



REGIONE BASILICATA

Dipartimento Ambiente, Territorio, Politiche  
della Sostenibilità  
Ufficio Prevenzione e Controllo Ambientale  
Via Vincenzo Verrastro, n.5 - 85100  
Potenza

## Sito di Interesse Nazionale Tito Bonifica e messa in sicurezza permanente Sito Ex Liquichimica Intervento di Bonifica



### Oggetto

Relazione tecnica sull'efficacia dell'intervento di bonifica

### Redatto

**Planeta**

EConsulting  
PLANETA EConsulting  
10034 CHIVASSO (TO) - ITALY  
Via Cerello, 21 - SP87, Km 1



### Visto

**B.S.A. Srl**  
Bonifiche Servizi Ambientali  
Via Meuccio Ruini 10  
42124 Reggio Emilia (RE)  
C.F. 01529100350 - P.IVA 02863660350

ELABORATO

**CO. III/2024**

## INDICE

<b>1. INTRODUZIONE</b>	<b>2</b>
<b>2. SINTESI DELLE ATTIVITA' SVOLTE NELL'AMBITO DELL'INTERVENTO DI BONIFICA</b>	<b>4</b>
2.1. Installazione dei piezometri di monitoraggio integrativi	4
2.2. Installazione delle PIM	5
2.3. Installazione dei pozzi barriera	6
2.4. Allestimento dell'area TAF	6
2.5. Intervento di bonifica tramite EB	8
2.5.1 <i>Iniezione in falda di substrati organici fermentabili</i>	8
2.5.1 <i>Piano di monitoraggio</i>	10
<i>Monitoraggio delle acque di falda</i>	11
<i>Monitoraggio dell'aria ambiente</i>	13
<b>3. SINTESI DEI RISULTATI ACQUISITI NELL'AMBITO DELL'INTERVENTO DI EB</b>	<b>15</b>
3.1. Andamento delle concentrazioni in ingresso al sito	15
3.2. Andamento delle concentrazioni all'interno dell'area di intervento di EB	17
3.3. Andamento delle concentrazioni a valle dell'area di intervento di EB	20
<b>4. VALUTAZIONE COMPLESSIVA DELL'EFFICACIA DELL'INTERVENTO DI BONIFICA</b>	<b>23</b>
<b>5. CONCLUSIONI</b>	<b>30</b>

## FIGURE

- Figura 1** Ubicazione dei piezometri e dei pozzi barriera
- Figura 2** Ubicazione delle PIM
- Figura 3** Distribuzione delle concentrazioni di TCE in falda (marzo 2019 – gennaio 2024)

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

## 1. INTRODUZIONE

In data 21 dicembre 2017 sono stati formalmente avviati gli interventi di bonifica dell'area ex Liquichimica facente parte del Sito di Interesse Nazionale (SIN) di Tito (in località Tito Scalo), in provincia di Potenza, previsti dal Progetto Esecutivo di Bonifica approvato dall'Ufficio Prevenzione e Controllo Ambientale 23 AA – Dipartimento Ambiente della Regione Basilicata con Determinazione Dirigenziale n° 23AA.2017/D.01441 del 28/11/2017.

L'intervento previsto dal progetto ha compreso:

- la stimolazione dei processi di biodegradazione in falda nella porzione del sito risultata maggiormente impattata da solventi clorurati attraverso l'iniezione, mediante un'apposita rete di punti di iniezione fissi (Postazioni Multiple di Iniezione, di seguito "PIM"), di substrati organici fermentabili in grado di rilasciare idrogeno in fase disciolta; l'area oggetto di intervento corrisponde alla porzione del sito occupata dagli Uffici del Consorzio ASI e del CNR;
- l'installazione di due barriere idrauliche di cui:
  - o una ubicata a valle dell'area del Consorzio ASI (barriera A) al fine di controllare, dal punto di vista idraulico, l'area oggetto di intervento di biodegradazione assistita (enhanced biodegradation, di seguito "EB") e di favorire una migliore distribuzione del reagente all'interno dell'acquifero,
  - o una ubicata lungo il confine orientale del sito (barriera B) al fine di captare le acque contaminate da solventi clorurati in uscita dallo stesso;
- l'attuazione di un piano periodico di monitoraggio delle acque di falda, con cadenza trimestrale, in corrispondenza della rete piezometrica del sito, opportunamente integrata al fine di valutare le concentrazioni di contaminanti in ingresso allo stesso e la loro distribuzione all'interno dell'area di intervento di EB. Il piano di monitoraggio comprende anche il campionamento periodico delle acque emunte dai pozzi delle barriere idrauliche installate in sito;
- l'attuazione di un piano di monitoraggio, sempre con cadenza trimestrale, dell'aria ambiente al fine di verificare la presenza di vapori organici all'interno degli edifici attribuibile a fenomeni di intrusione dal sottosuolo.

I risultati acquisiti nei corso dei monitoraggi vengono trasmessi al termine di ciascuna campagna in apposite relazioni tecniche descrittive, riguardanti rispettivamente le acque di falda e l'aria ambiente.

La presente relazione tecnica, elaborata facendo riferimento ai risultati analitici acquisiti sulle acque di falda nel periodo compreso fra maggio 2018 e gennaio 2024, riporta una valutazione complessiva dell'efficacia degli interventi di bonifica attuati in sito, riassumibili nei seguenti punti:

- i risultati acquisiti mostrano come le iniezioni di agenti riducenti in falda siano state efficaci a stimolare la biodegradazione dei solventi clorurati, determinando una riduzione, evidente soprattutto a seguito di ciascuna campagna di iniezione, delle concentrazioni di tricloroetilene. La

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

biodegradazione assistita si è dimostrata una tecnica di bonifica appropriata per gestire la contaminazione da solventi clorurati presente in sito;

- il continuo ingresso di acque contaminate da tricloroetilene e dai relativi prodotti di biodegradazione (1,2-dicloroetilene e cloruro di vinile) dall'area Daramic, ubicata in posizione di monte idrogeologico rispetto al sito di intervento, ha tuttavia comportato l'instaurarsi di evidenti fenomeni di rebound, che hanno limitato l'efficacia dell'intervento attuato in sito;
- nel corso dei monitoraggi si è osservato come le concentrazioni di tricloroetilene misurate sul piezometro di monte PM1 (ubicato a valle dell'area Daramic) siano progressivamente aumentate nel tempo; a fronte di concentrazioni medie in ingresso dell'ordine di 13 mg/l nel periodo compreso fra maggio 2018 e marzo 2019, a partire dal giugno 2019 è stato osservato un progressivo incremento delle concentrazioni, risultate superiori, di un ordine di grandezza, rispetto a quelle misurate nella campagna di bianco;
- il continuo apporto di contaminante da monte ha fatto sì che le concentrazioni di tricloroetilene all'interno dell'area di intervento mostrassero un andamento altalenante, con un decremento evidente grazie alle campagne di iniezione attuate nel corso della bonifica, seguito, a distanza di alcuni mesi, da un successivo incremento in relazione all'aumento della massa di contaminante in ingresso al sito;
- in attesa di un intervento di diretto all'interno dell'area Daramic, posta a monte idrogeologico del sito e costituente la sorgente di contaminazione attiva delle acque di falda, l'intervento di bonifica è proseguito attuando campagne di iniezione integrative rispetto a quelle inizialmente previste nel Progetto approvato con Determinazione Dirigenziale n° 23AA.2017/D.01441 del 28/11/2017;
- nel complesso, gli interventi di bonifica finora effettuati hanno permesso di limitare e di tenere sotto controllo il grado di contaminazione all'interno del sito, a fronte di un continuo apporto di contaminante da monte in concentrazioni ben più significative rispetto a quelle osservate nelle prime fasi di intervento.

Il presente documento risulta così strutturato:

- sintesi delle attività di bonifica svolte (**Capitolo 2**);
- sintesi dei risultati dei monitoraggi sulle acque di falda (**Capitolo 3**);
- valutazione complessiva dell'efficacia dell'intervento di bonifica (**Capitolo 4**);
- conclusioni (**Capitolo 5**).

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

## **2. SINTESI DELLE ATTIVITA' SVOLTE NELL'AMBITO DELL'INTERVENTO DI BONIFICA**

Nel presente capitolo vengono descritte, in forma sintetica, le attività effettuate in sito nell'ambito dell'intervento di bonifica.

### **2.1. Installazione dei piezometri di monitoraggio integrativi**

Nel periodo compreso tra il 19 febbraio ed il 18 aprile 2018, in conformità con quanto previsto dal Progetto Esecutivo di Bonifica, è stata integrata la rete piezometrica del sito con l'installazione di 31 ulteriori piezometri di monitoraggio, ubicati secondo il seguente schema (si veda **Figura 1**):

- 5 piezometri di monitoraggio ubicati in posizione di monte idrogeologico (PM1-PM5), allo scopo di definire le concentrazioni di solventi in ingresso al sito, a monte dell'area oggetto di intervento di bonifica mediante EB;
- 17 piezometri di monitoraggio ubicati all'interno dell'area di intervento di EB, previsti a valle di ciascun fronte di iniezione (PM6-PM17 e PM19-PM22); lo scopo dei piezometri di monitoraggio in questione è stato quello di definire il quadro della distribuzione della contaminazione all'interno dell'area di intervento e di valutare nel tempo l'efficacia dei processi di biodegradazione a seguito delle iniezioni attuate in sito;
- 2 piezometri di monitoraggio ubicati rispettivamente a valle (PM24) e lateralmente all'area di intervento di EB (PM18);
- 6 piezometri di monitoraggio nell'area della barriera idraulica prevista lungo il confine est del sito (PM25-PM30) di cui:
  - o 1 ubicato a monte della barriera lungo l'asse di deflusso principale della falda (punto PM25);
  - o 2 ubicati appena a valle dei pozzi barriera allo scopo di verificare gli abbassamenti piezometrici indotti dal pompaggio (punti PM26 e PM29);
  - o 3 ubicati sempre a valle della barriera idraulica ma ad una distanza maggiore (compresa fra 25 e 40 m circa) allo scopo di verificare nel tempo le variazioni di concentrazione in uscita dal sito (punti PM27, PM28 e PM30);
- 1 piezometro ubicato nel settore nord del sito (PM31) in posizione intermedia fra i piezometri di monitoraggio p(B,C)4 e pO4.

L'ubicazione delle indagini per l'installazione dei piezometri è stata definita previo controllo della presenza di eventuali sottoservizi, mediante l'esecuzione di un rilievo georadar.

Diversamente da quanto previsto dal layout di progetto, si è reso necessario modificare l'ubicazione di alcuni piezometri a causa della presenza di sottoservizi interferenti; nello specifico, i piezometri

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

PM7 e PM8 sono stati installati a monte rispetto all'area del consorzio ASI, in linea con il piezometro PM6.

I fori dei sondaggi ubicati all'interno dell'area di trattamento di EB sono stati spinti ad una profondità di 20 m da p.c. mentre i fori dei sondaggi ubicati lungo il confine est del sito sono stati spinti fino ad una profondità compresa fra 11 e 15 m da p.c., in funzione della profondità a cui è stato intercettato il livello argilloso che costituisce la base dell'acquifero.

Tutti i fori dei sondaggi sono stati attrezzati a piezometro mediante l'installazione di un tubo in PVC avente diametro di 3". Lo spazio anulare tra il tubo in PVC e la parete del foro è stato riempito con filtro drenante in ghiaietto siliceo calibrato nel tratto fenestrato e pellets di bentonite nel tratto cieco; il tratto fenestrato è stato esteso a partire da 1 m di profondità dal p.c. fino a fondo foro.

## 2.2. Installazione delle PIM

Le attività di installazione delle postazioni fisse di iniezione multipla (PIM) sono state eseguite in 2 fasi successive:

- Fase I: installazione di un primo fronte di iniezione costituito da 7 PIM;
- Fase II: installazione delle restanti 87 PIM.

Le PIM di Fase I sono state installate nei giorni compresi tra il 18 e il 24 aprile 2018, quelle di Fase II nei giorni compresi tra il 3 luglio ed il 6 agosto 2018.

Le 94 PIM sono state distribuite lungo una serie di 9 fronti paralleli, numerati dalla A alla L procedendo dal confine occidentale del sito verso quello orientale, disposti lungo la direzione di sviluppo degli edifici presenti all'interno dell'area di intervento.

Nel dettaglio (si veda **Figura 2**), i fronti di iniezione risultano così costituiti:

- Fronte A: ubicato a monte dell'area del Consorzio ASI, è costituito da 20 PIM, identificate con i codici da A-PIM1 a A-PIM20;
- Fronte B: ubicato immediatamente a valle dell'edificio del Consorzio ASI, è costituito da 15 PIM, identificate con i codici da B-PIM1 a B-PIM15;
- Fronte C: ubicato immediatamente a valle del Fronte B, è costituito da 11 PIM, identificate con i codici da C-PIM1 a C-PIM11;
- Fronte D: ubicato a valle della barriera idraulica centrale (collocata tra la palazzina uffici del Consorzio ASI e l'edificio CNR), è costituito da 15 PIM, identificate con i codici da D-PIM1 a D-PIM15;
- Fronti E-L: si tratta di fronti paralleli costituiti da 2 a 7 PIM ciascuno, disposti in modo tale da ricoprire il più possibile l'intera area del CNR, tenendo conto dell'accessibilità della stessa.

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

Le PIM sono costituite da tubi ciechi in PVC strutturato (diametro 1,5" e profondità di 20 m) attrezzati con specifiche valvole in gomma, adatte a resistere nel lungo periodo a contatto con concentrazioni elevate di solventi, posizionate a distanze prestabilite lungo il tratto di interesse; l'intercapedine tra la tubazione ed il diametro esterno di perforazione è stata riempita mediante miscele sigillanti in modo tale da non creare vie preferenziali di migrazione dei prodotti durante le fasi di iniezione. Per ciascuna PIM, le valvole di iniezione sono state posizionate lungo la verticale con un passo di 50 cm a partire dalla profondità di 1 m dal p.c. (fra -1 e -20 dal p.c.).

### 2.3. **Installazione dei pozzi barriera**

L'installazione dei pozzi barriera è stata effettuata nel periodo compreso tra il 22 giugno ed il 26 luglio 2018.

In totale sono stati installati 22 pozzi ubicati lungo due fronti, così denominati:

- Barriera A, collocata tra palazzina uffici del Consorzio ASI e l'edificio CNR, costituita da 5 pozzi (PB18-PB22);
- Barriera B, collocata lungo il confine orientale del sito, costituita da 17 pozzi (PB1-PB17).

I pozzi sono stati spinti a profondità differenti in funzione della stratigrafia del terreno a scala locale; nello specifico, i pozzi della barriera A sono stati spinti fino a 20 m di profondità dal p.c., mentre i pozzi della barriera B sono stati spinti fino a profondità comprese fra 12 e 16 m dal p.c..

Le caratteristiche costruttive dei pozzi sono sintetizzabili come segue:

- tecnica di perforazione: a vibrazione;
- diametro di perforazione: 400 mm;
- tubazione di rivestimento: 6", in acciaio;
- tratto filtrante: filtro spirale in acciaio al carbonio (S 235 JR Ø est. 168,3 mm. Ø int. 145,5 mm e Luce 0,25 mm.), da 1 m da p.c. a 1 m da fondo foro;
- dreno: ghiaietto siliceo selezionato, da 3 mm.

Tutti i pozzi sono stati completati con tappo di fondo foro in bentonite (spessore 70 cm) e sigillatura sommitale in cemento (spessore 1 m).

A seguito dell'allestimento, nel periodo compreso tra il 18 luglio ed il 29 agosto 2018, sono state eseguite su tutti i pozzi le prove di portata a gradini al fine di valutarne la portata critica.

Le barriere idrauliche sono entrate in funzione a pieno regime a partire da dicembre 2019.

### 2.4. **Allestimento dell'area TAF**

Nel mese di marzo 2018, durante i lavori di sistemazione dell'area adibita all'impianto di trattamento delle acque di falda (TAF), ubicata a nord dell'area del CNR, sono stati rinvenuti frammenti di lastre

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

#### Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

contenti amianto in matrice solida. Il ritrovamento di manufatti contenenti amianto ha reso necessario provvedere alla bonifica dei primi 10 cm di terreno su tutta l'area. Ottenute le opportune autorizzazioni, le lavorazioni sono iniziate il 21 maggio 2018 e sono terminate il 5 giugno 2018 con l'ultimo smaltimento dei rifiuti prodotti nel corso della bonifica.

Terminata la bonifica dei manufatti contenenti amianto ed ottenuta l'autorizzazione sismica da parte del Genio Civile di Potenza, in data 28 agosto 2018 si è proceduto alla messa in opera delle platee di fondazione dell'impianto TAF.

Le platee, in cemento armato, hanno le seguenti dimensioni:

- platea TAF: 40 cm di lunghezza per 20 cm di larghezza;
- platea serbatoio di accumulo finale (300 mc): 10 m per 10 m;
- platea ufficio bagni e magazzino: 12 m per 8 m.

Tutta l'area del TAF è stata completata con i sottoservizi elettrici ed idraulici necessari alla corretta gestione dei flussi di acqua.

L'impianto è costituito dai seguenti elementi:

- 1 Serbatoio di stoccaggio delle acque emunte dalle barriere, di capacità pari a 60 mc, con sistema di clorazione;
- 2 Colonne di strippaggio delle sostanze volatili (COV) – Caratteristiche: Portata di acqua in ogni torre 55 mc/h, Portata di aria in ogni torre 5,500 Nmc/h, Velocità di attraversamento 0,43 m/s;
- 3 Filtri a carbone, funzionamento in serie – Caratteristiche: Dimensioni 2,5\*3 m, Portata 55 mc/h, Velocità di filtrazione 11,22 mc/h;
- 4 Ispessitore dei fanghi, a servizio del chimico-fisico, per trattamento concentrato osmosi e reflui contro lavaggio filtri a carbone – Caratteristiche: Volume 10 mc, Portata 3 mc/h;
- 5 Filtropressa per la disidratazione dei fanghi;
- 6 Serbatoio finale di accumulo delle acque in uscita dal TAF di capacità pari a 300 mc.

Le acque trattate vengono scaricate nel torrente Tora.

In relazione agli accertamenti effettuati in fase di caratterizzazione integrativa del sito, che non hanno evidenziato livelli di radioattività in falda significativi, si è accertata la non necessità di procedere con l'installazione della linea di trattamento acque tramite osmosi inversa.

L'impianto TAF è entrato in funzione a fine ottobre 2019 ed è tuttora attivo.



Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

## 2.5. **Intervento di bonifica tramite EB**

### 2.5.1 Iniezione in falda di substrati organici fermentabili

L'intervento di biodegradazione assistita (EB - *Enhanced Biodegradation*) attuato in sito consiste nella stimolazione dei naturali processi di biodegradazione dei solventi clorurati in falda mediante l'iniezione di substrati organici fermentabili, forniti dalla ditta Regenesis Bioremediation Products Ltd., in grado di rilasciare idrogeno in fase disciolta.

L'intervento si è articolato inizialmente, in accordo al progetto approvato con Determinazione Dirigenziale n° 23AA.2017/D.01441 del 28/11/2017, in 3 campagne di iniezione (si veda **Figura 2**):

- la prima campagna di iniezione (inquadrata come Fase I di intervento) è stata effettuata nei giorni compresi tra il 5 ed il 7 giugno 2018 ed ha coinvolto le 7 PIM (dalla B-PIM4 alla B-PIM10) ubicate a monte dell'area presso la quale era stato installato il campo prove MPE nell'ambito della progettazione dell'intervento di bonifica;
- la seconda campagna di iniezione (inquadrata come prima campagna di Fase II di intervento), effettuata nel periodo compreso tra il 26 marzo ed il 9 aprile 2019, ha interessato le 94 PIM installate in sito, incluse quelle oggetto di iniezione nell'ambito della precedente Fase I;
- la terza campagna di iniezione (inquadrata come seconda campagna di Fase II di intervento), effettuata nel periodo compreso tra il 3 ed il 6 novembre 2020 ha interessato un numero selezionato di PIM (50), ubicate in corrispondenza delle porzioni dell'area di intervento risultate caratterizzate dalle concentrazioni residue di solventi in falda più elevate.

I quantitativi di prodotto iniettati nella prima campagna di iniezione sono stati stimati considerando cautelativamente concentrazioni di solventi all'interno dell'area di trattamento dell'ordine di 30 mg/l (15 mg/l di TCE e 15 mg/l di 1,2-DCE).

Sulla base delle valutazioni effettuate, per ciascun punto di iniezione, è stata iniettata una combinazione di substrati a base di esteri dell'acido lattico ed esteri degli acidi grassi in grado di stimolare e sostenere i processi di biodegradazione dei solventi clorurati in falda.

Nel dettaglio i quantitativi di reagenti utilizzati sono stati i seguenti:

- 170 kg di 3-D Microemulsion;
- 75 kg di HRC Primer.

Gli stessi quantitativi di prodotto sono stati iniettati nel corso della prima campagna di Fase II in tutte le 87 PIM rimanenti. All'interno delle prime 7 PIM già trattate nell'ambito della Fase I si è iniettato solamente il prodotto a base di esteri dell'acido lattico ed esteri degli acidi grassi (3-D Microemulsion, in quantitativi di 85 kg di prodotto per punto) considerando non più necessario prevedere, nella seconda fase di iniezione, una componente di prodotto a base di acido lattico (HRC Primer).

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

Nella seconda campagna di iniezione di Fase II sono stati iniettati, in ciascuna delle 50 PIM selezionate, 85 kg di 3-D Microemulsion.

La preparazione della miscela è stata effettuata a partire dai prodotti concentrati, i quali sono stati emulsionati in acqua miscelando per circa 10-15 minuti in modo tale da ottenere una soluzione omogenea.

L'utilizzo delle PIM installate in sito ha permesso di effettuare le iniezioni della miscela ad intervalli regolari di profondità pari ad 1 m circa, dosando la miscela reagente lungo la verticale di iniezione (partendo dal basso verso l'alto) ed isolando il tratto di interesse mediante uno specifico packer.

Sulla base delle caratteristiche litologiche del terreno oggetto di intervento si sono raggiunte pressioni di iniezione comprese fra 1 e 11 bar.

Nel corso delle iniezioni sono stati registrati i seguenti parametri:

- livello piezometrico all'interno dei pozzi di monitoraggio posti in prossimità dei punti di iniezione;
- pressione di iniezione;
- profondità dei tratti coinvolti dall'iniezione;
- volume di miscela iniettato;
- tempo di iniezione.

Gli esiti delle campagne di monitoraggio condotte tra il 2018 ed il 2021 nel corso dell'intervento di bonifica mediante EB hanno mostrato come le iniezioni di agente riducente effettuate, per quanto efficaci a ridurre le concentrazioni di TCE in falda, non abbiano permesso di raggiungere un quadro ambientale stabile nel tempo. Quanto osservato è dovuto al fatto che l'area di intervento è posta a valle idrogeologico di una sorgente di contaminazione attiva, rappresentata dall'area Ex Daramic, con concentrazioni in ingresso al sito risultate nel tempo superiori, fino ad un ordine di grandezza, rispetto a quelle misurate prima dell'avvio dell'intervento di bonifica (campagna di bianco).

In relazione a quanto sopra ed in attesa che venga avviato, anche sull'area Ex Daramic, uno specifico ed efficace intervento di bonifica (condizione necessaria per poter migliorare, in modo risolutivo e permanente, il quadro ambientale dell'area ex Liquichimica), a novembre 2022 il Direttore dei Lavori, d'intesa con il Responsabile Unico del Procedimento, ha redatto una perizia di variante al Progetto Esecutivo di Bonifica approvato nel quale veniva esplicitata la necessità di:

1. garantire la prosecuzione delle opere di messa in sicurezza mediante attività di iniezione di agente riducente in falda, al fine di contenere il più possibile i valori di concentrazione di TCE all'interno del sito;
2. intervenire in modo diretto nella zona al confine fra l'area Ex Daramic e l'area Ex Liquichimica, integrando il Fronte A di iniezione esistente a monte idrogeologico dell'area Ex Liquichimica, per incrementare l'efficacia degli interventi di biodegradazione assistita.

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

Considerato che la carica di contaminante in ingresso al sito è risultata molto più elevata rispetto a quella misurata nell'ambito della progettazione dell'intervento di bonifica e nel corso della campagna di bianco, sono stati pertanto promossi i seguenti interventi:

- installazione di 4 ulteriori PIM, a distanza di 5 m una dall'altra, disposte in prosecuzione del fronte di iniezione ubicato a monte idrogeologico del sito (Fronte A);
- integrazione della rete piezometrica del sito attraverso l'installazione di un ulteriore piezometro (denominato PM32) ubicato tra i punti già esistenti PM1 e PM2, con lo scopo di monitorare la contaminazione in ingresso al sito proveniente dall'area Ex Daramic;
- con un approccio analogo a quello adottato in fase di intervento di bonifica, esecuzione di 3 ulteriori campagne di iniezione a distanza temporale di 6 mesi l'una dall'altra, così articolate:
  - o prima campagna di iniezione integrativa: iniezione in tutte le 98 PIM (94 esistenti + 4 integrative poste fra area Daramic e area ex Liquichimica) di una combinazione di 3-D Microemulsion e HRC Primer, adottando gli stessi quantitativi di prodotto della prima campagna full scale (Fase II), ovvero 170 kg di 3-D Microemulsion e 75 kg di HRC Primer per punto;
  - o seconda campagna integrativa: ripetizione del trattamento in tutte le 98 PIM installate in sito prevedendo di iniettare in ciascun punto 90 kg di 3-D Microemulsion, analogamente alla seconda campagna di iniezione di Fase II;
  - o terza campagna integrativa: ripetizione del trattamento in tutte le 98 PIM installate in sito prevedendo di iniettare in ciascun punto 90 kg di 3-D Microemulsion, analogamente alla seconda campagna integrativa.

Nel mese di maggio 2023 sono state effettuate le attività di integrazione della rete di monitoraggio delle acque sotterranee con l'installazione del piezometro PM32 e delle ulteriori 4 PIM.

La prima campagna di iniezione integrativa è stata effettuata nel giugno 2023.

La seconda campagna di iniezione integrativa è stata effettuata nel dicembre 2023.

La terza campagna di iniezione integrativa è stata effettuata nel maggio 2024.

### 2.5.1 Piano di monitoraggio

Nell'ambito dell'intervento di bonifica, in conformità con il Piano di monitoraggio e controllo (elaborato A.2.7, facente parte integrante del Progetto Esecutivo di Bonifica approvato), sono stati avviati:

- un piano di monitoraggio periodico delle acque di falda a cadenza trimestrale, finalizzato a verificare l'efficacia degli interventi di iniezione di agenti riducenti in falda effettuati;

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

- un piano di monitoraggio dell'aria indoor, sempre a cadenza trimestrale, finalizzato ad escludere la presenza di vapori organici all'interno degli edifici attribuibile a fenomeni di intrusione dal sottosuolo.

Monitoraggio delle acque di falda

Il piano di monitoraggio delle acque di falda con frequenza trimestrale è stato avviato tra la fine di agosto e l'inizio di settembre 2018; la campagna di bianco prima dell'avvio dell'intervento di bonifica è stata effettuata nel maggio 2018. Alla data attuale, sono state effettuate in sito 24 campagne di monitoraggio, inclusa quella di bianco.

Ai fini della valutazione dell'efficacia complessiva dell'intervento di bonifica sono stati esaminati, nel presente documento, i risultati analitici acquisiti fino alla campagna di monitoraggio di gennaio 2024.

Le attività di monitoraggio hanno compreso il campionamento delle acque prelevate da 62 piezometri (considerando anche il piezometro integrativo PM32 installato nel maggio 2023) e 22 pozzi barriera (campionati a partire dal dicembre 2019). La rete oggetto di monitoraggio, illustrata in **Figura 1**, è costituita da:

- 32 nuovi piezometri di monitoraggio installati in sito nell'ambito della bonifica (PM1-PM32);
- 10 piezometri di monitoraggio installati nell'ambito delle indagini integrative effettuate nel 2017 (SP1, MP-A, MP-B, MP-C, SP2, RW12, RW17, RW20, RW8 ed RW3);
- 20 piezometri di monitoraggio doppia canna installati nell'ambito delle indagini di caratterizzazione pregresse, già oggetto di monitoraggio nel marzo 2017 (pA6, pA13, pC16, pG9, pF13, pL11, pO4, pO7, pO13 e pA22) con l'esclusione dei punti pL16 e pP22, di fatto sostituiti dai vicini punti RW17 ed RW20 e del piezometro p(B,C)4, di cui entrambe le canne sono risultate ostruite e quindi inagibili ai fini del campionamento;
- 5 pozzi (PB18-PB22) della barriera collocata tra la palazzina uffici del Consorzio ASI e l'edificio CNR (barriera A);
- 17 pozzi (PB1-PB17) della barriera collocata lungo il confine orientale del sito (barriera B).

Per motivi di sicurezza, come comunicato nel marzo 2019, non è stato possibile effettuare il campionamento periodico dei piezometri pD6 canna I e canna II, in quanto il percorso pedonale utilizzato dai tecnici per raggiungere tali punti è risultato essere adiacente ad alcune strutture a rischio di crollo.

Al fine di valutare la distribuzione dei contaminanti lungo la verticale dell'acquifero, per i piezometri a doppia canna sono state sottoposte a campionamento sia la prima che la seconda canna.

Il campionamento dei piezometri è stato condotto adottando le seguenti modalità operative:

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

- esecuzione del test dello spazio di testa mediante fotoionizzatore portatile all'interno dei piezometri ubicati all'interno dell'area di trattamento di EB, al fine di verificare la concentrazione di COV (composti organici volatili);
- misura della soggiacenza mediante freatimetro graduato;
- misura dei parametri di campo mediante strumentazione portatile: pH, potenziale redox, temperatura, ossigeno disciolto, conducibilità elettrica e salinità;
- campionamento a basso flusso delle acque di falda in modalità "dinamica" a stabilizzazione dei parametri mediante pompa elettrosommersa e prelievo delle seguenti aliquote:
  - o 1 litro in bottiglia sterile per l'analisi della carica batterica, ove prevista;
  - o 1 falcon da 15 ml previa filtrazione in campo con filtro a 0,45 µm per l'analisi dei metalli;
  - o 1 bottiglia da 1 litro in PET per l'analisi dei composti inorganici e per il DOC (carbonio organico disciolto);
  - o 8 vial per l'analisi degli idrocarburi alifatici clorurati cancerogeni e non cancerogeni.

Le acque emunte dalle barriere idrauliche sono state campionate tramite prelievo diretto dai rubinetti posti in testa a ciascun pozzo di emungimento.

Parte delle attività di campionamento sono state eseguite alla presenza dei tecnici ARPAB, preventivamente contattati per organizzare i prelievi in contraddittorio.

I campioni d'acqua prelevati sono stati sottoposti ad analisi presso il laboratorio Alfa Solutions S.p.A. di Reggio Emilia, accreditato ACCREDIA, finalizzate alla determinazione dei seguenti parametri:

- metalli (As, Fe e Mn);
- nitriti, nitrati, azoto ammoniacale e solfati;
- idrocarburi alifatici clorurati cancerogeni e non cancerogeni.

Sulle acque dei piezometri ubicati all'interno e nell'intorno dell'area oggetto di intervento di EB (PM1÷PM24, MP-A, MP-B, MP-C, SP1, pF13 canna I e canna II), sono stati sistematicamente ricercati anche i seguenti parametri aggiuntivi:

- carbonio organico disciolto (DOC);
- carica microbica totale a 22°C e a 36°C (mediante conta su piastra).

I risultati delle analisi effettuate nell'ambito di ciascuna campagna di monitoraggio sono stati riportati in specifiche relazioni tecniche, trasmesse periodicamente nel corso dell'intervento di bonifica, a cui si rimanda per dettagli.

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

### Monitoraggio dell'aria ambiente

Il piano di monitoraggio dell'aria ambiente è stato avviato seguendo la stessa cadenza trimestrale dei monitoraggi delle acque di falda, comprendendo quindi anche una campagna di bianco effettuata nel maggio 2018.

I monitoraggi sono stati effettuati utilizzando dei campionatori passivi modello Radiello, costituiti dai seguenti elementi:

- una cartuccia adsorbente riposta in un contenitore in vetro, sigillato da un involucro in polipropilene trasparente su cui è indicato numero di lotto e data di scadenza;
- un corpo diffusivo (dimensioni: 16 mm di diametro e 60 mm di altezza) all'interno del quale viene posizionata la cartuccia adsorbente, una volta rimossa del relativo involucro protettivo;
- una piastra di supporto in policarbonato sulla quale viene avvitato il corpo diffusivo contenente la cartuccia adsorbente. La piastra è corredata da una tasca trasparente per l'inserimento dell'etichetta che permette di identificare in modo univoco la cartuccia adsorbente (mediante un codice a barre ed un numero identificativo). Sull'etichetta devono essere indicati, per ciascuna cartuccia, la data e l'ora del posizionamento e la data e l'ora del ritiro. Una volta terminato il campionamento, l'etichetta viene staccata dalla carta autoadesiva, dopo aver annotato la data e l'orario di fine esposizione, e posizionata sull'involucro protettivo della cartuccia estratta dal corpo diffusivo.

A partire dalla seconda campagna di monitoraggio, il campionamento è stato effettuato in 7 punti, di cui 4 rappresentativi dell'ambiente indoor e 3 rappresentativi dell'ambiente outdoor.

Per l'ambiente indoor sono stati sistematicamente posizionati:

- due campionatori all'interno di due locali ubicati al piano terreno dell'edificio del Consorzio ASI, rispettivamente nell'ala nord e nell'ala sud dell'edificio;
- due campionatori al piano terreno dell'edificio del CNR, rispettivamente all'interno della stanza n. 01 della porzione dell'edificio denominata IMS-IBAM ed all'interno di un ripostiglio dell'edificio denominato IMMA.

Per l'ambiente outdoor sono stati sistematicamente posizionati:

- un campionatore nel giardino antistante l'edificio del Consorzio ASI in prossimità del piezometro PM11;
- un campionatore lungo Strada per Contrada Petrucco a circa 140 m in direzione nord-nordovest dell'ingresso all'area Ex Liquichimica;
- un campionatore lungo il confine ovest dell'area Fosfogessi, in prossimità del piezometro PM31.

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

Per ciascuna campagna di monitoraggio, i campionatori sono stati lasciati in sito per un periodo di 7 giorni e quindi analizzati presso il laboratorio Alfa Solutions S.p.A. di Reggio Emilia al fine di determinare la concentrazione dei seguenti parametri:

- BTEX;
- idrocarburi alifatici clorurati cancerogeni e non cancerogeni;
- idrocarburi alifatici alogenati cancerogeni;
- idrocarburi totali.

Le analisi di screening hanno evidenziato, nella campagna di bianco, la presenza di tracce di limonene; il parametro è stato quindi ricercato anche nelle campagne successive.

I risultati delle analisi effettuate nell'ambito di ciascuna campagna di monitoraggio sono stati riportati in specifiche relazioni tecniche, trasmesse periodicamente nel corso dell'intervento di bonifica, a cui si rimanda per dettagli.

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

### **3. SINTESI DEI RISULTATI ACQUISITI NELL'AMBITO DELL'INTERVENTO DI EB**

I risultati dei monitoraggi acquisiti nel corso dell'intervento di bonifica sono stati già trasmessi periodicamente con una frequenza trimestrale. Si rimanda pertanto alle relazioni tecniche già trasmesse per dettagli circa le attività di campionamento e analisi effettuate in sito.

Nel presente capitolo vengono esaminati, nel complesso, i risultati analitici acquisiti sulle acque di falda nel periodo compreso fra maggio 2018 (campagna di bianco) e gennaio 2024, con particolare riferimento alle concentrazioni del contaminante indice presente in falda, costituito dal tricloroetilene, e dei relativi prodotti di degradazione.

#### **3.1. Andamento delle concentrazioni in ingresso al sito**

Come già specificato nell'ambito della progettazione e ricavato dai monitoraggi effettuati nel corso dell'intervento di bonifica, la sorgente di contaminazione da tricloroetilene in falda è ubicata a monte idrogeologico del sito ed è rappresentata dall'area Ex Daramic.

Dei 6 piezometri di monitoraggio ubicati a monte del sito (PM1÷5 e PM32, installato nel maggio 2023) il più impattato è risultato essere il piezometro PM1. All'interno del punto in questione sono state sistematicamente misurate concentrazioni di tricloroetilene (di seguito "TCE") dell'ordine di diversi mg/l con un andamento che denota, seppur con lievi oscillazioni, un incremento significativo nel tempo.

Il seguente grafico riporta, per ciascuna campagna di monitoraggio effettuata sul piezometro PM1 a partire dal maggio 2018 (campagna di bianco) l'andamento delle concentrazioni del TCE e dei relativi prodotti di biodegradazione: 1,1-dicloroetilene (di seguito 1,1-DCE), 1,2-dicloroetilene (di seguito "1,2-DCE") e cloruro di vinile (di seguito "VC").

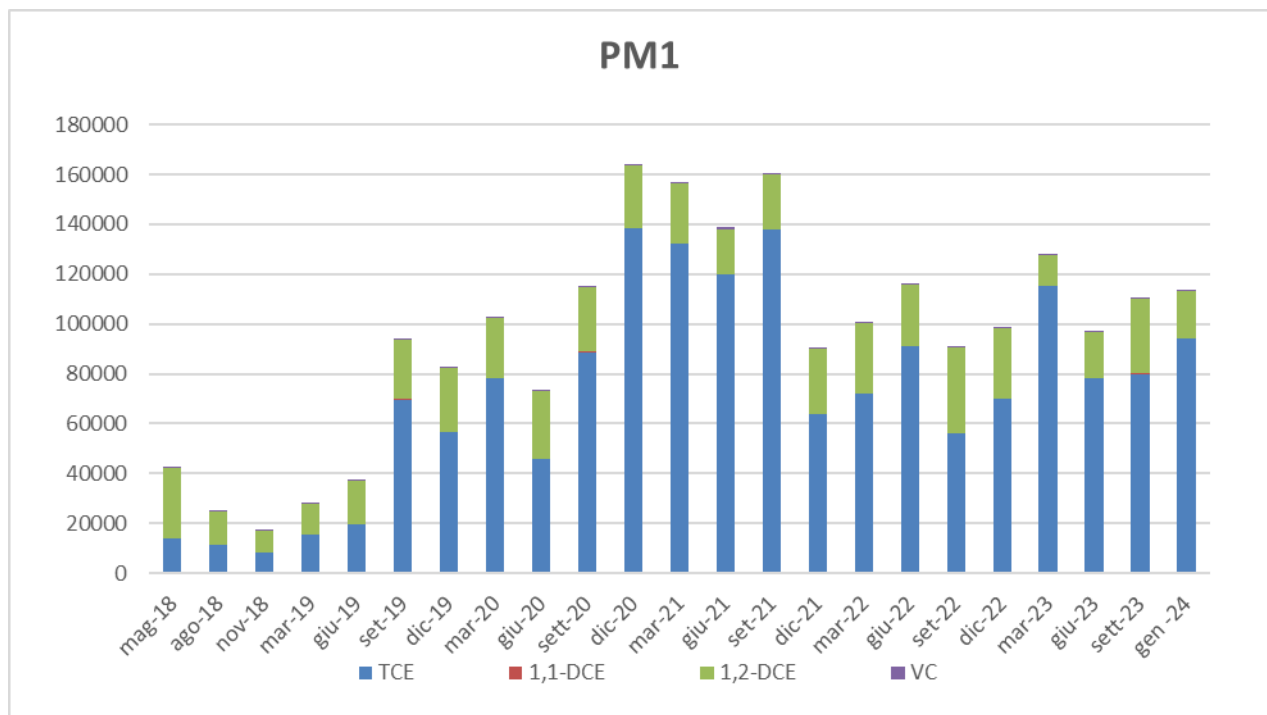
I valori di concentrazione riportati nel grafico sono espressi in µg/l.



Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica



Nel periodo compreso fra maggio 2018 e giugno 2019 sono state misurate sul piezometro PM1 concentrazioni di TCE comprese fra 8 e 20 mg/l circa. Un primo incremento significativo delle concentrazioni si è osservato nel corso della campagna di settembre 2019, in cui è stato misurato un valore dell'ordine di 70 mg/l, ovvero 3,5 volte superiore a quello rilevato nella precedente campagna di giugno. Nel periodo compreso fra dicembre 2019 e settembre 2020 sono state misurate concentrazioni comprese fra 46 e 89 mg/l circa. Un ulteriore aumento di concentrazione si è osservato nel periodo compreso fra dicembre 2020 e settembre 2021, con valori compresi fra 120 e 138 mg/l circa. Nella campagna di dicembre 2021 la concentrazione di TCE è nuovamente scesa attorno a valori dell'ordine di 64 mg/l, comunque superiori di almeno 3 volte rispetto a quelli osservati nel corso del primo anno di monitoraggio. Nel periodo compreso fra marzo 2022 e gennaio 2024 le concentrazioni del TCE si sono mantenute su valori compresi fra 56 e 115 mg/l, quindi decisamente più elevati rispetto a quelli osservati nella fase iniziale dell'intervento di bonifica.

Gli altri piezometri ubicati a monte del sito (PM2-3-4-5, PM32) hanno mostrato concentrazioni di TCE molto più basse rispetto a quelle rilevate nel punto PM1, variabili da campagna a campagna e con valori massimi misurati nel punto PM2 dell'ordine di 0,9 mg/l (campagne di marzo e dicembre 2022) e nel punto PM32 dell'ordine di 1,3 mg/l (campagna di giugno 2023). Nei suddetti piezometri sono state misurate concentrazioni particolarmente elevate dei sottoprodotti di biodegradazione del TCE, in particolare del 1,2-DCE e del VC. Le concentrazioni massime del 1,2-DCE di circa 4,9 mg/l (campagna di giugno 2020) e 24 mg/l (campagna di gennaio 2024) sono state misurate nei piezometri PM2 e PM32, rispettivamente. Le concentrazioni massime del VC di circa 7,2 mg/l (campagna di settembre 2022) e 4,5 mg/l (campagna di gennaio 2024) sono state misurate nei piezometri PM2 e PM32, rispettivamente.

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

L'andamento delle curve piezometriche, risultato costante nel tempo con locali deformazioni correlabili all'emungimento dei pozzi della barriera A, evidenzia la presenza di un asse di drenaggio principale delle acque di falda orientato in direzione E-W e passante a sud della strada che attraversa il sito; l'asse di drenaggio, come già evidenziato nell'ambito della progettazione, coincide con il paleoalveo del torrente Tora (corso d'acqua deviato e regimato per permettere la costruzione del polo industriale di Tito Scalo), caratterizzato dalla presenza di sedimenti a permeabilità relativamente maggiore rispetto ai restanti depositi presenti sul sito.

Ne deriva che il pennacchio di contaminazione di TCE in ingresso al sito, sicuramente passante per il punto PM1 viste le elevatissime concentrazioni misurate, segue l'andamento dell'asse di drenaggio principale della falda, passante indicativamente all'altezza del piezometro PM9, ubicato all'interno dell'area di trattamento di EB.

Il continuo apporto di contaminante da monte, e dei relativi sottoprodotti di biodegradazione, ha condizionato in modo evidente l'efficacia dell'intervento di bonifica effettuato in sito, provocando l'insorgenza di fenomeni di rebound correlati (tenendo conto della velocità di deflusso delle acque di falda) con gli aumenti più significativi di concentrazione misurati nel punto PM1, come illustrato al paragrafo seguente.

### 3.2. Andamento delle concentrazioni all'interno dell'area di intervento di EB

La distribuzione delle concentrazioni di TCE all'interno ed a monte dell'area di trattamento di EB è schematizzato in **Figura 3**. Ad ogni pozzo di monitoraggio è stato attribuito uno specifico colore in funzione delle concentrazioni misurate in falda nelle campagne periodiche effettuate a partire da marzo 2019 (campagna precedente all'intervento di iniezione full scale, ovvero alla prima iniezione di Fase II) fino a gennaio 2024. Per un più agevole confronto fra i risultati, è stata mantenuta, per ciascuna campagna di monitoraggio, la stessa scala colorimetrica, rappresentativa dei range di concentrazione considerati.

Dalle mappe riportate in **Figura 3** si ricava come:

- a circa 3 mesi dall'iniezione full scale, effettuata fra la fine di marzo e l'inizio di aprile 2019, si siano raggiunte, in diverse porzioni dell'area del CNR, concentrazioni di TCE inferiori a 10 µg/l (punti indicati in verde in figura) e, in generale, un diffuso miglioramento delle condizioni ambientali, con una riduzione delle concentrazioni di TCE nei piezometri più prossimi all'asse principale di drenaggio della falda compresa fra il 50% (PM19) ed il 99% (PM16). Nell'area del Consorzio ASI, caratterizzata da concentrazioni di partenza superiori, la risposta è stata variabile da punto a punto; la riduzione di concentrazione più significativa è stata osservata nel piezometro PM12 (da circa 8.600 a circa 130 µg/l);
- nella campagna di settembre 2019 siano state misurate concentrazioni di TCE inferiori a 10 µg/l praticamente in tutta l'area del CNR e concentrazioni inferiori a 50 µg/l nella maggior parte dei punti ubicati a valle dell'edificio del Consorzio ASI, ad eccezione del piezometro MPA-B-C (cluster fenestrato a diverse profondità), in cui le concentrazioni misurate sono risultate ancora

significative (comprese fra 1 e 5 mg/l circa). Un ulteriore miglioramento delle condizioni dell'area del Consorzio ASI è stato osservato nel corso della successiva campagna di dicembre 2019;

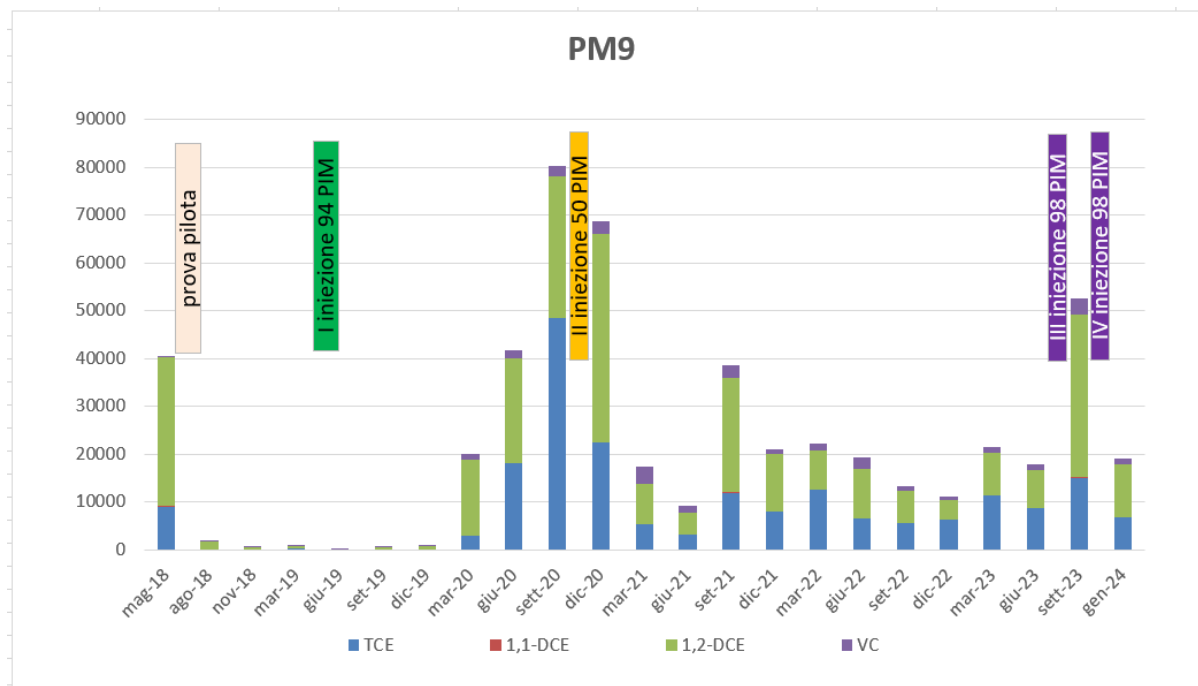
- a partire dalla campagna di marzo 2020 si sia osservato un generale aumento di concentrazione, più evidente nell'area del Consorzio ASI, in cui sono state raggiunte concentrazioni dell'ordine di 3 mg/l nel punto PM9 e di 23-28 mg/l nel piezometro cluster. L'aumento di concentrazione si è osservato anche nell'area del CNR ed è risultato più significativo nei punti posti in prossimità dell'asse di drenaggio della falda, soprattutto in PM15 e PM16, in cui sono state nuovamente raggiunte concentrazioni dell'ordine di 2-3 mg/l. Una situazione simile, ma con concentrazioni ancora più elevate nei piezometri ubicati lungo l'asse di drenaggio (soprattutto PM9, PM12 e PM13) si è osservata anche nella campagna di settembre 2020;
- nella campagna di dicembre 2020, effettuata a seguito della seconda iniezione di Fase II (condotta a inizio novembre) si sia osservato un puntuale miglioramento in alcuni piezometri ubicati a valle delle PIM oggetto di trattamento (PM12, PM17 e PM9; in quest'ultimo punto le concentrazioni TCE si sono dimezzate da circa 48 a circa 22 mg/l);
- a fronte di un aumento significativo delle concentrazioni di TCE in ingresso al sito (punto PM1) la seconda campagna di iniezione di Fase II sia risultata, in generale, meno efficace rispetto alla campagna precedente; le concentrazioni di TCE, pur con un andamento altalenante da punto a punto, si sono mantenute relativamente elevate, soprattutto nell'area coincidente con l'asse di drenaggio principale della falda;
- soltanto a seguito della seconda campagna di iniezione integrativa (effettuata nel dicembre 2023) si è osservato un generale miglioramento della qualità delle acque di falda; lungo l'asse di drenaggio principale dell'acquifero (piezometri PM9, MPA-B-C, PM16 e PM15) permangono concentrazioni di TCE relativamente elevate correlate alla massa di contaminante in ingresso al sito (rappresentata dalle concentrazioni rilevate in PM1).

Il punto in cui appare più evidente il fenomeno di rebound generato dall'aumento delle concentrazioni di contaminante in ingresso al sito è il piezometro PM9, ubicato a valle di PM1 lungo l'asse di drenaggio principale della falda. Il punto in questione è stato interessato da tutte le 3 campagne di iniezione effettuate in sito nel corso della bonifica e dalle 2 campagne di iniezione integrative successive. Il seguente grafico mostra l'andamento temporale delle concentrazioni di TCE e relativi prodotti intermedi di biodegradazione nel piezometro in questione.

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica



Dal grafico si osserva come, già a seguito della prima iniezione (Fase I) le concentrazioni di TCE si siano ridotte in modo evidente passando da valori dell'ordine di 9 mg/l (misurati nella campagna di bianco) a valori conformi alla CSC nella campagna successiva.

Fra novembre 2018 e settembre 2019 sono state misurate nel punto in questione concentrazioni altalenanti fra alcuni  $\mu\text{g/l}$  fino ad un massimo di circa 330  $\mu\text{g/l}$  nella campagna di marzo 2019. Nella campagna di dicembre 2019 sono state nuovamente raggiunte concentrazioni conformi alla CSC.

A partire da marzo 2020, con un ritardo di circa 6 mesi rispetto all'incremento osservato nel pozzo di monte PM1, si è osservato un progressivo aumento di concentrazione (circa 3 mg/l a marzo 2020, 18 mg/l a giugno 2020 e addirittura 48 mg/l a settembre 2020).

A dicembre 2020, a seguito della seconda campagna di iniezione di Fase II, la concentrazione di TCE è scesa attorno a valori di 22 mg/l e nel semestre successivo si è osservato un ulteriore decremento fino a valori dell'ordine di 3 mg/l (campagna di giugno 2021).

Nella campagna di settembre 2021 le concentrazioni sono di nuovo aumentate fino a valori dell'ordine di 12 mg/l.

Nel periodo compreso fra dicembre 2021 e settembre 2023 le concentrazioni di TCE si sono mantenute su valori compresi fra 5,6 e 15,1 mg/l circa; la concentrazione massima si è osservata nella campagna di settembre 2023, a seguito della quale, grazie all'affetto della seconda campagna di iniezione integrativa, la concentrazione è scesa nuovamente attorno a 6,8 mg/l.

L'andamento osservato nel punto PM9 indica come:

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

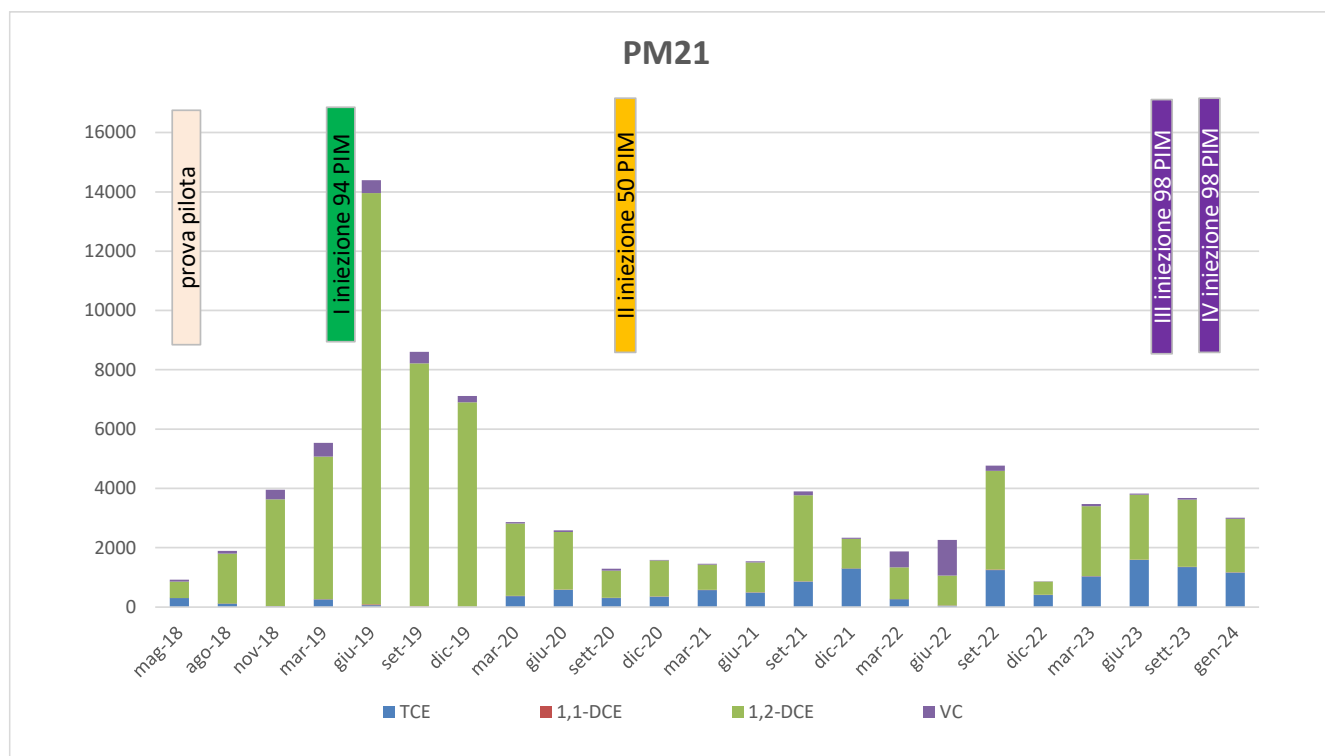
Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

- l'intervento di EB effettuato in sito sia stato efficace a ridurre in modo significativo le contrazioni di TCE presenti in falda; l'efficacia del trattamento è risultata evidente soprattutto a seguito dell'iniezione di Fase I (giugno 2018) e della seconda iniezione di Fase II (novembre 2020);
- l'apporto continuo di contaminante da monte, in concentrazioni molto più significative rispetto a quelle misurate nel corso della campagna di bianco e del primo anno di intervento, fa sì che l'effetto delle iniezioni sia relativamente limitato con l'insorgenza di evidenti fenomeni di rebound, verificatisi a partire da una distanza temporale di circa 9 mesi da ciascuna iniezione.

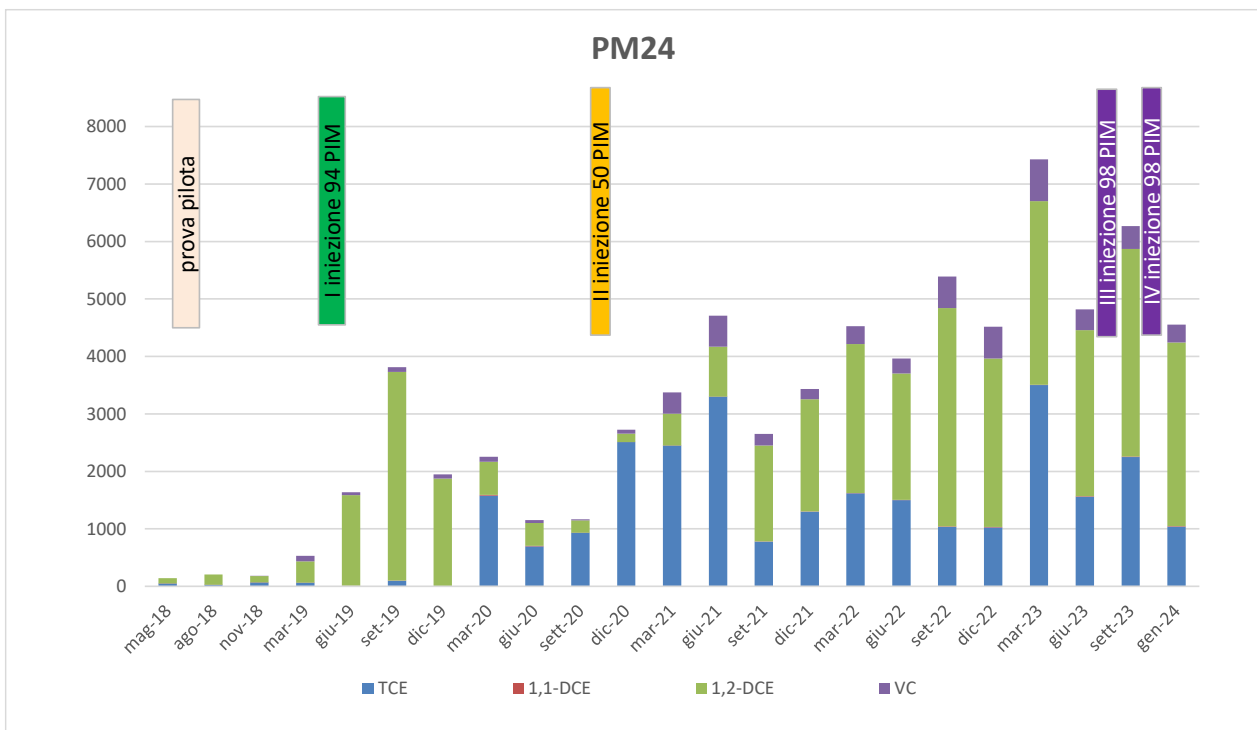
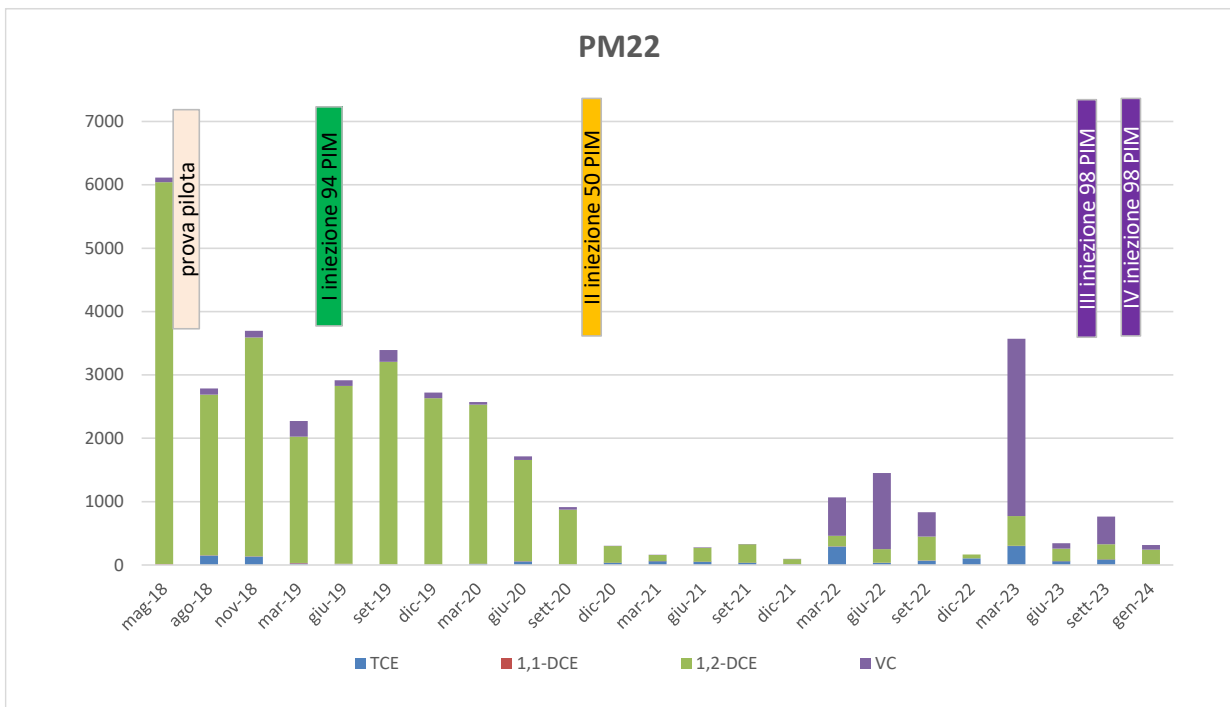
**3.3. Andamento delle concentrazioni a valle dell'area di intervento di EB**

L'andamento delle concentrazioni del TCE e dei relativi sottoprodotti di biodegradazione misurate nei piezometri PM21, PM22 e PM24 è indicativo dell'efficacia complessiva dell'intervento di EB, essendo gli stessi ubicati a valle idrogeologica di tutti i fronti di iniezione.

I seguenti grafici riportano, per ciascuna campagna di monitoraggio effettuata sui piezometri PM21, PM22 e PM24 a partire dal maggio 2018 (campagna di bianco), l'andamento delle concentrazioni del TCE e dei relativi prodotti di biodegradazione (1,1-DCE, 1,2-DCE e VC).



Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica  
**Intervento di Bonifica**  
 Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica



Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

Le concentrazioni misurate nei due piezometri di valle più vicini all'area di trattamento (PM21 e PM22) mostrano come la concentrazione totale dei solventi clorurati in falda sia costituita prevalentemente dai prodotti di degradazione del TCE, a testimonianza dell'effetto dell'intervento di iniezione effettuato.

Nel piezometro PM21 si osserva un significativo decremento delle concentrazioni di 1,2-DCE a partire dalla campagna di settembre 2019, ovvero a circa 6 mesi di distanza dalla prima campagna di iniezione di Fase II, effettuata nel marzo 2019. In tale piezometro, a partire da marzo 2020, si osservano concentrazioni di TCE altalenanti, fino a valori dell'ordine di 1,3 mg/l (campagna di dicembre 2021) e 1,6 mg/l (campagna di giugno 2023), legati sicuramente alle concentrazioni in ingresso da monte, comunque elevate nonostante l'effetto delle iniezioni effettate in sito.

Nel piezometro PM22 si osserva, a seguito della prima campagna di iniezione di Fase II, un evidente trend decrescente delle concentrazioni di 1,2-DCE, situazione che rimane invariata fino alla campagna di dicembre 2021. A partire da marzo 2022, contestualmente ad un aumento della concentrazione del TCE, si osserva un significativo aumento delle concentrazioni del VC, con un picco di 2,8 mg/l osservato nel marzo 2023.

Nel piezometro PM24, probabilmente a causa della maggiore distanza fra il punto in questione ed i fronti di iniezione di valle, dell'ordine di almeno 100 m, gli effetti dovuti alle diverse campagne di iniezione effettuate in sito sono meno evidenti e di difficile interpretazione. Nel periodo compreso fra settembre 2021 e dicembre 2022 le concentrazioni di TCE risultano inferiori a quelle osservate a fine 2020 e nella prima metà del 2021. Nel marzo 2023 la concentrazione di TCE, dell'ordine di 3,5 mg/l, risulta essere circa il triplo rispetto a quella misurata nelle campagne precedenti. Nelle tre campagne successive si osservano concentrazioni confrontabili con quelle misurate nel corso del 2022.

#### 4. VALUTAZIONE COMPLESSIVA DELL'EFFICACIA DELL'INTERVENTO DI BONIFICA

Le concentrazioni di TCE e dei relativi prodotti di degradazione misurate in falda all'interno dell'area oggetto di intervento di EB sono il risultato di un effetto combinato associato:

- in parte all'intervento di EB stesso, che ha permesso di incrementare i naturali processi di dechlorurazione riduttiva già presenti nell'acquifero;
- in parte al trattamento delle acque emunte dalla barriera idraulica A, ubicata all'interno dell'area di intervento, che ha permesso di rimuovere parte del contaminante presente in falda.

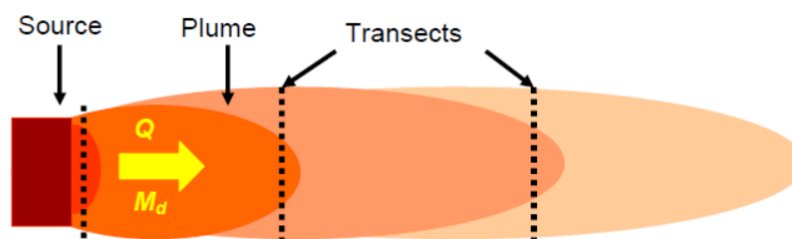
Premesso quanto sopra, la valutazione dell'efficacia dell'intervento di bonifica non può che essere condotta analizzando, nel complesso, l'andamento della riduzione delle concentrazioni senza poter quantificare, separatamente, l'effetto delle singole tecnologie di bonifica applicate (EB e Pump and Treat).

La maggior parte delle valutazioni relative ai siti caratterizzati da contaminazione delle acque sotterranee si basano sull'analisi delle concentrazioni dei contaminanti. Per tale analisi, si rimanda al capitolo precedente, da cui si ricava la complessiva efficacia dell'intervento di bonifica finora attuato in sito.

Oltre alle concentrazioni, al fine della valutazione complessiva dell'efficacia dell'intervento, si possono anche analizzare i flussi di massa dei contaminanti attraverso specifiche sezioni dell'acquifero.

La portata di massa (mass discharge) è una stima integrata del flusso di massa e rappresenta quindi la massa totale di un determinato contaminante trasportato dalle acque sotterranee attraverso una specifica sezione dell'acquifero. La portata di massa è quindi espressa come massa/tempo (ad esempio g/giorno).

Si riportano alcune immagini tratte dalla letteratura di settore che schematizzano il concetto di portata di massa.

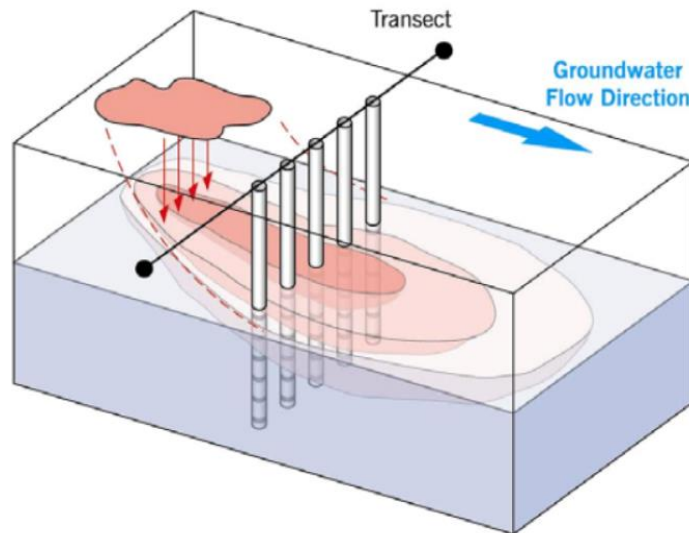


**Across any transect, a contaminant plume conveys:**

- Groundwater discharge,  $Q = L^3/t$  (e.g., volume/d)
- Contaminant mass discharge,  $M_d = \text{mass/time}$  (e.g., g/d)



Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica  
Intervento di Bonifica  
Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica



La portata di massa viene calcolata combinando i dati di concentrazione con la velocità di Darcy delle acque sotterranee.

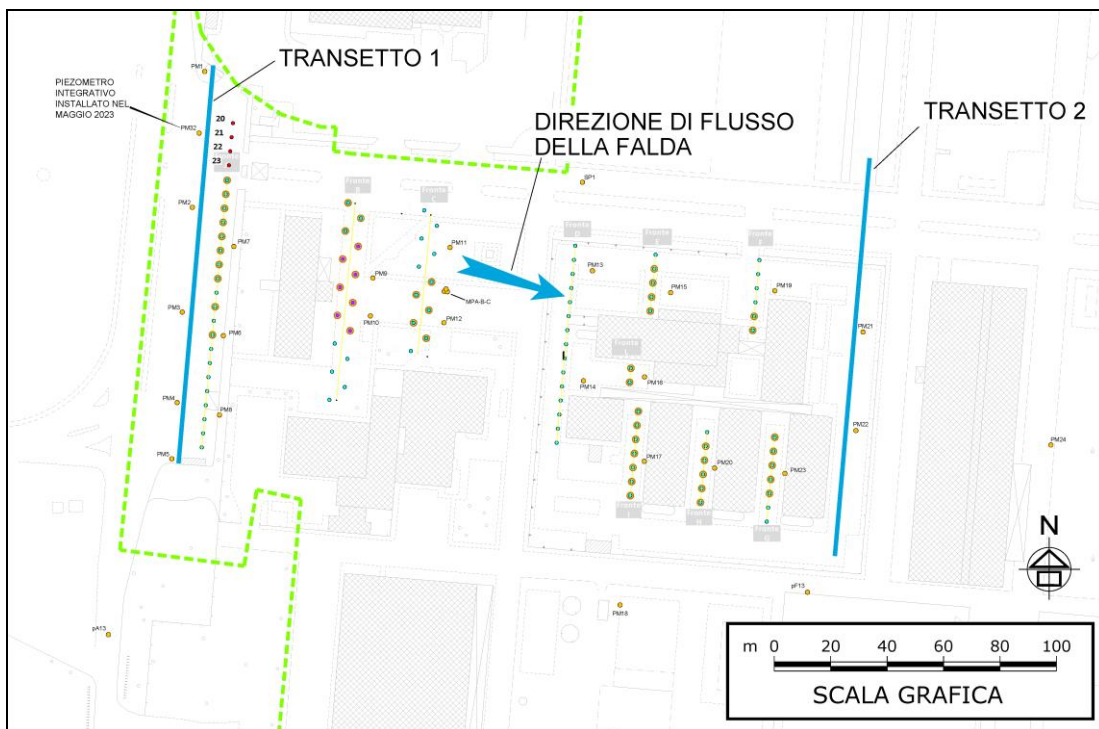
Attraverso il metodo dei “transetti”, in cui i singoli punti di monitoraggio vengono utilizzati per integrare i dati di concentrazione con il flusso idrico sotterraneo, è possibile stimare la quantità di contaminanti (massa) che passa attraverso le sezioni specifiche dell’acquifero (dette “transetti”) per unità di tempo.

Nel caso specifico, per il calcolo della massa dei contaminanti presenti nell’acquifero sono stati considerati due transetti, ubicati rispettivamente a monte (transetto 1) e a valle (transetto 2) dell’area di trattamento, come mostrato nella seguente figura.

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica



Per il calcolo del flusso di massa sono stati utilizzati i risultati acquisiti nel corso dei monitoraggi periodici effettuati in sito a partire dalla campagna di bianco (maggio 2018) fino alla campagna di gennaio 2024.

Per il calcolo della massa di contaminante in ingresso ed in uscita dall'area di trattamento è stato adottato il seguente approccio:

- nel transetto 1, le concentrazioni medie annue dei principali contaminanti (TCE, 1,2-DCE e VC) in ingresso al sito sono state calcolate a partire dalle concentrazioni misurate, in ciascuna campagna di monitoraggio, in corrispondenza dei punti PM1, PM32, PM2, PM3, PM4 e PM5;
- nel transetto 2, le concentrazioni medie annue dei principali contaminanti (TCE, 1,2-DCE e VC) in uscita dall'area di trattamento EB sono state calcolate a partire dalle concentrazioni misurate, in ciascuna campagna di monitoraggio, in corrispondenza dei punti PM21 e PM22;
- per entrambi i transetti, dalle carte piezometriche elaborate per ciascuna campagna, sono stati calcolati i valori del gradiente idraulico locale dai quali si è successivamente determinato, in corrispondenza di ciascun transetto, il valore medio annuo di gradiente idraulico;
- per il calcolo del flusso idrico sotterraneo passante per ogni transetto, si è fatto riferimento ad un valore di coefficiente di conducibilità idraulica ( $k$ ) rappresentativo della porzione di acquifero in esame; a tale scopo, è stato considerato il coefficiente  $k$  ricavato dalla calibrazione del modello di

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

flusso numerico, utilizzato per la progettazione delle barriere idrauliche, risultato, nell'area intercettata da entrambi i transetti, pari a  $5,5 \cdot 10^{-5}$  m/s;

- una volta definito il coefficiente di conducibilità idraulica  $k$  rappresentativo dell'area di interesse, tale parametro è stato moltiplicato per il gradiente (medio annuo), al fine di calcolare, per ciascun anno, la velocità di Darcy ( $q=k \cdot i$ );
- una volta definita la velocità di Darcy ( $q$ ) è stata calcolata la portata ( $Q$ ) della falda attraverso ciascun transetto, moltiplicando la velocità  $q$  per l'area del transetto (data dalla lunghezza del transetto per lo spessore saturo dell'acquifero, pari a 19 m per entrambi i transetti);
- una volta calcolata la portata media annua della falda è stato calcolato il flusso di massa, moltiplicando la concentrazione media annua di ciascun contaminante ( $C$ ) per la portata della falda ( $Q$ );
- infine, per ciascun anno e per entrambi i transetti considerati è stata ricavata la massa totale annua di ciascun contaminante, espressa in kg; tale calcolo è stato effettuato moltiplicando il flusso di massa per il tempo, espresso in giorni.

Nella tabella seguente si riporta, per ciascun contaminante considerato (TCE e relativi principali prodotti di degradazione), la massa totale in ingresso al sito; sommando la massa dei singoli contaminanti è stata calcolata la massa totale in ingresso al sito per ciascun anno di intervento, a partire dal maggio 2018.

Transetto 1 – ingresso all'area di trattamento							
Parametro	U.M.	05-12/2018	2019	2020	2021	2022	2023 – 01/24
CV	kg	3,3	7,1	24,5	39,7	71,5	78,5
1,1-DCE	kg	0,45	2,0	3,5	0,90	1,8	3,7
1,2-DCE	kg	151,1	243,1	831,9	317,9	442,8	633,8
<b>TCE</b>	kg	<b>104,3</b>	<b>802,6</b>	<b>2439,8</b>	<b>1541,5</b>	<b>1035,9</b>	<b>1249,5</b>
<b>Sommatoria</b>	kg	<b>259,2</b>	<b>1054,7</b>	<b>3299,6</b>	<b>1900,0</b>	<b>1551,9</b>	<b>1965,5</b>

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

Nella tabella seguente si riporta, per ciascun contaminante considerato, la massa totale in uscita dall'area di trattamento.

Transetto 2 – uscita dall'area di trattamento							
Parametro	U.M.	05-12/2018	2019	2020	2021	2022	2023 – 01/24
CV	kg	2,4	8,2	0,29	0,57	9,0	8,4
1,1-DCE	kg	0,10	0,31	0,02	0,05	0,08	0,11
1,2-DCE	kg	57,5	174,1	10,6	15,1	14,8	23,1
<b>TCE</b>	kg	<b>2,3</b>	<b>1,4</b>	<b>1,6</b>	<b>7,8</b>	<b>5,4</b>	<b>13,1</b>
<b>Sommatoria</b>	kg	<b>62,3</b>	<b>184,0</b>	<b>12,5</b>	<b>23,5</b>	<b>29,3</b>	<b>44,7</b>

La quantificazione della massa dei solventi clorurati bonificata esclusivamente mediante EB non si rende possibile per via dell'azione simultanea della barriera idraulica A di emungimento, che ha determinato un'importante rimozione della contaminazione in fase disciolta.

Premesso quanto sopra, la quantificazione della massa di solventi in uscita dal transetto 2 consente di valutare l'efficacia complessiva di entrambe le tecniche di bonifica applicate (EB e Pump&Treat).

Si fa presente che la massa di contaminante calcolata al transetto 2 è naturalmente influenzata dal continuo apporto di massa in ingresso all'area di bonifica, che ha mostrato un trend in crescita nel corso dell'intervento di bonifica stesso, come si ricava dall'esame delle concentrazioni nel piezometro PM1 (si veda capitolo precedente) e dalla massa di contaminante calcolata al transetto 1.

Complessivamente, nel periodo in esame, si stima che siano entrati in sito circa 10.000 kg di solventi clorurati, di cui circa 7.100 kg di TCE.

Nell'anno 2020 si rileva il valore massimo di massa in ingresso, pari a circa 3.300 kg di solventi di cui circa 2.400 kg di TCE; negli anni successivi la massa totale si mantiene su valori di circa 1.500-2.000 kg di solventi e di 1.000-1.500 kg di TCE.

Attraverso il transetto 2 (quindi a valle dell'area di trattamento) sono stati quantificati complessivamente, nel periodo in esame, circa 356 kg di solventi clorurati (a fronte di circa 10.000 kg in ingresso), di cui circa 32 kg di TCE (a fronte di 7.100 kg).

Nel periodo di osservazione si stima che attraverso il transetto 2 la massa in transito dei sottoprodotti di biodegradazione sia stata pari a 295 kg per il 1,2-DCE e pari a circa 29 kg per il VC.

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica

Intervento di Bonifica

Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

Mentre il rapporto delle percentuali dei solventi clorurati in ingresso al sito mostra una prevalenza di TCE, a valle dell'area di trattamento prevalgono i sottoprodotti di biodegradazione, ovvero 1,2-DCE e VC.

Quanto osservato, conferma l'efficacia dell'intervento di EB nel biodegradare la massa di TCE presente nell'acquifero, trasformandola nei relativi sottoprodotti.

Dal bilancio di massa "ingresso – uscita" dall'area di trattamento pare evidente un'importante rimozione della massa dei solventi clorurati dalla falda, nonostante il continuo apporto da monte.

La notevole riduzione di massa osservata all'interno dell'area di intervento è da attribuirsi, oltre che all'effetto dell'intervento di EB, anche all'esercizio della barriera idraulica A.

Considerando le concentrazioni di contaminante misurate direttamente all'interno dei pozzi barriera e le portate di esercizio degli stessi è stata stimata la massa di contaminante rimossa dalla barriera idraulica A per ciascun anno di completo esercizio. I risultati dei calcoli effettuati sono riportati nella seguente tabella.

Barriera A					
Parametro	U.M.	2020	2021	2022	2023
Parametro	U.M.	2020	2021	2022	2023
CV	kg	65,2	84,5	23,1	18,2
1,1-DCE	kg	0,82	0,66	0,27	0,43
1,2-DCE	kg	369,7	388,7	80,3	120,0
<b>TCE</b>	kg	<b>14,0</b>	<b>57,5</b>	<b>26,9</b>	<b>25,5</b>
<b>Sommatoria</b>	kg	<b>449,8</b>	<b>531,3</b>	<b>130,7</b>	<b>164,2</b>

Dai dati riportati in tabella si osserva come la barriera A, oltre alla funzione principale di controllare il flusso nell'area di trattamento EB, abbia rimosso quantitativi importanti dei solventi clorurati. Nel periodo 2020-2023 sono stati complessivamente rimossi circa 1.300 kg di solventi clorurati di cui circa 124 kg di TCE, 960 kg di 1,2-DCE e 191 kg di VC.

Lo stesso calcolo è stato effettuato, per completezza, anche per la barriera di valle. La massa di contaminante calcolata, rispetto alla barriera di monte, risulta essere nettamente inferiore (in relazione alle concentrazioni più basse), anche grazie all'effetto simultaneo della biodegradazione in atto.

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica  
Intervento di Bonifica  
Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

Barriera B					
Parametro	U.M.	2020	2021	2022	2023
CV	kg	0,12	0,12	0,12	0,098
1,1-DCE	kg	0,07	0,08	0,04	0,064
1,2-DCE	kg	43,5	59,2	19,2	19,1
<b>TCE</b>	kg	<b>5,5</b>	<b>3,8</b>	<b>1,8</b>	<b>1,2</b>
<b>Sommatoria</b>	kg	<b>49,2</b>	<b>63,2</b>	<b>21,1</b>	<b>20,5</b>

Nel periodo 2020-2023 sono stati complessivamente rimossi dalla barriera B (barriera idraulica di valle) circa 154 kg di solventi clorurati di cui circa 12 kg di TCE, 141 kg di 1,2-DCE e 0,5 kg di VC.

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica  
Intervento di Bonifica  
Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

## 5. CONCLUSIONI

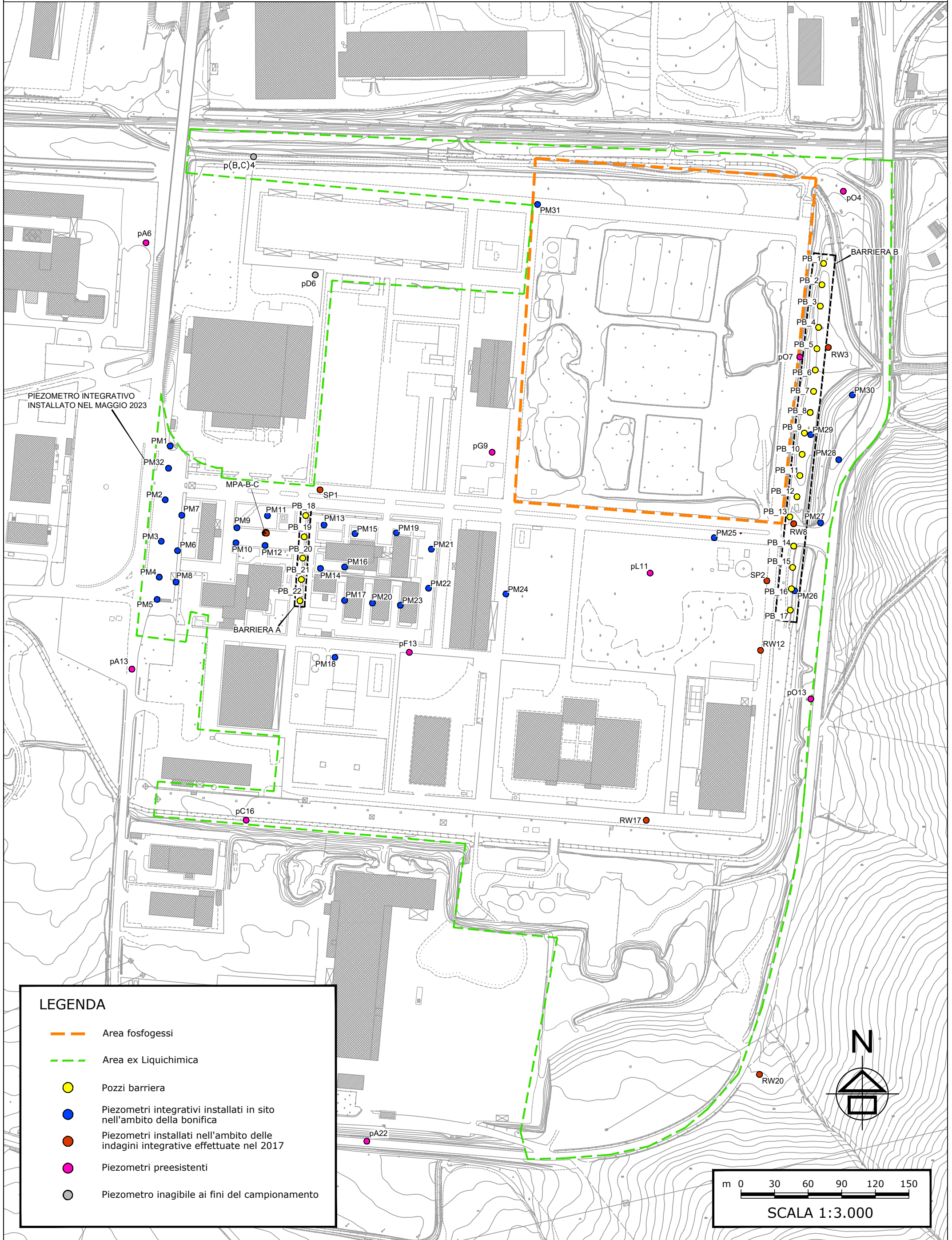
Sulla base della elaborazione dei dati riportata nel presente documento è possibile concludere quanto segue:

- i dati acquisiti mostrano una buona efficacia complessiva dell'intervento di bonifica attuato in sito nel rimuovere la massa di contaminate in ingresso allo stesso. Sulla base dei flussi di massa calcolati, complessivamente l'intervento di biodegradazione combinato al *Pump&Treat* ha infatti permesso di gestire una massa di contaminanti in ingresso al sito dell'ordine di 10.000 kg di solventi;
- si ribadisce come l'efficacia dell'intervento in termini di decontaminazione della falda (inteso anche come completamento del processo di dechlorinazione riduttiva) sia comunque stata compromessa dall'apporto continuo di tricloroetilene (in aumento se confrontiamo i dati del 2018 con quelli degli anni successivi) all'ingresso del sito derivante dalla sorgente di contaminazione tuttora attiva ubicata in area Ex Daramic.

Sito di Interesse Nazionale Tito - Bonifica e messa in sicurezza permanente sito Ex Liquichimica  
Intervento di Bonifica  
Relazione di sintesi dell'efficacia dell'intervento di bonifica

# FIGURE





**LEGENDA**

- Area fosfogessi
- Area ex Liquichimica
- Pozzi barriera
- Piezometri integrativi installati in sito nell'ambito della bonifica
- Piezometri installati nell'ambito delle indagini integrative effettuate nel 2017
- Piezometri preesistenti
- Piezometro inagibile ai fini del campionamento

m 0 30 60 90 120 150

**SCALA 1:3.000**

LEGENDA

- Pozzi di monitoraggio
- PIM installate e trattate nell'ambito della Fase I di intervento
- PIM installate nell'ambito della Fase II di intervento
- PIM integrative installate nel maggio 2023
- PIM trattate nella seconda iniezione di Fase II di intervento

PIEZOMETRO INTEGRATIVO  
INSTALLATO NEL  
MAGGIO 2023

