preparazione ed allestimento***

Il terreno sottoposto a bonifica è stato suddiviso in lotti di superficie  $\sim 300 \text{ m}^2$  ciascuno.

Vengono eseguite perforazioni per l'inserimento di tubi scaldanti in acciaio aventi in testa bruciatori a metano, *Smart Burners*<sup>®</sup> ed intervallati da sonde di aspirazione dei vapori.

Le perforazioni avvengono mediante sonde idrauliche alimentate da motori a gasolio e fluidi idraulici che ne permettono l'avanzamento.

Il terreno perforato viene movimentato con carrelli elevatori e trasportato con autocarri al deposito della Raffineria dove verrà trattato.

Le attrezzature vengono decontaminate con acqua potabile.

La superficie di ogni lotto viene ricoperta con una soletta in calcestruzzo e con pannelli di lana di roccia aventi lo scopo di limitare la dispersione termica.

Al termine del processo, il calcestruzzo e la lana di roccia saranno rimossi e smaltiti, insieme al terreno derivante dalle perforazioni.

Gli *Smart Burners*<sup>®</sup> con relativi *piping* e collegamento elettrico permettono il riscaldamento del terreno fino a temperature  $> 500$  °C che determinano la volatilizzazione delle sostanze idrocarburiche.

Per il corretto svolgimento della bonifica si rendono necessari una serie di *facilities* quali uffici, servizi igienici, area cantiere ed officine richiedenti metano, energia elettrica ed acqua ed i cui flussi in uscita sono relativi ai rifiuti prodotti ed alle acque di scarico dei servizi (docce e wc).

Il tempo necessario alla fase di preparazione (Figura 7.3) del sito è stimato intorno ai 35 giorni di cui 15 sono necessari alla sola perforazione del terreno.



Figura 7.3: Confini del sistema Preparazione e Allestimento (Fase 1)

### ***Start-Up***

La fase di *start-up* (Figura 7.4) è relativa al collaudo e alla verifica del funzionamento dell'impianto.

Si è deciso di accorpare la fase di *start-up* alla fase di bonifica dato l'ugual funzionamento.

La durata è di circa 7 giorni.



## ***Bonifica***

Gli *Smart Burners*<sup>®</sup> riscaldano il terreno fino a temperature > 500 °C che determinano la volatilizzazione delle sostanze idrocarburiche.

Per il processo di bonifica si rende necessario il sistema *Soil Vapour Extraction* (SVE), responsabile dell'aspirazione delle sostanze idrocarburiche volatilizzate che vengono successivamente trattate all'interno dell'unità *Vapour Treatment Unit* (VTU).

Il sistema SVE sfruttando energia elettrica opera attraverso differenti stadi:

- Raffreddamento mediante n. 2 scambiatori di calore in linea che permettono l'abbattimento delle temperature dei gas in ingresso da ~ 100 °C a 0 ÷ 5 °C. L'acqua degli scambiatori di calore di tipo aria-acqua, necessari per il raffreddamento e situati all'interno di un circuito chiuso, è raffreddata mediante una torre *chiller-cooler* e periodicamente ricaricata.
- Separazione dei condensati
- Filtro a coalescenza
- Filtro per mercurio a carboni
- N. 3 demister
- Riscaldatore (fino a 450 °C)
- Ossidatore catalitico
- Filtro a zeolite
- Camino.

All'interno del sistema è presente un sistema di *by-pass* composto da una batteria di filtri carboni attivi granulari (CAG), attivato solo in caso di emergenza o malfunzionamento della linea principale.

I vapori trattati vengono, infine, immessi in atmosfera, mediante un camino dotato di analizzatori in linea e punto di campionamento per la verifica dei limiti di legge dei parametri emissivi.

Il trattamento con zeoliti, carboni attivi e carboni per il mercurio, quando saturi, prevede la loro sostituzione e l'invio, di preferenza, presso impianti di rigenerazione. I condensati vengono raccolti ed inviati ad un separatore acqua-prodotto: le acque vengono inviate all'impianto di trattamento di Raffineria (TAS) ed il prodotto reimmesso nei cicli produttivi.

Contestualmente alla bonifica del terreno insaturo è installato un sistema di tipo *Dual Pump* costituito da elettropompe sommergibili e pompe pneumatiche con il duplice scopo, rispettivamente, di garantire l'abbassamento dei livelli idrici al di sotto dei terreni insaturi, oggetto di bonifica (franco previsto dal fondo dello spessore di terreno insaturo da riscaldare: 1,5 m) ed il recupero *Light Non-Aqueous Phase Liquid* (LNPLs), ossia il surnatante.

L'acqua di falda emunta, per una portata complessiva di ~72 m<sup>3</sup>/giorno, confluisce, mediante un collettore unico, ad un'unità di disoleazione a valle della quale le acque sono inviate all'impianto TAS di raffineria, assieme alle acque di recupero dei condensati.

Il prodotto, aspirato dalle pompe pneumatiche installate nei pozzi all'interfaccia acqua-olio, viene stoccato in una cisterna e, insieme al prodotto recuperato dalla separazione dei condensati, reimmesso nei cicli di Raffineria.

Come per le precedenti fasi, si affiancano, sempre, i servizi di logistica. L'operazione di bonifica (Figura 7.4) ha una durata di circa 30-35 giorni, di cui 7 relativi alla fase di start-up.

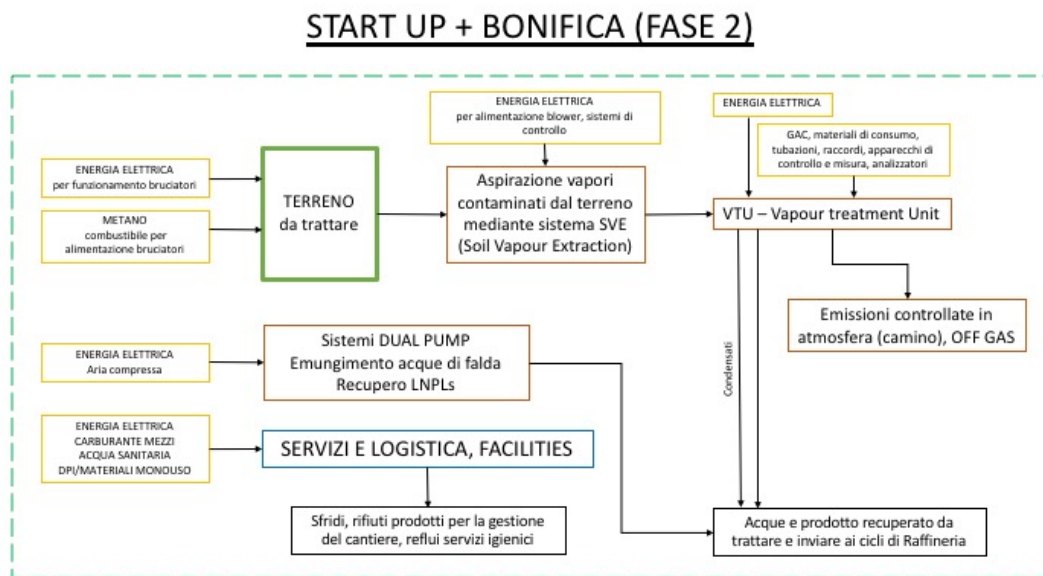


Figura 7.4: Confini del sistema Start-Up e Bonifica (Fase 2).

### ***Dismissione***

L'ultima fase temporale prevede il raffreddamento del terreno (senza uso di liquidi raffreddanti ma solo aria ambiente), un successivo collaudo con richiesta di energia elettrica e, infine, l'estrazione dei tubi di acciaio e lo smantellamento della soletta di cemento e della lana di roccia, opportunamente smaltiti presso la Raffineria.

In contemporanea, continua ad operare il sistema di trattamento delle acque di falda ed i servizi di logistica.

La fase di post-trattamento (Figura 7.5) ha una durata di circa 60 giorni.

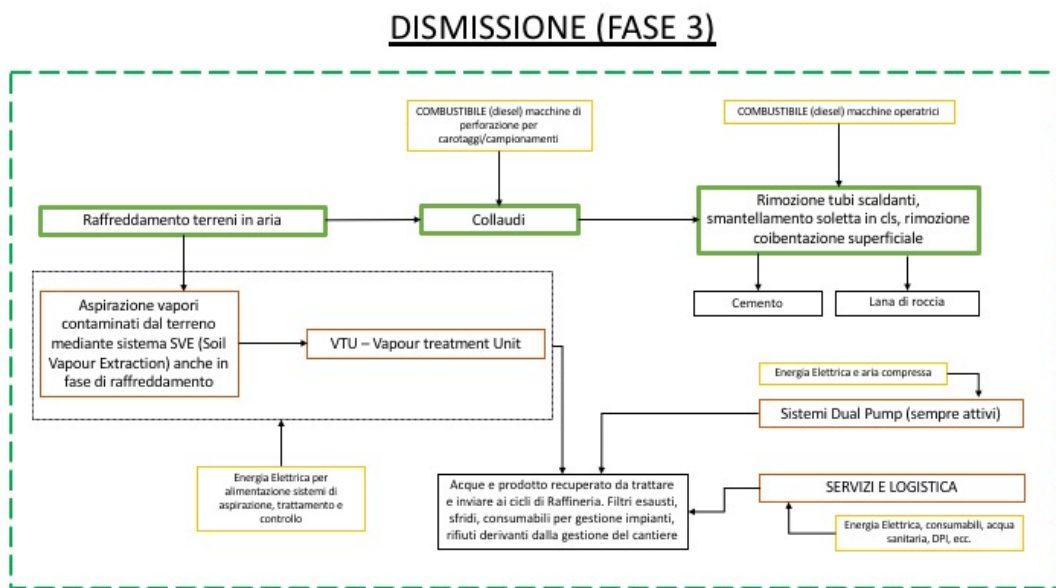


Figura 7.5: Confini del sistema Dismissione (Fase 3)

Di seguito (Figure 6.1.6-8) vengono riportati i confini del sistema relativi al “Trattamento emissioni”, “Sistema *Dual Pump*” e “Logistica”, in funzione 24h/24 per l'intera durata del processo di bonifica.

## TRATTAMENTO DELLE EMISSIONI

Fase prolungata per l'intero processo di bonifica, attivo 24h/24h

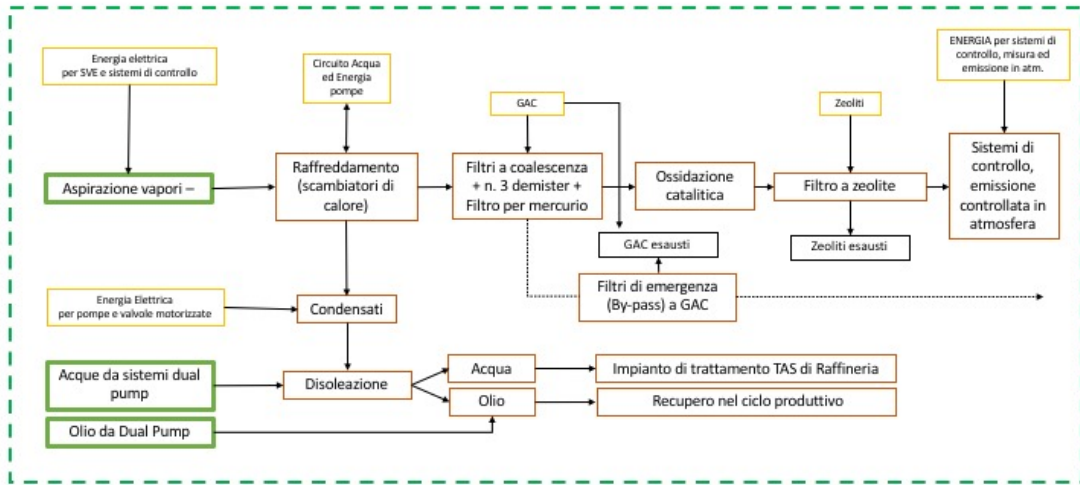


Figura 7.6: Confini del sistema del Trattamento delle emissioni (UVT)

## SISTEMA DUAL PUMP

Fase prolungata per l'intero processo di bonifica, attivo 24h/24h

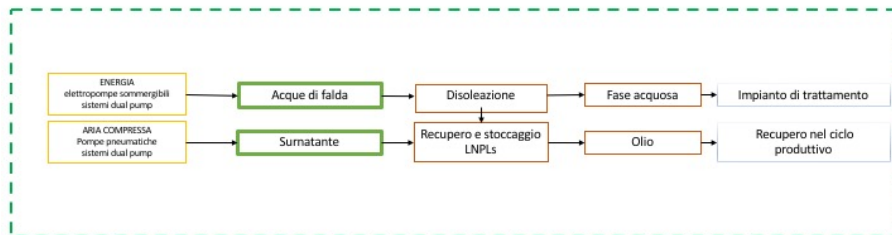


Figura 7.7: Confini del sistema del sistema Dual Pump

## LOGISTICA

Fase prolungata per l'intero processo di bonifica, attivo 24h/24h

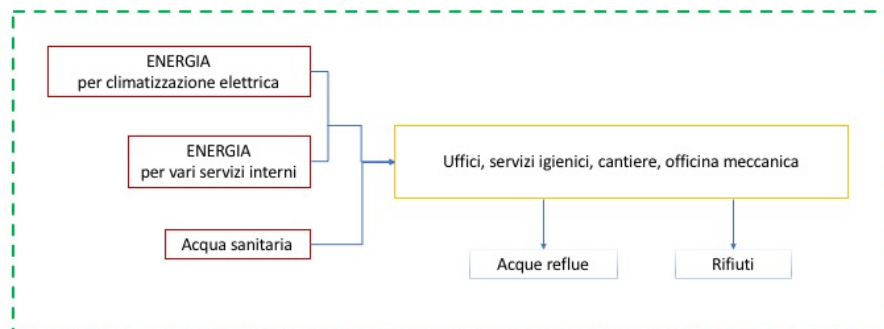


Figura 7.8: Confini del sistema della Logistica

### ***Analisi di Inventario***

L'analisi dell'inventario (LCI) è la seconda fase dell'analisi di sostenibilità ambientale, comprende la raccolta dei dati e i procedimenti di calcolo che consentono di quantificare i flussi in entrata e in uscita dal sistema.

I dati utilizzati sono misurati sul campo e rilasciati dall'azienda appaltatrice della bonifica, sono definiti, quindi, "primari" e vengono riportati all'interno della **Errore**.  
**L'origine riferimento non è stata trovata..**

Tabella 7.1: Dati primari di processo.

<b>ALLESTIMENTO E PREPARAZIONE (FASE 1)</b>			
<b><u>INPUT</u></b>	<b><u>DATO</u></b>	<b><u>OUTPUT</u></b>	<b><u>DATO</u></b>
Diesel per macchine operatrici	417 Kg		
Fluidi idraulici	18 Kg		
Cemento per soletta	50400 Kg		
Lana di roccia	175 Kg		
<b>STRAT UP + BONIFICA (FASE 2)</b>			
<b><u>INPUT</u></b>	<b><u>DATO</u></b>	<b><u>OUTPUT</u></b>	<b><u>DATO</u></b>
Energia elettrica Bruciatori	12 MW		
Energia elettrica per blower + pompe + valvole	15 MW		
Metano per bruciatori	36135 Kg		
<b>DISMISSIONE (FASE 3)</b>			
<b><u>INPUT</u></b>	<b><u>DATO</u></b>	<b><u>OUTPUT</u></b>	<b><u>DATO</u></b>
Diesel macchine operatrici	180 Kg	Cemento	50400 Kg
		Lana di roccia recuperata	123 Kg
		Lana di roccia da conferire in discarica per rifiuti pericolosi	52 Kg

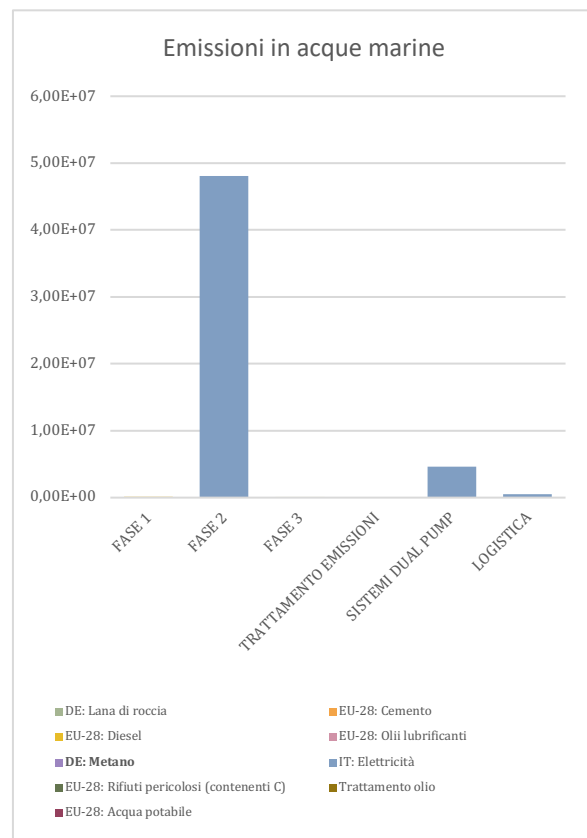
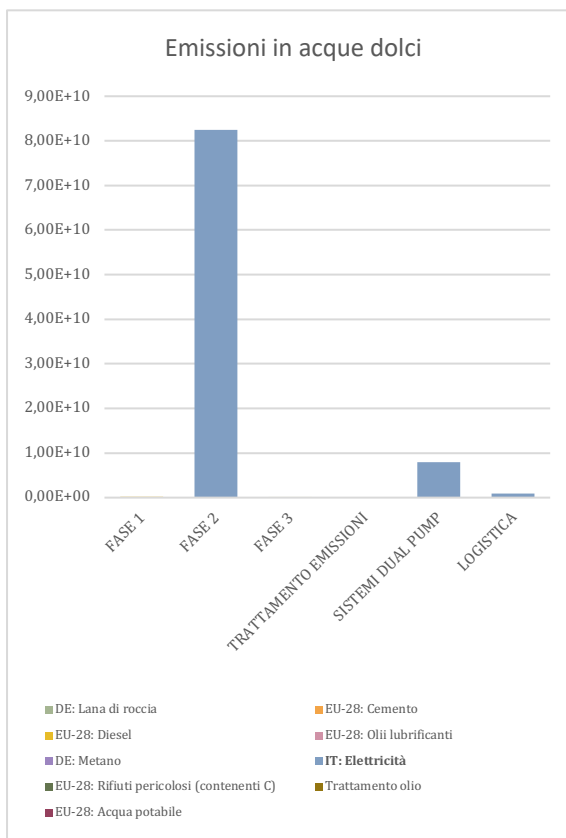
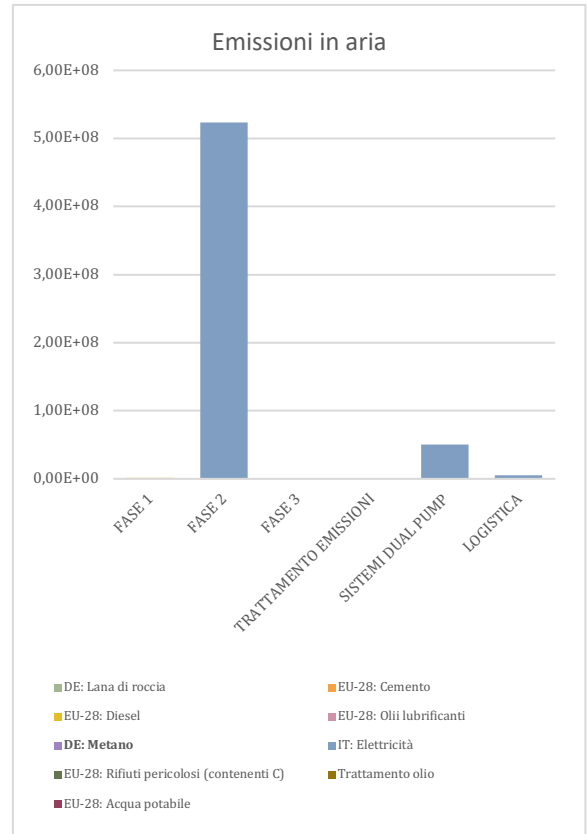
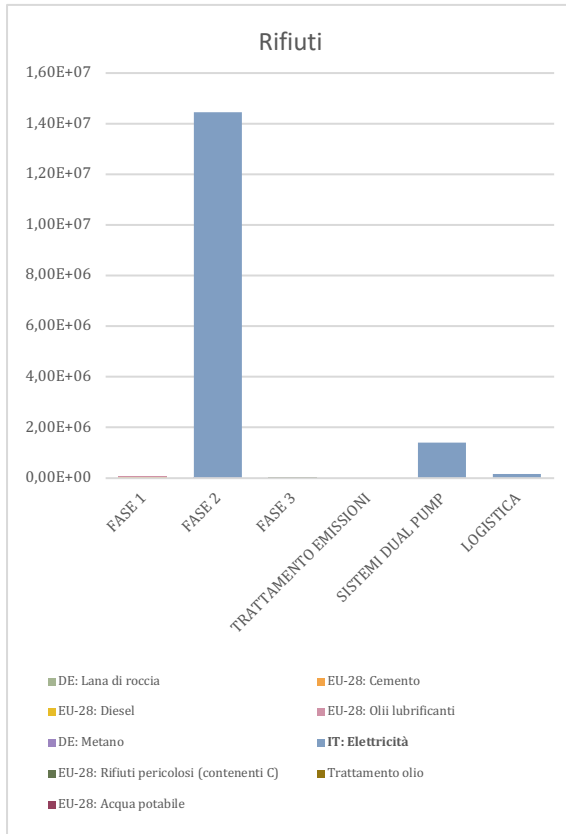
<b>TRATTAMENTO EMISSIONI (sempre in funzione)</b>			
<b><u>INPUT</u></b>	<b><u>DATO</u></b>	<b><u>OUTPUT</u></b>	<b><u>DATO</u></b>
		Acqua	130 m <sup>3</sup> /giorno
		Olio	15 m <sup>3</sup> /lotto
<b>SISTEMA DUAL PUMP (sempre in funzione)</b>			
<b><u>INPUT</u></b>	<b><u>DATO</u></b>	<b><u>OUTPUT</u></b>	<b><u>DATO</u></b>
Energia per alimentazione compressore sistemi pneumatici + elettropompe sommergibili e pompe di rilancio (Kwh)	1 MW	Acqua	73 m <sup>3</sup> /giorno
		Olio	0,6 m <sup>3</sup> /giorno
<b>LOGISTICA (sempre presente)</b>			
<b><u>INPUT</u></b>	<b><u>DATO</u></b>	<b><u>OUTPUT</u></b>	<b><u>DATO</u></b>
Energia elettrica	100 Kw	Acque reflue	5000 L
Acqua sanitaria	5000 L	Rifiuti	n.d.

Vengono riportati i dati unitari estrapolati dal software GaBi riferiti all'Unione Europea (EU-28), Germania (DE) e Italia (IT).

- DE: Metano
- DE: Lana di roccia
- EU-28: Cemento
- EU-28: Diesel
- EU-28: Rifiuti pericolosi (contenenti C)
- EU-28: Olii lubrificanti
- EU-28: Acqua potabile
- IT: Elettricità

Si è deciso di rappresentare i dati in uscita dalla fase di analisi dell'inventario attraverso grafici permettendo, così, di associare i vari flussi, in entrata ed in uscita dal processo, al consumo di risorse, ai rifiuti prodotti, alle emissioni in aria, alle emissioni in acqua dolce e in acqua marina, alle emissioni in suoli agricoli e industriali.

Nello specifico, i risultati vengono riportati nella Figura 7.9 seguente.



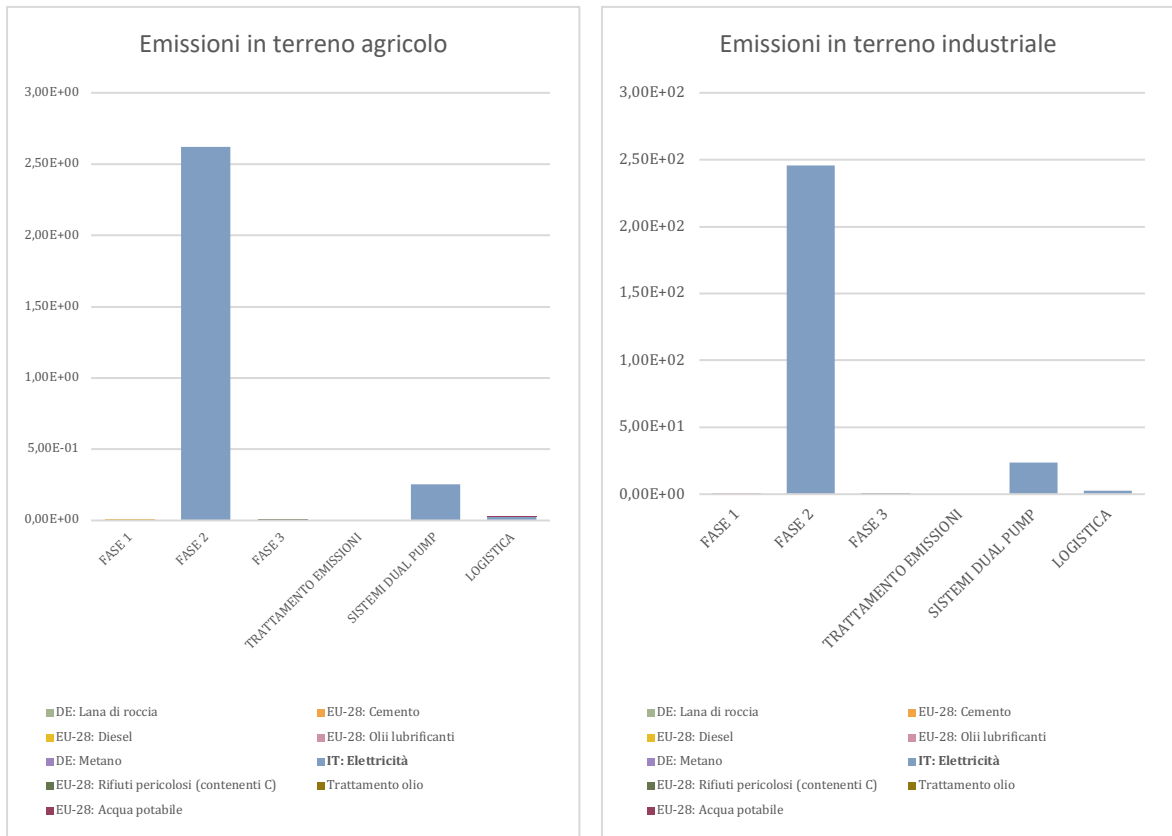


Figura 7.9: Grafici relativi alle emissioni della fase dell'inventario.

Da una prima analisi, in base ai risultati delle elaborazioni dei dati dell'inventario, è possibile notare come l'utilizzo di energia elettrica durante la fase di *start-up* e bonifica, relativa al riscaldamento del terreno attraverso *Smart Burners* per una durata di 35 giorni 24/24h e durante la fase, sempre presente, di utilizzo del sistema *Dual Pump* relativa all'emungimento dell'acqua di falda, siano le fasi causa del maggior contributo per tutte le emissioni prese in considerazione.

L'utilizzo di energia elettrica è l'unico fattore significativo in termini di emissioni rappresentando in media il 92,5% sul totale del processo.



### ***Analisi degli impatti***

L'analisi degli impatti ambientali permette di valutare gli impatti provocati dal processo o dall'attività con il fine di evidenziare l'entità delle modificazioni generate a seguito dei rilasci nell'ambiente e dei consumi di risorse calcolati nell'inventario, finalizzata, quindi, a capire e valutare l'importanza e la significatività dei potenziali impatti ambientali legati al sistema in modo da riassumerli e quantificarli, permettendo il passaggio dal dato oggettivo calcolato durante la fase di inventario al giudizio di pericolosità ambientale.

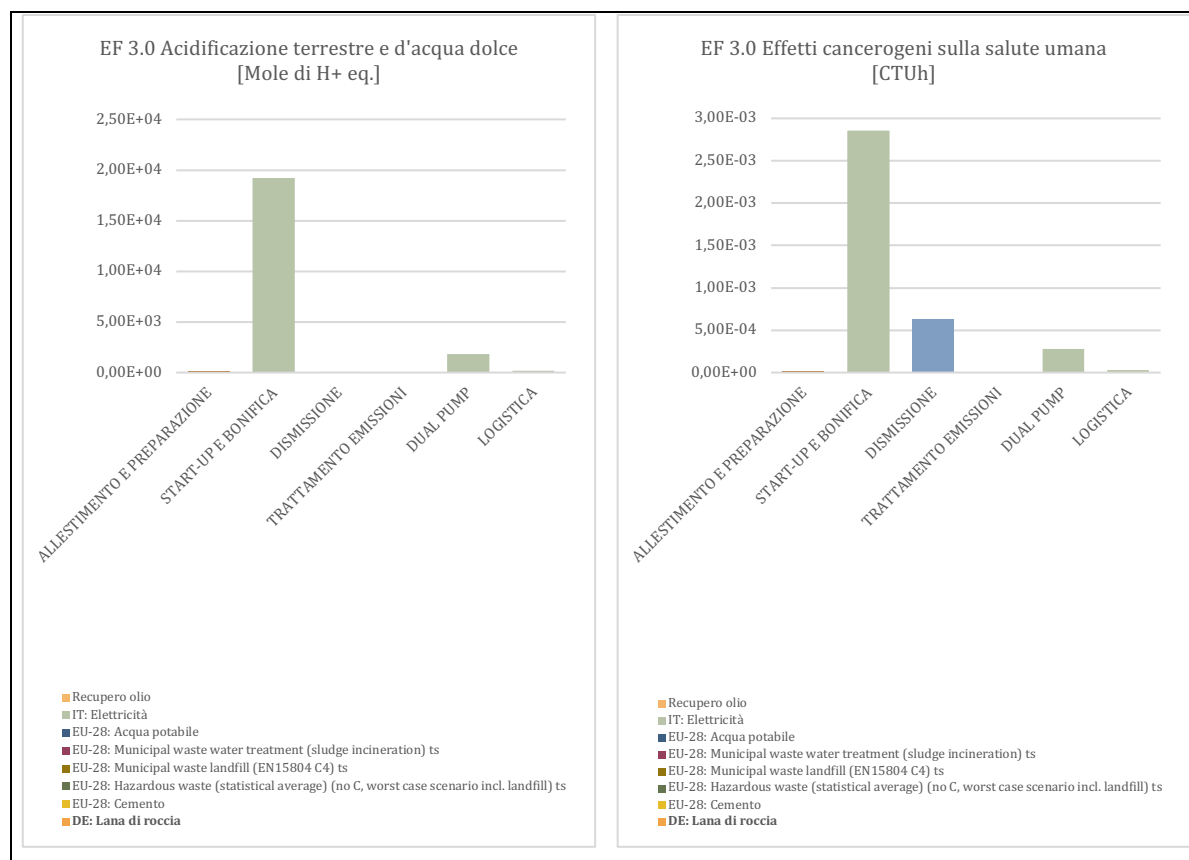
### ***Classificazione e Caratterizzazione***

Tramite la fase di classificazione i flussi di materia ed energia esaminati nell'analisi dell'inventario vengono raggruppati nelle diverse categorie ambientali impattate, misurate dagli specifici indicatori di categoria che, per questo studio, sono:

- Acidificazione terrestre e d'acqua dolce [Mole of H<sup>+</sup> eq.]
- Effetti cancerogeni sulla salute umana [CTUh]
- Cambiamento climatico [kg CO<sub>2</sub> eq.]
- Ecotossicità acque dolci [CTUe]
- Eutrofizzazione acqua dolce [kg P eq.]
- Eutrofizzazione marina [kg N eq.]
- Eutrofizzazione terrestre [Mole of N eq.]
- Radiazioni ionizzanti – Salute umana [kBq U235 eq.]
- Uso del suolo [Pt]
- Effetti non cancerogeni sulla salute umana [CTUh]
- Riduzione dell'ozono [kg CFC-11 eq.]
- Formazione fotochimica di ozono – Salute umana [kg NMVOC eq.]
- Uso delle risorse, vettori energetici [MJ]
- Uso delle risorse, minerali e metalli [kg Sb eq.]
- Inorganici respiratori [Incidenza delle malattie]
- Scarsità di acqua [m<sup>3</sup> world equiv.]

In questa sezione sono riportati i risultati delle fasi di classificazione e caratterizzazione evidenziando i contributi delle singole fasi, interne al processo, sulle diverse categorie ambientali allo scopo di identificare punti di forza e criticità.

Nella Figura 7.10 seguente vengono riportati i grafici relativi alla fase di classificazione e caratterizzazione.





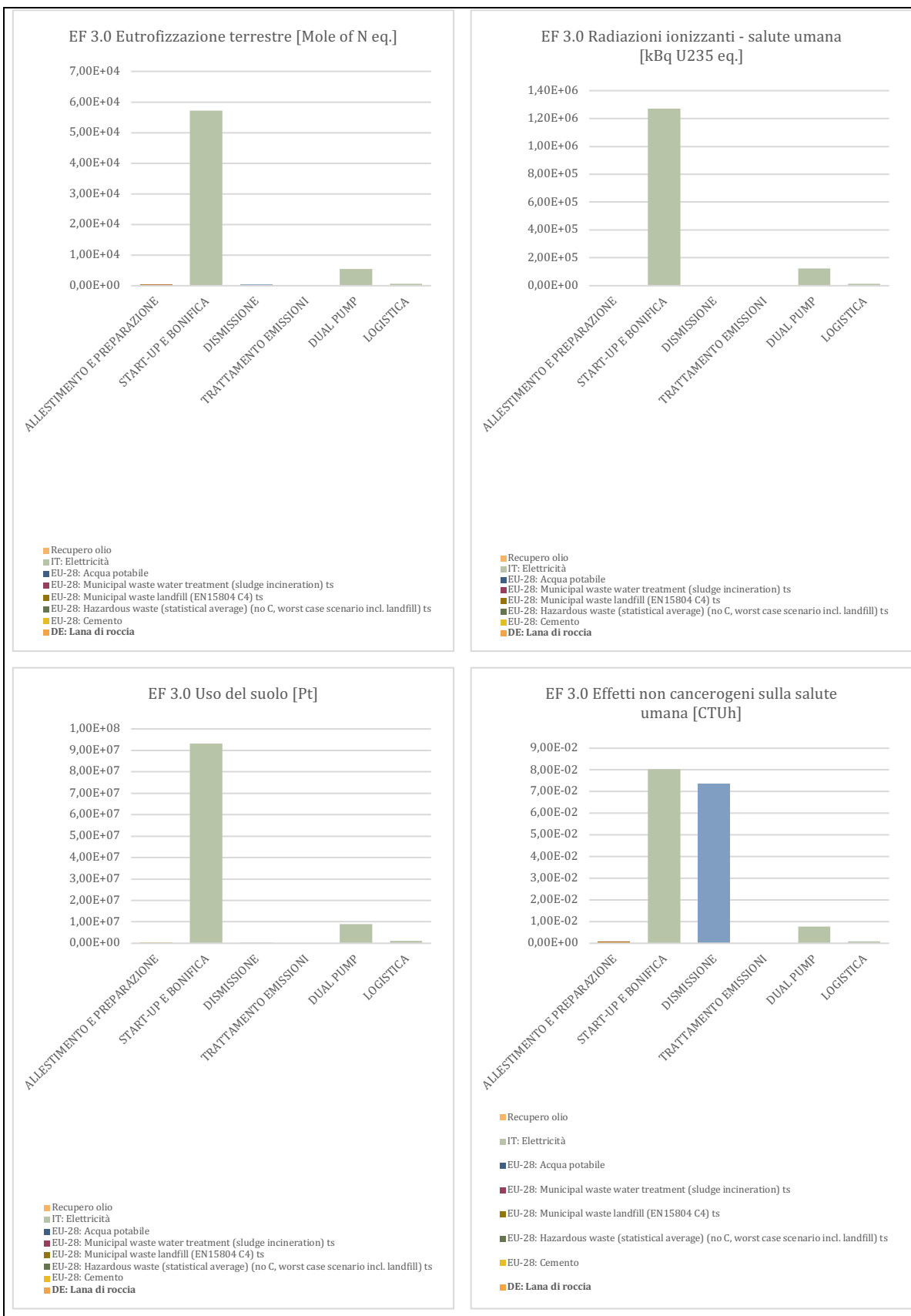






Figura 7.10: Grafici Classificazione e Caratterizzazione riferiti al lotto A5.

Dall'analisi dei risultati nelle diverse categorie di impatto, si evince che l'utilizzo di elettricità per il funzionamento dei bruciatori e di tutte le componenti che partecipano alla fase di riscaldamento del terreno, sia in assoluto la criticità principale del processo di bonifica.

### ***Normalizzazione e Pesatura***

Le fasi di normalizzazione e pesatura attribuiscono al processo un indicatore di prestazioni ambientali che rappresenta l'impronta ambientale del processo di bonifica del lotto studiato.

Tale indicatore è espresso in persone equivalenti (p.e.), ovvero come il numero di cittadini medi che generano quello stesso impatto in un anno.

Le fasi opzionali a cui abbiamo sottoposto il nostro studio mostrano un indicatore di prestazioni ambientale pari a  $1,36E+0,5$ , circa 136.000 persone equivalenti.

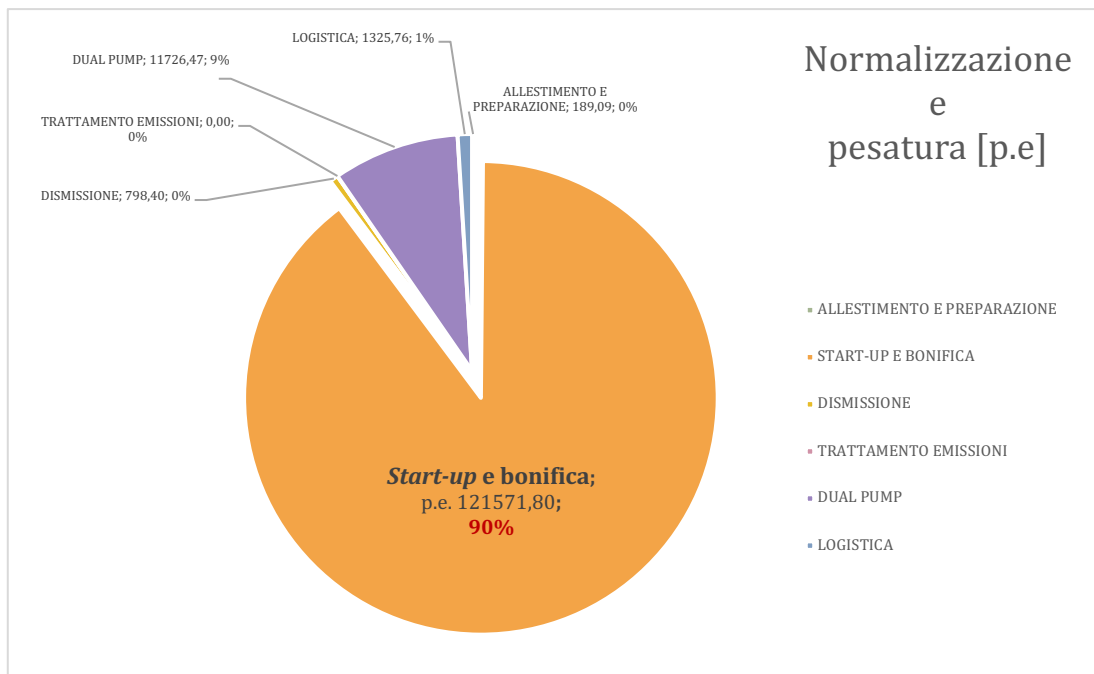


Figura 7.11: Grafico relativo alle fasi di normalizzazione e pesatura riportante il p.e. per ogni fase del processo

Il grafico in Figura 7.11 evidenzia come la fase di *start-up* e bonifica (fase 2) abbia la maggior responsabilità degli impatti, rappresentando il 90% dell'impronta ambientale complessiva a causa dell'elevata richiesta energetica necessaria per il funzionamento di *blower* e, soprattutto, dei bruciatori.

Il grafico di seguito ci permette di identificare un'ulteriore informazione riguardante le categorie di impatto più colpite (Figura 7.12).

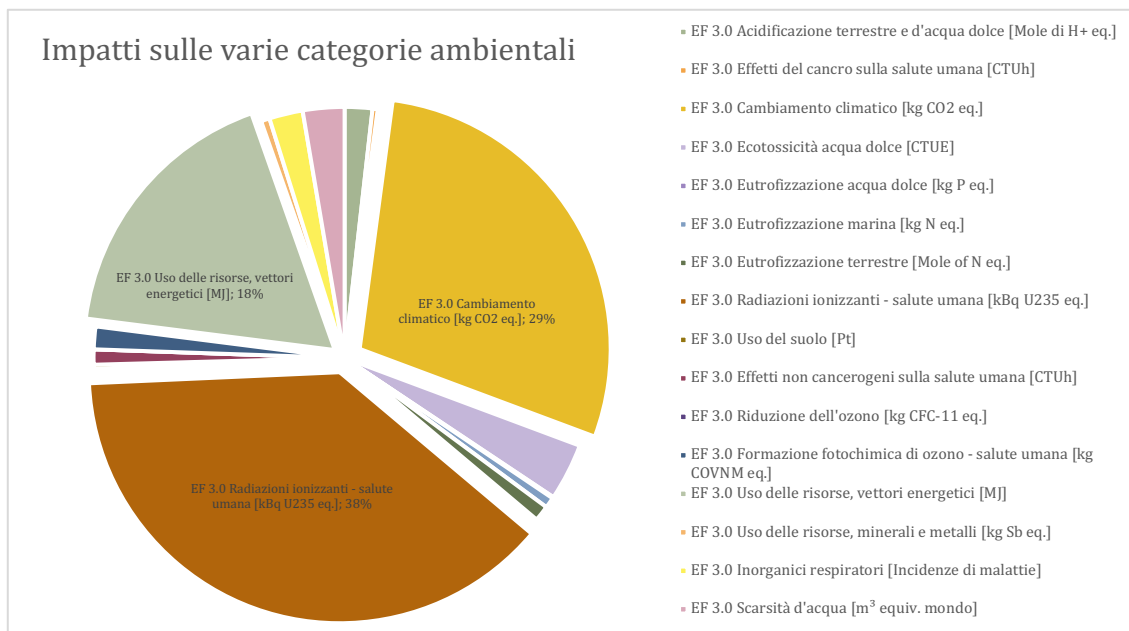


Figura 7.12: Grafico degli impatti sulle categorie ambientali

Dal grafico di Figura 7.12 si nota, come già intuibile dall'analisi dell'inventario e dalle fasi di classificazione e caratterizzazione, che il consumo energetico della fase di *start-up* e bonifica (fase) ha il peso preponderante sull'intero processo di desorbimento termico e che la categoria maggiormente impattata è per il 38% quella relativa a "Radiazioni ionizzanti - salute umana".

I risultati ottenuti trovano riscontro in letteratura scientifica in cui viene riportato che il consumo energetico è strettamente collegato con la categoria "Radiazioni ionizzanti - salute umana", infatti, questa categoria tiene conto dell'impatto sulla salute umana, che è causato da radionuclidi emessi durante la produzione di energia nucleare, ma anche dall'estrazione di oli minerali e gas utilizzati sempre per la produzione di energia (R. Frischknecht et al. 2000).

A seguire, le categorie più impattate sono "Cambiamento climatico", per il 29%, come conseguenza del processo di generazione di energia elettrica da combustibili fossili, responsabile dell'aumento della concentrazione atmosferica dei gas serra e, quindi,



dell'incremento della temperatura media della superficie terrestre, infine, per il 18 %, “Utilizzo delle risorse, vettori energetici”, ossia il semplice consumo di energia elettrica.

Nello studio è stato selezionato come dato unitario per la produzione di elettricità un mix di fonti energetiche italiane.

### ***Interpretazione e miglioramento***

L'analisi LCA condotta, unica nel suo genere perché ad oggi non era mai stato applicato uno studio di sostenibilità ambientale ad una bonifica di terreni inquinati, evidenzia un impatto ambientale legato, quasi esclusivamente, alla richiesta di energia elettrica.

L'area oggetto di analisi di sostenibilità ambientale è un caso limite che prevede un'applicazione monstre della tecnologia di desorbimento termico, dettata, oltre che dall'enorme estensione dell'area da sottoporre a bonifica, che rappresenta un unicum in Europa, anche dalle elevate concentrazioni di contaminanti inizialmente presenti che si traducono in un prolungato funzionamento della strumentazione necessaria alla bonifica con conseguente elevata richiesta energetica.

Nella maggior parte delle situazioni che richiedono una bonifica, se effettuata con desorbimento termico, possono essere utilizzati processi semplificati, senza la necessità di sistemi di aspirazione dei vapori e di impianto di recupero di prodotti e condensati.

Inoltre, nella media dei siti inquinati, si trovano concentrazioni di sostanze inquinanti decisamente inferiori rispetto a quelle presenti nel terreno sottoposto allo studio, per cui, solitamente, non sono necessari impianti di capacità così grandi come quello incluso nell'analisi del presente caso studio.

Altro parametro di cui tener conto per un discorso più generale sull'impatto dei processi di bonifica ambientale sono gli specifici inquinanti che potrebbero presentare un più basso punto di ebollizione con conseguente riduzione delle temperature richieste per la loro evaporazione.

Inoltre, la tecnologia dell'ISTD potrebbe essere abbinata ad una ossidazione chimica in situ (ISCO) e, quindi, “potenziata” attraverso l'aggiunta nel terreno di sostanze

ossidanti come perossido di idrogeno, permanganato di potassio, persolfato di sodio, ozono, permettendo di ridurre i tempi di applicazione e i consumi energetici.

La versatilità della tecnologia di desorbimento termico permette l'applicazione in modalità ex-situ od off site, che, attraverso lo scavo e la creazione di cumuli (simili a biopile) su cui introdurre gli elementi scaldanti, può minimizzare la necessità di impianti complessi.

Tutte queste osservazioni mirano a giustificare l'impatto ambientale dovuto allo specifico caso studio e consentono di valutare tutte le possibili variabili presenti nel caso di siti inquinati con caratteristiche meno limitanti.

Altro aspetto da non sottovalutare è che l'azienda appaltatrice è *leader*, a livello nazionale, del settore energetico e non riscontra problemi legati alla fornitura e che, in un contesto non industriale e senza disponibilità di energia questa applicazione sarebbe stata difficile a meno di realizzare ex novo impianti di fornitura *utilities* che avrebbero reso i costi finali insostenibili.

### **7.1 Confronto di impatti associati all'utilizzo di energia da fonte non rinnovabile e rinnovabile**

Dall'analisi di sostenibilità ambientale svolta, è emerso che la criticità maggiore relativa al processo di bonifica con desorbimento termico sia legata all'elevata richiesta di energia elettrica.

Per cercare di contrastare questa criticità, è stata condotta la stessa analisi valutando l'ipotesi di sostituzione del tradizionale mix energetico, prodotto per la maggior parte da fonti di origine non rinnovabile, con i dati relativi alla produzione di energia da fonte rinnovabile prodotta dal fotovoltaico.

Nella Figura 7.13 seguente si riporta il grafico, espresso in persone equivalenti, con il confronto degli impatti ambientali associati al processo di bonifica utilizzando energia non rinnovabile ed energia rinnovabile.

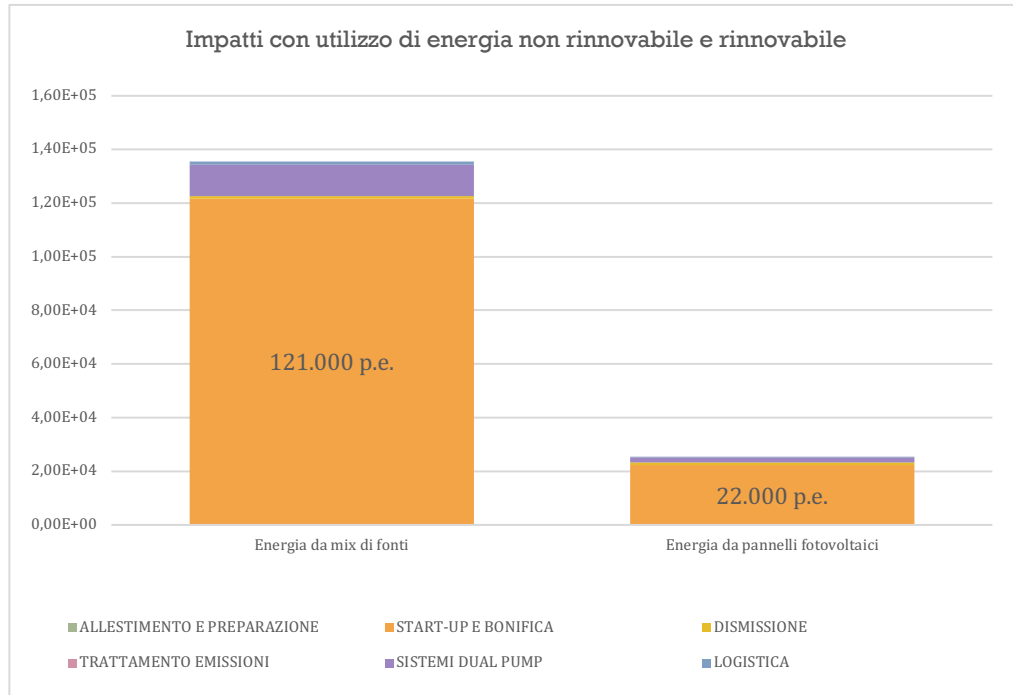


Figura 7.13: Confronto tra gli impatti derivanti dall'utilizzo di energia non rinnovabile e rinnovabile.

Il beneficio ambientale derivante dalla conversione ad energia rinnovabile risulta evidente nella Figura 7.13 e la valutazione dell'impronta ambientale ha consentito di stimare una potenziale riduzione dell'impatto di circa l'81%.

## Capitolo 8

### Conclusioni

Il presente studio ha permesso di porre l'attenzione sugli aspetti della sostenibilità ambientale connessi alle bonifiche di siti contaminati, spesso trascurati negli studi di letteratura scientifica.

Complessivamente lo studio ha evidenziato come l'elevata richiesta di energia elettrica rappresenti un'importante criticità per lo specifico caso studio analizzato.

D'altro canto, lo studio approfondito delle specificità del sito di Gela porta a concludere che la tecnologia di desorbimento termico sia da preferire al classico *dig & dump* che, oltre a risultare superato a causa di aspetti ambientali e sanitari, risulterebbe essere inapplicabile in conseguenza al fatto che sarebbe necessario rimuovere 40.000 m<sup>3</sup> (considerando l'intera area da bonificare, non il singolo lotto) da sostituire con uguali volumetrie non contaminate provenienti da cave di prestito o impianti di trattamento e scavare a una profondità maggiore di 5 metri dal fondo della vasca con difficoltà di manovra dei mezzi e in condizioni di instabilità dei fronti di scavo.

Inoltre, vi sarebbe la quasi impossibilità tecnica di rimuovere il terreno nella fascia perimetrale della vasca poiché il dislivello tra piano campagna circostante e fondo vasca è di circa 12 m, aggiungendo che, servirebbe, per tutta la superficie della vasca, un sistema, colossale in altezza ed estensione di confinamento, in depressione, con aspirazione e trattamento aria, per impedire le emissioni diffuse e incontrollate di VOC in fase di scavo, quindi con consumi molto elevati e necessità di impianti da gestire e monitorare con successiva enorme produzione di rifiuti (filtri esausti).

La tecnologia del desorbimento termico, a differenza del *dig & dump*, inoltre, vanta tempi di esecuzione più brevi, nessuna movimentazione del terreno contaminato, nessun consumo di suolo per ripristino scavi con materiale pulito, nessuno stoccaggio di rifiuti pericolosi con rischi per le matrici ambientali nonostante i più rigorosi criteri di isolamento previsti dal D. Lgs. 121/2020, ridotto spreco di superfici e terreni occupati da discariche e meno traffico di rifiuti in aree popolate.

I vantaggi della tecnologia ISTD sono:

- rapidità di esecuzione,
- efficacia del trattamento,
- flessibilità del sistema,
- utilizzo anche in spazi ristretti e a profondità considerevoli e,
- adattabilità ad ampie superfici.

Anche l'ambito territoriale di applicazione ha il suo peso: la tecnologia in situ ha i suoi vantaggi, ad esempio, in contesti urbani, dove la priorità è evitare la movimentazione dei terreni e rifiuti in aree popolate, tanto più laddove non possono essere utilizzati mezzi di scavo o non si ha spazio sufficiente per la loro movimentazione.

Interessante, per futuri studi, sarebbe, quindi, la realizzazione di uno studio di sostenibilità ambientale a sistemi di trattamento *dig & dump*, capace di comparare il carico ambientale delle due metodologie applicate ad un ipotetico sito da bonificare.

## Capitolo 9

### Bibliografia

- L. Bonomo et al. 2005, “Bonifica dei siti: caratterizzazione e tecnologie di risanamento”.
- Francesco Asdrubali et al. 2013, “L’analisi del ciclo di vita (LCA)”.
- Paolo Berry et al. 2014 “Valutazione ambientale di tecnologie di bonifica per acquiferi contaminati attraverso la metodologia LCA”.
- Cheng Y., et al., 2021, “Distribution and bioaccessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons in industrially contaminated site soils as affected by thermal treatment”.
- Leontari C., et al., “Valorisation of soil contaminated by petroleum hydrocarbons and toxic metals in geopolymer”.
- Bykova M.V., et al., 2021, “Thermal desorption treatment of petroleum hydrocarbon contaminated soils of tundra, taiga, and forest steppe landscapes. Environ Geochem Health”
- Bianco F., et al., 2020. “Comparing performances, costs and energy balance of ex situ remediation processes for PAH-contaminated marine sediments”.
- Sang Y., et al., 2019. “Thermal desorption behavior and parameters optimization for oil contaminated soil remediation based on microwave-ultrasonic coupling effect”.
- Yang Z., et al., 2019. “Exploration on small-scale experimental conditions in thermal desorption remediation of petroleum-contaminated soil”.
- Zivdar Z., et al., 2019. “Remediation of diesel-contaminated soil by low-temperature thermal desorption”.
- Chi K., et al., 2019. “Application effect of in-situ electric thermal desorption technology used in remediation at an organics-contaminated site”.
- Luo H., et al., 2019. “Insights into oil recovery, soil rehabilitation and low temperature behaviors of microwave-assisted petroleum-contaminated soil remediation”.

- Falciglia P.P., et al., 2018, “Environmental Life Cycle Assessment of marine sediment decontamination by citric acid enhanced-microwave heating”.
- Falciglia P.P., et al., 2020, “Remediation of petrol Hydrocarbon-contaminated marine sediments by thermal desorption”.
- Choi B., et al., 2020, “Removal of TPH, UCM, PAHs, and Alk-PAHs in oil-contaminated soil by thermal desorption”.
- Comuzzi C., et al., 2011, “Salt-assisted thermal desorption of mercury from contaminated dredging sludge”.
- Bulmau C., et al., “Analysis of Thermal processing applied to contaminated soil for organic pollutants removal”.
- Lu G., et al., 2019, “Na<sub>2</sub>S leaching assisting thermal desorption for thoroughly and mildly remediating severely Hg-contaminated soil”.
- Liu J., et al., 2019, “Thermal Desorption of PCBs contaminated soil with calcium hydroxide in a rotary kiln”.
- Jiang C., et al., 2019, “In-situ low temperature thermal desorption for remediation of the chlorobenzene contaminated soil”.
- Crownover E., et al., 2019, “Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances thermal desorption evaluation”.
- Navarro A., et al., 2009, “Application of solar thermal desorption to remediation of mercury-contaminated soils”.
- Ilyas N., et al., 2021, “Comparison of plant growth and remediation potential of pyrochar and thermal desorption for crude oil-contaminated soils”.
- Fann, S., et al., 1995, “Hot air vapor extraction for remediation of petroleum contaminated sites”.
- Harmon T.C., et al., 2001, “Thermally enhanced vapor extraction for removing PAHs from lampblack-contaminated soil”.
- Roh Y., et al., 2000, “Thermal-treated soil for mercury removal: soil and phytotoxicity tests”.
- Cao H.L., et al., 2018, “Microwave-induced decontamination of mercury polluted soils at low temperature assisted with granular activated carbon”.
- Krouze J., et al., 2018, “Pilot scale applications of microwave heating for soil remediation”.

- Jam Haermes et al. 2018, “Desorbimento termico con Smart Burners – caso di studio per il trattamento in- situ dei terreni insaturi all’interno della raffineria di Gela (Italia)”
- Jam Haermes et al. 2018, “Progetto Definitivo di Bonifica con Misure di Sicurezza della Vasca A – Variante relativa alla bonifica dei suoli insaturi”.
- Jam Haermes et al. 2018 “Tecnologie di bonifica dei terreni contaminati”.
- Simam et al. 2020 “Geologia in movimento – I siti di interesse nazionale in Sicilia, Gela (CL)”
- Amec Foster Wheeler, 2016, “Specifica tecnica per l’esecuzione dei lavori previsti nella seconda variante progettuale relativi alla bonifica mediante trattamento termico dei suoli insaturi”.
- R. Frischknecht et al., 2000, “A. Braunschweig, P.Hofstetter e P.Suter, Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment”.
- F. Beolchini – Slides del corso a.a. 2020/2021 “Gestione rifiuti e Bonifiche ambientali”
- A. Amato - Slides del corso a.a. 2020/2021 “Certificazioni e regolamenti ambientali”



## Sitografia

- GaBi: <https://gabi.sphera.com/italy/index/>
- LCA: <https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/certificazioni/ipp/lca>
- LCA: <https://ec.europa.eu/environment/ipp/lca.htm>
- Eni, “Vademecum tecnologie di bonifiche”:  
[https://www.eni.com/syndial-assets/documents/2\\_attivita/2.1\\_bonifica-sostenibile/2.1.2\\_tecniche-di-risanamento-dei-suoli/ITA\\_VADEMECUM\\_eni\\_Rewind.pdf](https://www.eni.com/syndial-assets/documents/2_attivita/2.1_bonifica-sostenibile/2.1.2_tecniche-di-risanamento-dei-suoli/ITA_VADEMECUM_eni_Rewind.pdf)
- LCA: <https://www.eni.com/it-IT/attivita/italia-gela-rd-rinnovabili.html>
- ISPRA, “Lo stato delle bonifiche dei siti contaminati in Italia: i dati regionali”: <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/lo-stato-delle-bonifiche-dei-siti-contaminati-in-italia-i-dati-regionali>.
- ISPRA “Siti di interesse Nazionale”:  
<https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/siti-contaminati/siti-di-interesse-nazionale-sin>
- Università degli Studi di Milano, “Linee guida per il monitoraggio di barriere idrauliche”:  
[https://www.ingmaurogallo.com/documenti/lineeguida06\\_monitoraggio\\_barriere\\_idrauliche.pdf](https://www.ingmaurogallo.com/documenti/lineeguida06_monitoraggio_barriere_idrauliche.pdf)
- Rete Clima, “LCA”: <https://www.reteclima.it/lca-life-cycle-assessment-analisi-del-ciclo-di-vita/>
- Rossini, “Misurare la sostenibilità ambientale di un ciclo o prodotto”:  
<http://www.emcinnovation.it/lca-e-life-cycle-thinking/>
- Innochem Service, “LCA per migliorare prodotti e processi”:  
<https://www.innochemservice.com/it/lca-per-migliorare-prodotti-e-processi/>