

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI SCIENZE MM. FF. NN.

Dipartimento di Geoscienze

Direttore Prof. Cristina Stefani

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN

GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

**“DERAGLIAMENTO E ROVESCIMENTO DI  
UNA FERROCISTERNA CONTENENTE  
GASOLIO: MESSA IN SICUREZZA  
D’EMERGENZA, PIANO DI  
CARATTERIZZAZIONE ED IPOTESI DELLE  
TECNICHE DI BONIFICA APPLICABILI”**

*Relatore: Prof. Leonardo Mason*

*Correlatori: Dott. Dario Biavati*

*Dott. Lisa Cantarella*

*Laureando: Christian Asnicar*

ANNO ACCADEMICO 2014/2015



*...Alla mia famiglia e  
a tutti coloro che in questi cinque anni mi hanno sostenuto...*



# Indice

INTRODUZIONE	1
1. Normativa di riferimento	3
1.1 D.Lgs. 22/97 o “Legge Ronchi”	3
1.2 D.P.C.M. del 12/02/1999 e D.M. 471/99 del 25/10/1999	5
1.3 Atto integrativo D.P.C.M. del 15/11/ 2001	8
1.4 D.Lgs. n. 152 del 03/04/2006 “Norme in materia ambientale”	10
1.4.1 Procedure operative e normative: Art. 242	10
1.4.2 Aree contaminate di ridotte dimensioni e procedure semplificate: Art. 242	14
1.4.3 Siti di interesse nazionale: Art. 252 e Art. 252.bis	16
1.5 Nuovo accordo di programma per Porto Marghera del 14/04/2012	18
1.6 Riperimetrazione del SIN con il D.M. del 24/04/2013	21
1.7 Deliberazione della giunta regionale n. 1732 del 03/10/ 2013	22

2. Inquadramento del sito e descrizione degli eventi	23
2.1 Inquadramento del sito oggetto di studio	23
2.2 Descrizione degli eventi	24
3. Interventi di Messa in Sicurezza d’Emergenza	26
3.1 Fase 1: attività effettuate nel periodo 13/12/2013-31/12/2013	27
3.1.1 Attività preliminari all’esecuzione della fase 1	27
3.1.2 Infissione delle palancole metalliche	29
3.1.3 Allestimento di un sistema well-point	32
3.1.4 Caratterizzazione dei rifiuti	34
3.1.5 Caratterizzazione del terreno fondo scavo	36
3.1.6 Analisi chimiche eseguite sui campioni di terreno prelevati nella Fase 1	39
3.1.7 Operazioni conclusive della fase 1	42
3.1.8 Realizzazione di sondaggi a carotaggio continuo in prossimità delle pareti	44
3.1.9 Risultati delle analisi chimiche sui terreni prelevati lungo le pareti	49
3.2 Fase 2: attività effettuate nel periodo 17/02/2014-22/02/2014	51

3.2.1	Operazioni preliminari della fase 2: realizzazione di sondaggi a carotaggio continuo	51
3.2.2	Risultati delle analisi chimiche eseguite sui campioni prelevati in data 21-23/01/2014	57
3.2.3	Operazioni della fase 2	58
3.2.4	Risultati delle analisi chimiche eseguite sui campioni prelevati durante la fase 2	62
3.3	Impianto Pump & Stock	64
3.4	Proseguimento degli interventi di Messa in Sicurezza d'Emergenza	68
4.	Piano di caratterizzazione	69
4.1	Ubicazione e delimitazione dell'area	70
4.1.1	Microrilievo	71
4.2	Caratterizzazione climatica	74
4.3	Inquadramento idro-geologico generale	82
4.3.1	Inquadramento geologico generale	85
4.3.2	Inquadramento idrogeologico generale	98
4.3.3	Sintesi dell'inquadramento idro-geologico generale	106
4.4	Inquadramento idro-geologico sito-specifico	107

4.4.1	Inquadramento geologico sito-specifico	108
4.4.2	Inquadramento idrogeologico sito-specifico	112
4.5	Modello concettuale preliminare del sito	122
4.6	Piano di investigazione	135
5.	Ipotesi sulle tecniche di bonifica utilizzabili nel sito	144
5.1	Scelta della tecnologia di bonifica da adottare e criteri utilizzati per la scelta	146
5.2	Scelta della migliore tecnologia applicabile nel sito	156
6.	Conclusioni	161
	Allegati	165
	Allegato 1: stratigrafie eseguite durante le operazioni di MISE	167
	Allegato 2: Rilievi piezometrici effettuati durante le operazioni di MISE	177
	Allegato 3: Descrizione delle tecnologie applicabili per la bonifica dei terreni e delle acque sotterranee	185
	Tavole	203
	Tavola 1: Ubicazione del sito	205



Tavola 2: Ubicazione dei punti di indagine eseguiti in fase di MISE	207
Tavola 3: Sezioni stratigrafiche dei profili	211
Tavola 4: Ubicazione dei punti di indagine proposti nel Piano di Investigazione	215
Bibliografia	217



## **INTRODUZIONE**

Nel mese di dicembre del 2013, a Porto Marghera si verificò uno sversamento di gasolio da combustione a seguito del deragliamento di una ferrocisterna.

La Società ERF Esercizio Raccordi Ferroviari di Porto Marghera S.p.A., in qualità di concessionario dell'area, avviò immediatamente il procedimento di ripristino ambientale del sito contaminato ai sensi del D.Lgs. 152/06 e incaricò la Società S.G.M. Geologia e Ambiente S.r.l. di effettuare i necessari interventi di Messa in Sicurezza d'Emergenza.

Grazie a questa Società, che si è resa disponibile per un'attività di stage, ho potuto avvicinarmi a queste problematiche e affrontare un caso reale, seguendo la realizzazione degli interventi di messa in sicurezza d'emergenza attuati nel sito; inoltre, ho sviluppato in maniera autonoma il Piano di Caratterizzazione, il Modello Concettuale Preliminare del sito e ipotizzato quali possano essere le tecniche più efficaci nel bonificare l'area, in base alla geologia e all'idrogeologia che la caratterizza e alle sostanze chimiche coinvolte dall'inquinamento.

La collocazione del sito studiato è tale da rendere il caso molto particolare sotto molteplici aspetti: l'iter amministrativo che si deve applicare per intraprendere il procedimento di ripristino ambientale risulta molto complesso, in quanto rientra in una zona che fino in data 24/04/2013 apparteneva al Sito di Interesse Nazionale (SIN) di Venezia – Porto Marghera e solo successivamente ne è stata esclusa. All'interno di tale sito valgono quindi, oltre alla normativa vigente a livello nazionale, anche particolari Accordi (es. Accordi di Programma, Par. 1.5). Ulteriore peculiarità relativa al sito, e che ne rende ancor più complessa la trattazione dal punto di vista tecnico è da considerarsi la presenza di contaminazioni storiche legate a materiali di riporto utilizzati in passato per l'imbonimento dell'area.

La zona interessata dall'inquinamento, oltre ad essere in un'area ex-SIN, a seguito della ripermimetrazione del Sito di Interesse Nazionale di Porto Marghera di cui il Decreto Ministeriale del 24 Aprile 2013, si trova in una zona di bassa pianura alluvionale caratterizzata da una forte eterogeneità geologica e idrogeologica dove

i livelli piezometrici della falda sono continuamente influenzati dalla marea, rendendo quindi difficile determinare quale sia la direzione di deflusso principale delle acque sotterranee e la distribuzione tridimensionale degli inquinanti.

Inoltre, non si deve trascurare il fatto che la contaminazione è avvenuta in un'area dove risultano in esercizio attività industriali e convogli ferroviari in transito.

In base alle condizioni geologiche ed idrogeologiche sito-specifiche, alla posizione particolare in cui si trova il sito e in funzione ai risultati delle analisi chimiche effettuate durante gli interventi di Messa in Sicurezza d'Emergenza, è stato possibile elaborare il modello concettuale preliminare del sito, cui ha fatto seguito lo sviluppo di una proposta di indagini integrative di dettaglio (Piano di Caratterizzazione), finalizzate ad ottenere un quadro maggiormente esaustivo relativamente allo stato di contaminazione del sito. Infine, sulla base delle informazioni disponibili, sia dal punto di vista geologico ed idrogeologico, che dal punto di vista chimico, è stato messo in atto un processo di selezione delle tecnologie di bonifica che ha consentito di identificare un'ipotesi di intervento applicabile al sito oggetto di studio.

L'elaborato di tesi è stato suddiviso in tre parti: nella prima viene descritto l'inquadramento normativo, cioè l'iter amministrativo e le norme che interessano la bonifica dei siti contaminati; nella seconda parte vengono descritti gli interventi di messa in Sicurezza d'Emergenza; infine la terza parte contiene la descrizione idro-geologica dell'area e la descrizione del processo di selezione della tecnologia applicabile al sito.

# **1. Normativa di riferimento**

Nel presente capitolo verrà illustrata la normativa di riferimento per i siti contaminati, al fine di evidenziarne l'evoluzione nel corso degli anni e, soprattutto, la complessità collegata al sito di interesse nazionale di Porto Marghera per il quale, in particolar modo con l'ultimo Accordo dell'aprile 2012, sono state introdotte specifiche linee guida per gestire problematiche relative alla contaminazione di terreni e acque sotterranee.

## **1.1 D.Lgs. 22/97 o “Legge Ronchi”**

Una delle prime normative in campo ambientale fu il Decreto Legislativo (D. Lgs.) n. 22 emanato nel 1997.

Questo trattava la bonifica principalmente nell'Art. 17 dove si riportava:

- La definizione di sito contaminato;
- I limiti di accettabilità come criterio per definire la contaminazione e come obiettivo di bonifica;
- L'introduzione dell'analisi di rischio;
- Gli obblighi e l'introduzione di nuove figure come il soggetto obbligato alla bonifica, il proprietario non responsabile, lo Stato, le regioni e gli enti locali;
- Le sanzioni penali per chi non rispettasse le indicazioni fornite dai vari commi.

Il fatto che la prima normativa in materia di gestione dei rifiuti e bonifica dei siti contaminanti, sia stata emanata solamente alla fine degli anni novanta, evidenzia come questa materia sia nuova dal punto di vista legislativo ed operativo.

L'area industriale di Porto Marghera è stata individuata come Sito di Interesse Nazionale (SIN) con la norma L. 426/98 (G.U. n. 291 del 14/12/1998), dove viene riportato il seguente comma:

*“Sono considerati primi interventi di bonifica di interesse nazionale quelli compresi nelle seguenti aree industriali e siti ad alto rischio ambientale i cui ambiti sono perimetrati (...) dal Ministro dell'ambiente (...):*

- *Venezia (Porto Marghera);”.*

## **1.2 D.P.C.M. del 12/02/1999 e D.M. 471/99 del 25/10/1999**

In seguito, per garantire e mantenere nel sito condizioni ottimali di coesistenza tra tutela dell'ambiente e sviluppo industriale fu sottoscritto, il giorno 21 ottobre 1998, l'Accordo per la Chimica di Porto Marghera presso il Ministero dell'Industria, Commercio e Artigianato.

La sua approvazione avvenne con il decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 12 Febbraio 1999 (D.P.C.M. del 12/02/1999).

Quest'accordo si poneva i seguenti obiettivi:

- Innovazione, competizione, impiego: indurre investimenti industriali adeguati, con l'obiettivo di dotare gli impianti esistenti delle migliori tecnologie ambientali e renderli concorrenziali sul piano europeo, garantendone l'economicità nel tempo e assicurando il mantenimento, il rilancio e la qualificazione dell'occupazione;
- Risanare e tutelare l'ambiente attraverso azioni di disinquinamento, bonifica o messa in sicurezza dei siti, di riduzione delle emissioni in atmosfera e in Laguna.

Pochi mesi più tardi, il 25/10/1999, uscì nella Gazzetta Ufficiale n. 293, il Decreto Ministeriale n. 471 (D.M. 471/99). In questo provvedimento, articolato in 18 articoli e 5 allegati, vennero trattati:

- I limiti di accettabilità della contaminazione in base alla specifica destinazione d'uso del sito da bonificare e in base alla fase del terreno interessata all'inquinamento;
- Si specificarono le procedure di prelievo e l'analisi dei campioni;
- Furono precisati i criteri per la progettazione delle bonifiche come il piano della caratterizzazione e i progetti preliminari e definitivi;
- La procedura di autodenuncia del sito contaminato e i conseguenti effetti giuridici.

Quest'ultimo decreto ministeriale è stato molto importante poiché è stata la prima normativa a descrivere nei minimi dettagli quando un sito deve essere considerato contaminato, come deve essere affrontato l'inquinamento e ha fornito una tabella con i valori limiti accettabili nel sottosuolo o nelle acque sotterranee a seconda della destinazione d'uso del sito.

Una prima perimetrazione del Sito di Interesse Nazionale di Venezia si ebbe con il Decreto Ministeriale del 23 febbraio 2000, nel quale troviamo l'articolo I che riporta il seguente comma:

*“Le aree da sottoporre ad interventi di caratterizzazione, messa in sicurezza, bonifica, ripristino ambientale e attività di monitoraggio, sono individuate all'interno del perimetro provvisorio indicato nella cartografia in scala 1:100000, allegata al presente decreto. La cartografia ufficiale è conservata in originale presso il Ministero dell'Ambiente ed in copia conforme presso la Regione Veneto (...).”*

La perimetrazione effettuata è visibile nella seguente figura (Fig.1.1):



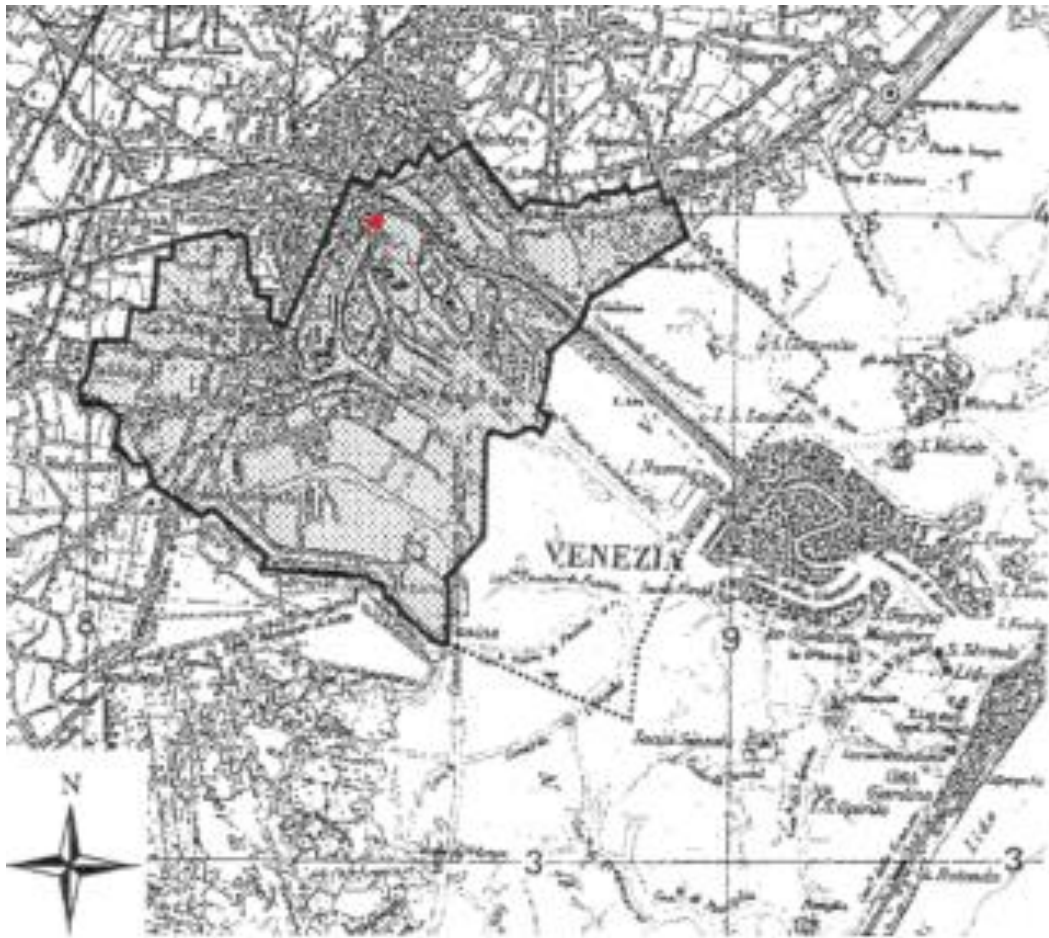


Fig.1.1: Perimetrazione del Sito di Interesse Nazionale. In rosso viene evidenziato il sito oggetto di studio.

Come si può notare nella figura sopra riportata, con il D.M. del 23 Febbraio 2000, l'area interessata dall'inquinamento di gasolio rientrava nel perimetro del Sito di Interesse Nazionale.

### **1.3 Atto integrativo D.P.C.M. del 15/11/2001**

Per integrare gli obiettivi posti dall'Accordo per la Chimica di Porto Marghera decretato il 12/02/1999, nel giorno 15 dicembre 2000 è stato stipulato un Atto Integrativo dell'Accordo, poi approvato con D.P.C.M. del 15 novembre 2001. Quest'accordo fu redatto al fine di costituire e mantenere nel tempo a Porto Marghera condizioni ottimali di coesistenza tra tutela dell'ambiente e sviluppo produttivo nel settore chimico, in un quadro di certezze gestionali.

Il 14 dicembre 2006, presso il Ministero dello Sviluppo Economico è stato accordato un Tavolo di Lavoro che ha portato alla creazione di un Protocollo d'Intesa su Porto Marghera. L'approvazione del documento ebbe come scopo il perseguimento di obiettivi molto chiari come:

- Mantenere a Porto Marghera condizioni di certezza gestionale per le imprese operanti, che si combinano con le esigenze di tutela dell'ambiente a partire dal ciclo integrato della petrolchimica;
- Garantire una politica di sviluppo sostenibile in grado di produrre una significativa riduzione dell'impatto ambientale delle attività produttive del territorio;
- Garantire la continuità produttiva e la competitività delle attività chimiche a partire dal ciclo del cloro attraverso il bilanciamento cloro CVM-PVC;
- Mantenere i livelli occupazionali.

Con l'assenso dell'Atto Integrativo dell'Accordo di Programma per la Chimica di Porto Marghera si definì l'elaborazione e la creazione di un Master Plan finalizzato ad individuare gli interventi applicabili nonché le priorità e i tempi delle iniziative da prendere nel sito.

Il Master Plan, approvato dalla Conferenza dei Servizi del 22 aprile 2004, ebbe come scopi prefissati:

- Un preciso quadro conoscitivo circa il grado e la qualità delle contaminazioni presenti nelle diverse matrici;
- Le tipologie degli interventi di risanamento ritenute tecnicamente ed economicamente praticabili applicando le migliori tecnologie disponibili, garantendo comunque il mantenimento delle produzioni industriali e preferendo gli interventi che favoriscono il trattamento nel sito e il riutilizzo del suolo, del sottosuolo e dei materiali di riporto sottoposti a bonifica;
- Le modalità organizzative e le soluzioni tecnologiche per lo stoccaggio, il trattamento e lo smaltimento dei materiali che dovranno essere sottoposti a bonifica;
- Un cronoprogramma degli interventi e la valutazione massima dei costi;
- Il recupero delle aree inquinate e la conseguente pianificazione territoriale necessaria allo scopo di riportarle agli usi legittimi (di preferenza usi ad alto rendimento quali destinazione commerciale e/o turistica).

## **1.4 D.Lgs. n. 152 del 03/04/2006**

### **“Norme in materia ambientale”**

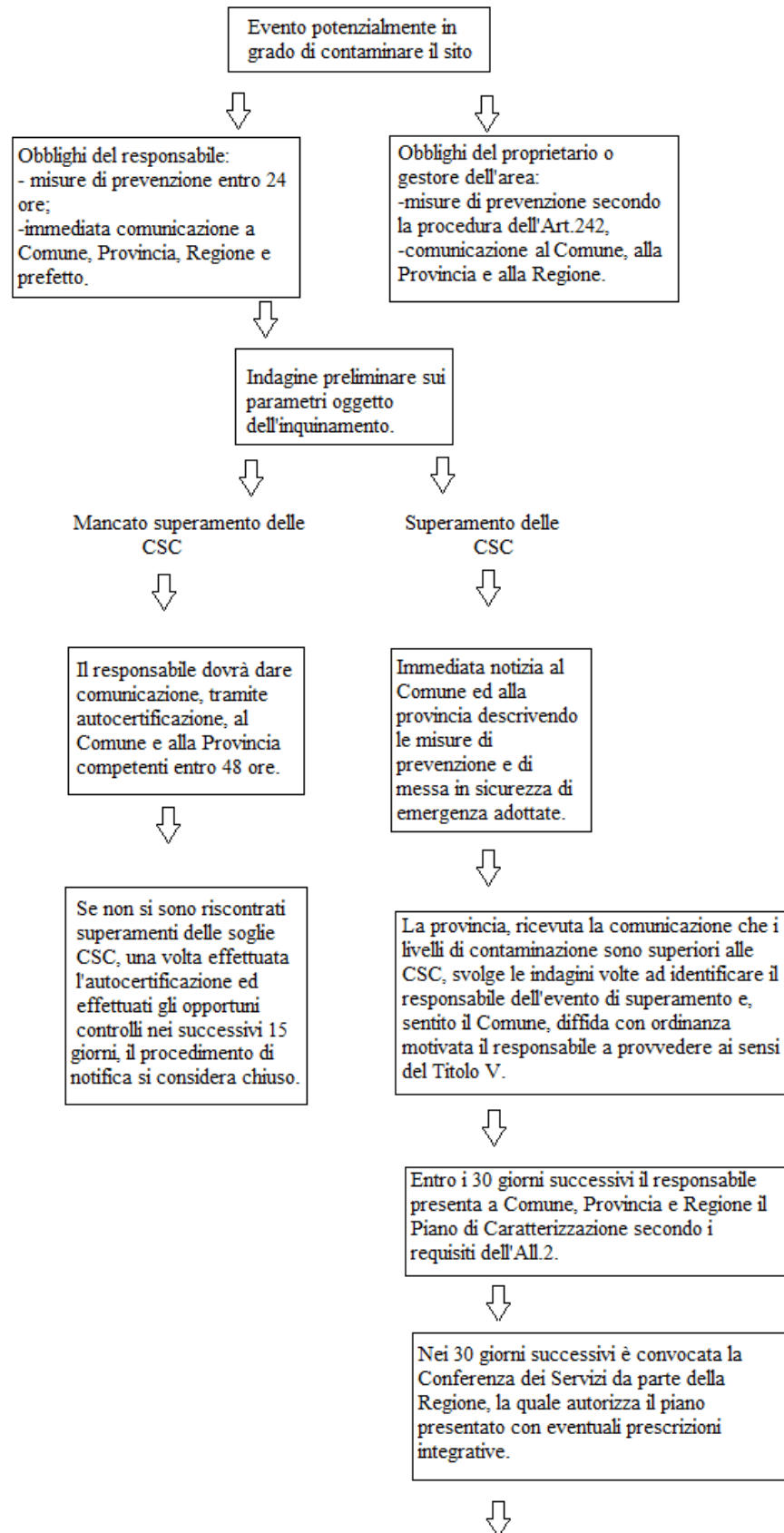
Particolare attenzione deve essere posta al Decreto Legislativo n. 152 dell'anno 2006, conosciuto come “Testo Unico Ambientale”.

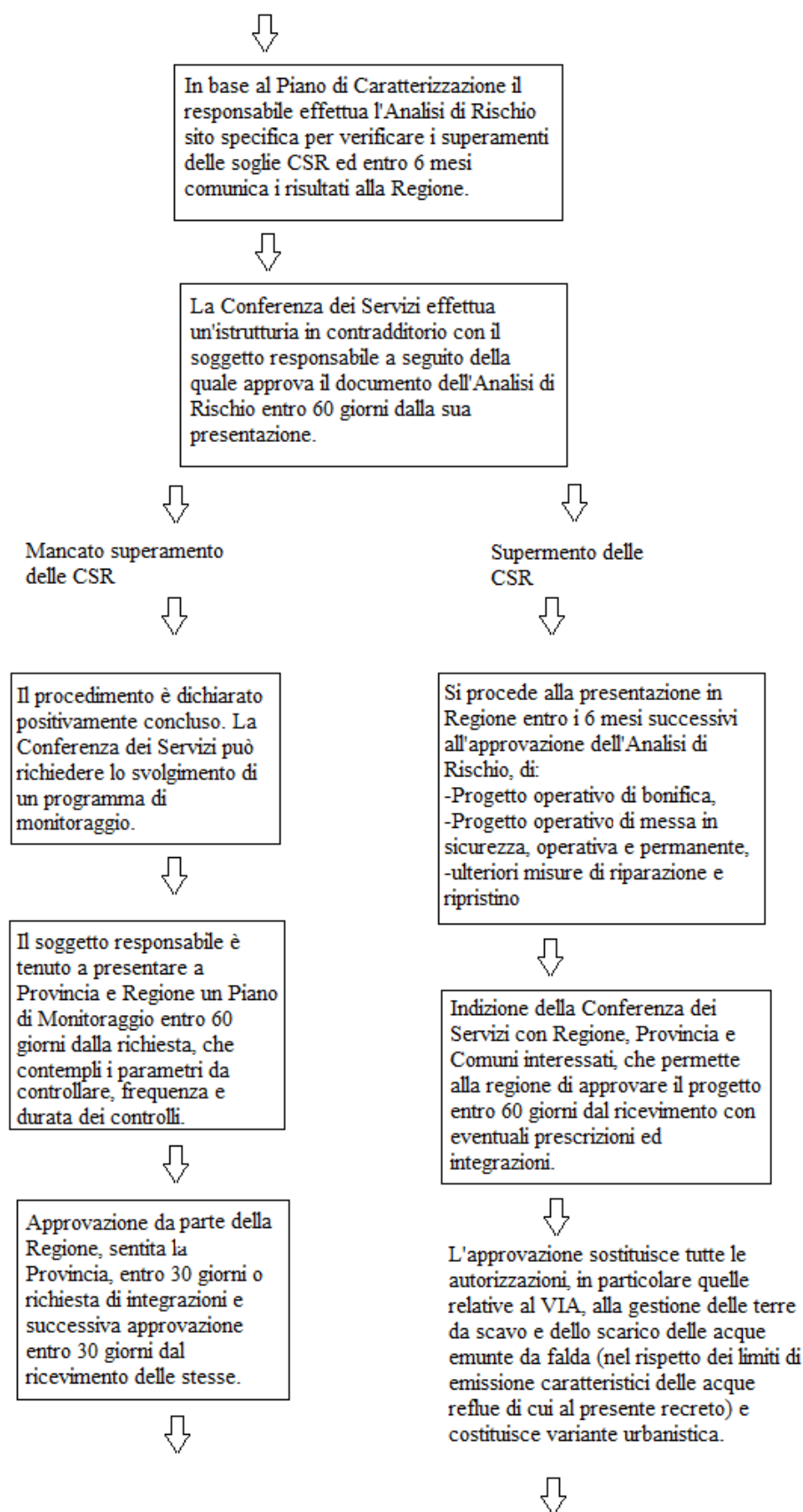
Tale Decreto, con le successive modifiche ed integrazioni risulta ad oggi il riferimento normativo a livello nazionale in tema di bonifica di siti contaminati. In questo decreto, infatti, la parte quarta interessa le norme in materia di gestione dei rifiuti e di bonifica dei siti inquinati. In particolare, il titolo I della parte quarta tratta nello specifico la materia dei rifiuti (es. classificazione, gestione, smaltimento, etc); il titolo V riguarda invece nello specifico i siti contaminati, ovvero definisce le procedure, i criteri e le modalità di intervento sui siti contaminati.

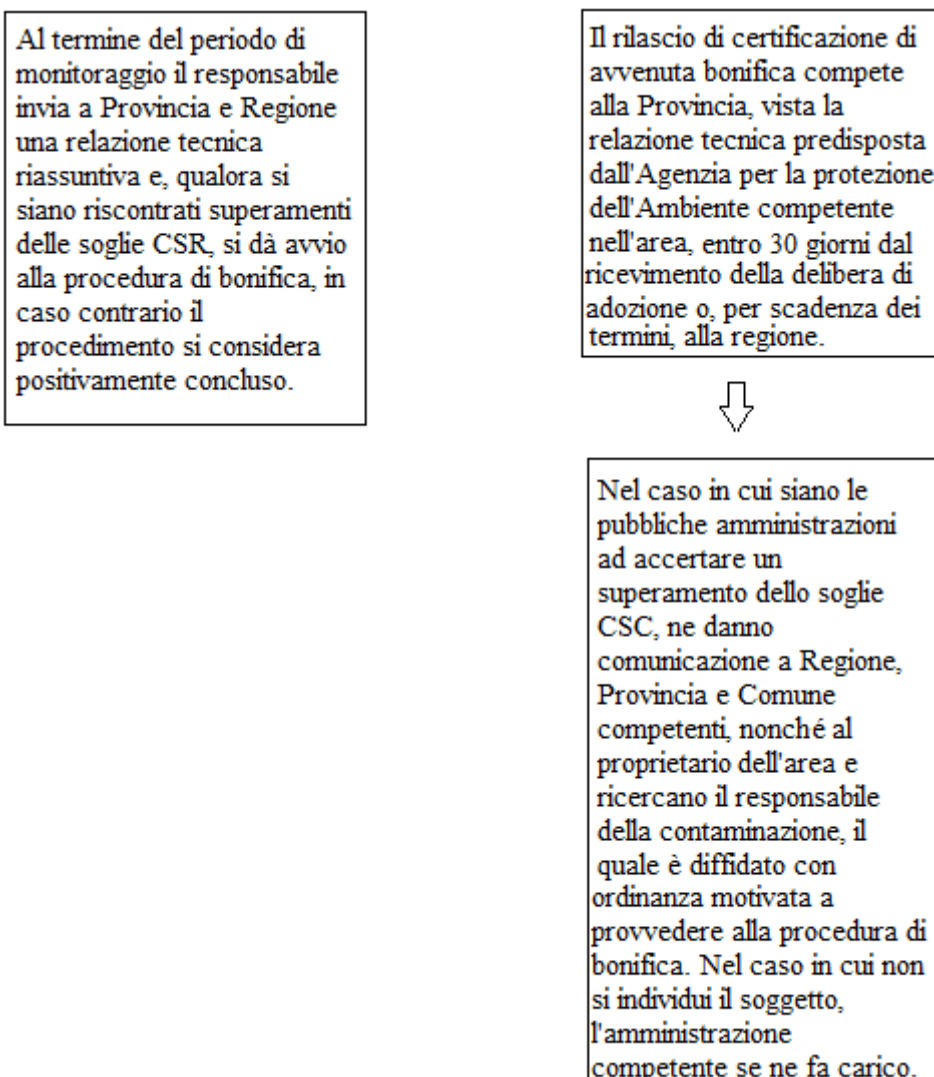
#### **1.4.1 Procedure operative e normative: Art. 242**

L'Art. 242 descrive tutte le procedure operative e amministrative con cui devono essere eseguiti il risanamento o la messa in sicurezza del sito, è quindi il perno su cui ruota la procedura di verifica di un sito sul quale si è verificato un determinato inquinamento.

Uno schema dell'iter amministrativo ai sensi dell'Art. 242 è mostrato nella Tab.1.1.







Tab.1.1: Iter amministrativo ai sensi dell'Art. 242.

L'Allegato 2 *“Criteri generali per la caratterizzazione dei siti contaminati”*, fornisce tutte le indicazioni necessarie per redigere il piano di caratterizzazione del sito, ossia tutte quelle attività mirate a comprendere quale sia la distribuzione tridimensionale dei contaminanti nelle varie matrici ambientali; in particolare, sono indicate le disposizioni per elaborare il Modello Concettuale Preliminare e il Piano di Investigazione Iniziale.

## **1.4.2 Aree contaminate di ridotte dimensioni e procedure semplificate: Art. 249**

Il D.Lgs. n. 152/06 prevede la possibilità di applicare un iter procedurale diverso da quanto definito dall'Art. 242 per le aree contaminate di ridotte dimensioni, ovvero aventi superficie inferiore ai 1000 mq. Per tali aree è infatti possibile fare riferimento a quanto riportato nell'Allegato 4 parte IV del D.Lgs. 152/06, nel quale vengono descritte “ *le procedure amministrative e tecnico/operative con le quali gestire situazioni di rischio concreto o potenziale di superamento delle soglie di contaminazione (CSC) per i siti di ridotte dimensioni, oppure per eventi accidentali che interessino aree circoscritte di superficie non superiore a 1000 mq*”.

Il sito oggetto della presente tesi ha una superficie inferiore ai 1000 mq, e pertanto sarebbe possibile applicare quanto disposto dall'Allegato 4, ed avere quindi la possibilità di procedere con l'iter amministrativo mediante più ipotesi di intervento, così come descritto nel seguito.

A differenza delle disposizioni riportate dall'Art. 242, qualora si abbia un evento di contaminazione, il responsabile deve dare immediata comunicazione al Comune, Provincia e Regione (non al Prefetto) della constatazione del superamento delle CSC.

Non appena pervenuta la comunicazione, agli enti sopra citati, si può procedere mediante tre ipotesi di intervento:

- **1° caso:**

Qualora gli interventi di messa in sicurezza d'emergenza (MISE) effettuati riportino i valori di contaminazione del sito al di sotto delle CSC, entro 30 giorni deve essere integrata la documentazione presentata con una relazione tecnica che, descrivendo gli interventi, comporti anche una autocertificazione di avvenuto ripristino della situazione anteriore dell'evento;



- **2° caso:**

Nel caso in cui oltre gli interventi di messa in sicurezza d'emergenza siano necessari interventi di bonifica, il soggetto responsabile può scegliere tra due alternative:

1. Bonifica riportando i valori di contaminazione del sito ai livelli di soglia di contaminazione CSC (senza passare per l'analisi di rischio);
2. Bonifica portando i valori di contaminazione del sito ai livelli di soglia di rischio (CSR) effettuando l'analisi di rischio.

In entrambi i casi, il responsabile dell'inquinamento deve presentare alle Autorità un progetto di bonifica che comprende:

1. La descrizione della situazione di contaminazione riscontrata a seguito delle attività di caratterizzazione eseguite;
2. Gli interventi di messa in sicurezza d'emergenza adottati o in fase di esecuzione;
3. La descrizione degli interventi di bonifica da eseguire sulla base:
  - Dei risultati del Piano di Caratterizzazione (PdC) per riportare la contaminazione ai valori CSC;
  - Dell'analisi di rischio (AdR) per portare la contaminazione ai valori CSR;

- **3° caso:**

Qualora si riscontri una contaminazione della falda, il soggetto responsabile dovrà provvedere alla presentazione alle Autorità competenti di un unico progetto di bonifica che comprenderà:

1. La descrizione della situazione di contaminazione riscontrata a seguito delle attività di caratterizzazione eseguite;
2. Gli interventi di messa in sicurezza d'emergenza adottati o in fase di esecuzione;
3. La descrizione degli interventi di bonifica da eseguire sulla base dell'analisi di rischio sito-specifica per portare la contaminazione ai valori CSR.

### **1.4.3 Siti di interesse nazionale: Art. 252 e Art. 252.bis**

Per la trattazione dei siti di interesse nazionale, è necessario fare riferimento a quanto riportato all'Art. 252 dove sono presenti i seguenti commi:

1. *I siti di 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.*
2. (...)
3. *Ai fini della perimetrazione del sito sono sentiti i comuni, le province, le regioni e gli altri enti locali, assicurando la partecipazione dei responsabili nonché*

*dei proprietari delle aree da bonificare, se diversi dai soggetti responsabili.*

- 4. 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, sentito il Ministero delle attività produttive. Il Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio può avvalersi anche dell'Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici (APAT), delle Agenzie regionali per la protezione dell'ambiente delle regioni interessate e dell'Istituto superiore di sanità nonché di altri soggetti qualificati pubblici o privati.*
- 5. Nel caso in cui il responsabile non provveda o non sia individuabile oppure non provveda il proprietario del sito contaminato ne' altro soggetto interessato, gli interventi sono predisposti dal Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio, avvalendosi dell'Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici (APAT), dell'Istituto superiore di sanità e dell'E.N.E.A. nonché' di altri soggetti qualificati pubblici o privati."*

Per il Sito di Interesse Nazionale quindi, le procedure sono sempre disciplinate dal Titolo V, parte quarta, del D.Lgs. 152/06 ma la responsabilità dei procedimenti fa capo al Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. Nell'Art. 252 nel 2008 è stato inserito, dal D.Lgs. n.4, l'Art. 252.bis il quale tratta dei siti di preminente interesse pubblico per la riconversione industriale. In sintesi il nuovo articolo riporta le seguenti novità: *“Con uno o più decreti del Ministro (...) sono individuati i siti di interesse pubblico ai fini dell'attuazione di programmi ed interventi di riconversione industriale e di sviluppo economico*

*produttivo, contaminati da eventi precedenti al 30 Aprile 2006 (...). In tali siti sono attuati progetti di riparazione dei terreni e delle acque contaminate assieme ad interventi mirati allo sviluppo economico produttivo (...). Gli interventi di riparazione sono approvati in deroga alle procedure di bonifica di cui alla parte IV del titolo del presente decreto...progetti sono elaborati ed approvati (...) con appositi accordi di programma stipulati tra i soggetti interessati... Gli obiettivi di bonifica dei suoli e delle acque sono stabiliti dalla Tabella I dell'allegato 5 del titolo V del presente decreto..."*

Sei anni dopo l'inserimento dell'Art. 252.bis, nella gazzetta ufficiale del 21/02/2014 n. 43, uscì la norma n. 9 che causò una modifica alla parte IV del D.Lgs. 152/06 con la riscrittura completa dell' Art. 252.bis per i siti di preminente interesse pubblico per la riconversione industriale.

## **1.5 Nuovo Accordo di Programma per Porto Marghera del 14/04/2012**

Trascorsi nove anni dall'attuazione del Master Plan per il ripristino ambientale del Sito di Interesse Nazionale si rese necessario rendere l'intero procedimento più fluido ed efficace, a causa del rallentamento della bonifica per effetto dei lunghi tempi burocratici, delle sempre più esigue risorse della Pubblica Amministrazione e dei cospicui oneri derivanti dalla gestione dei rifiuti provenienti dalla bonifica. Tali sforzi culminarono il giorno 16/04/2012, con la stesura del Nuovo Accordo di Programma per Porto Marghera da parte da tutti gli enti coinvolti (Comune di Venezia, Provincia di Venezia, Regione del Veneto e Arpav).

L'accordo si compone di 12 articoli aventi l'obiettivo di snellire le procedure amministrative di bonifica ed accelerare il programma di risanamento dell'area industriale.

Le novità principali del Nuovo Accordo di Programma si possono riassumere in questi punti:

- creazione di una serie di modalità di intervento di bonifica standardizzate in relazione alla tipologia di bersaglio, al tipo di inquinamento riscontrato e alla destinazione d'uso dell'area. Tali caratteristiche influiscono sull'analisi di rischio (A.d.R), e la sua standardizzazione semplificherà notevolmente le procedure istruttorie a tutti i livelli del procedimento;
- creazione di un nuovo Protocollo per la predisposizione e la realizzazione dei Piani di Caratterizzazione;
- con riferimento alle “Aree Agricole” e “Residenziali/Commerciali” il MATTM (Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare) di intesa con il Ministero delle infrastrutture e la Regione Veneto, potrà procedere alla eventuale ripermetrazione del SIN (ai sensi dell'Art. 252 comma 3) in base ai dati acquisiti dalle indagini Arpav;
- maggiore attenzione al cronoprogramma delle attività di bonifica che potrà essere prorogato solo una volta e su richiesta motivata. Pena l'applicazione delle sanzioni previste dell'Art. 257. Gli interventi dovranno iniziare entro sei mesi dall'approvazione del progetto;
- obbligo per le Aziende di contribuire ai costi di realizzazione del marginamento e ai costi di gestione e di trattamento delle acque di falda drenate. Tutti i soggetti dovranno impegnarsi alla bonifica delle acque di falda presenti nel sottosuolo di spettanza.

In data 21/03/2013 il Ministero dell'Ambiente ha provveduto all'approvazione dei “Protocolli Attuativi”, che costituiscono parte integrante dell'Accordo di Programma; essi consentono, qualora vi si faccia riferimento, la semplificazione del percorso procedurale ordinario a partire dalla caratterizzazione dei siti contaminati nel SIN.

Infatti, secondo le disposizioni contenute nei protocolli succitati, il Piano di Caratterizzazione non necessita più di una preventiva autorizzazione da parte della

Conferenza dei Servizi (a condizione che venga seguito il Protocollo stesso): ciò comporta una riduzione della tempistica.

I protocolli attuativi riguardano anche le possibili modalità di bonifica delle acque di falda contaminate: essi prevedono infatti che la bonifica delle acque debba avvenire tramite dei sistemi pubblici, come marginamenti e drenaggi, realizzati dal Magistrato delle Acque, consentendo quindi alle imprese di non dover elaborare singoli progetti di bonifica per le acque sotterranee.

## 1.6 Riperimetrazione del SIN con il D.M. del 24/04/2013

In data 24 Aprile 2013 il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare ha emanato un apposito Decreto per la riperimetrazione del SIN di Porto Marghera con conseguente esclusione delle aree agricole e commerciali di Porto Marghera, di molte aree urbane di Mestre e Campalto e delle aree lagunari e i canali portuali di Marghera.

La perimetrazione attuale è visibile in Fig.1.2:



Fig.1.2: Confronto tra la perimetrazione del SIN con il D.M. 23/02/2000 (in rosso) e la riperimetrazione proposta con il D.M. 24/04/2013 (in giallo).

In Fig.1.2, oltre al confronto tra le due perimetrazioni del SIN, viene messo in evidenza come, con il D.M. del 24/04/2013, l'area oggetto di studio della presente tesi (individuato con il punto rosso) venga esclusa dai nuovi confini del Sito di Interesse Nazionale.

## **1.7 Deliberazione della giunta regionale n. 1732 del 03/10/2013**

Per un gran numero di aree inizialmente ricomprese nel SIN di Porto Marghera e successivamente escluse a seguito della ripermetroazione erano attivi procedimenti di bonifica sviluppati considerando, tra l'altro, quanto indicato dagli Accordi di Programma predisposti per Porto Marghera. Al fine di non generare discontinuità in tal senso la Regione Veneto ha provveduto ad emanare una Delibera (D.G.R.V) n. 1732 del 3/10/2013, con la quale si consente l'applicazione dell'Accordo di Programma e dei relativi Protocolli Attuativi anche alle aree non più ricomprese all'interno del SIN (aree ex SIN).

A queste aree appartiene anche la zona trattata nel seguente elaborato.



## 2. Inquadramento del sito e descrizione degli eventi

Nel presente capitolo si riporta un primo inquadramento del sito di interesse, cui si accompagna una breve descrizione dell'evento da cui è scaturito il caso di studio oggetto del presente lavoro di tesi.

### 2.1 Inquadramento del sito oggetto di studio

Il sito oggetto di studio è situato a Porto Marghera (VE), in un'area adiacente ai binari ferroviari del Parco Nuovo, limitrofa a Via della Macchine, come illustrato in Fig.2.1.



Fig.2.1: Localizzazione dell'area oggetto d'indagine.

## 2.2 Descrizione degli eventi

Il sito interessato dagli interventi di Messa In Sicurezza d'Emergenza è collocato in un'area adiacente ai binari ferroviari di Porto Marghera dove venerdì 13 dicembre 2013, all'ora di pranzo, avvenne il deragliamento di una ferrocisterna contenente del gasolio, con conseguente fuoriuscita del combustibile sulla massicciata ferroviaria.

L'area interessata dall'evento ha una superficie di 50 mq.

Successivamente allo sversamento venne avvisato il corpo dei Vigili del Fuoco per la Messa in Sicurezza dell'intera area e della ferrocisterna, travasando il contenuto in apposite cisterne e collocando del materiale oleoassorbente lungo la massicciata ferroviaria (Fig.2.2 e Fig.2.3).



Fig.2.2: Deragliamento della ferrocisterna con conseguente soprallugo dei Vigili del Fuoco.



Fig.2.3: Posizionamento del materiale oleoassorbente lungo la massciata ferroviaria.

### **3. Interventi di Messa in Sicurezza d’Emergenza**

Il seguente capitolo è stato strutturato in modo da fornire inizialmente la definizione degli interventi di messa in sicurezza d’emergenza secondo quanto previsto dalla normativa vigente (D.Lgs. 152/06) e successivamente vengono descritte le misure poste in essere presso il sito, in base all’assetto geologico, idrogeologico ed antropico che lo caratterizzano.

Secondo l'Art. 240 del D.Lgs. 152/06 gli interventi di messa in sicurezza d'emergenza o M.I.S.E. sono tutti quegli interventi immediati o a breve termine, da mettere in opera nelle condizioni di emergenza in corrispondenza di eventi di contaminazione repentini di qualsiasi natura, atti a contenere la diffusione delle sorgenti primarie di contaminazione, impedirne il contatto con le altre matrici presenti nel sito e a rimuoverle, in attesa di eventuali ulteriori interventi di bonifica o di messa in sicurezza operativa o permanente.

Per quanto riguarda il caso in oggetto gli interventi di messa in sicurezza d'emergenza sono stati suddivisi in due fasi temporali, in modo tale da assicurare il funzionamento di uno dei due binari interessati dallo sversamento e diretti verso la Zona Industriale di Porto Marghera. Le attività nella prima fase sono state effettuate nel periodo 13/12/2013-31/12/2013 ed hanno riguardato la zona direttamente coinvolta dallo sversamento; diversamente le attività della seconda fase sono state realizzate nel periodo 17/02/2014-22/02/2014 ed hanno coinvolto l'area posta a nord-ovest dell'area di scavo della fase 1.

Le aree di scavo relative alle rispettive fasi si possono visualizzare nella figura Fig.3.1.

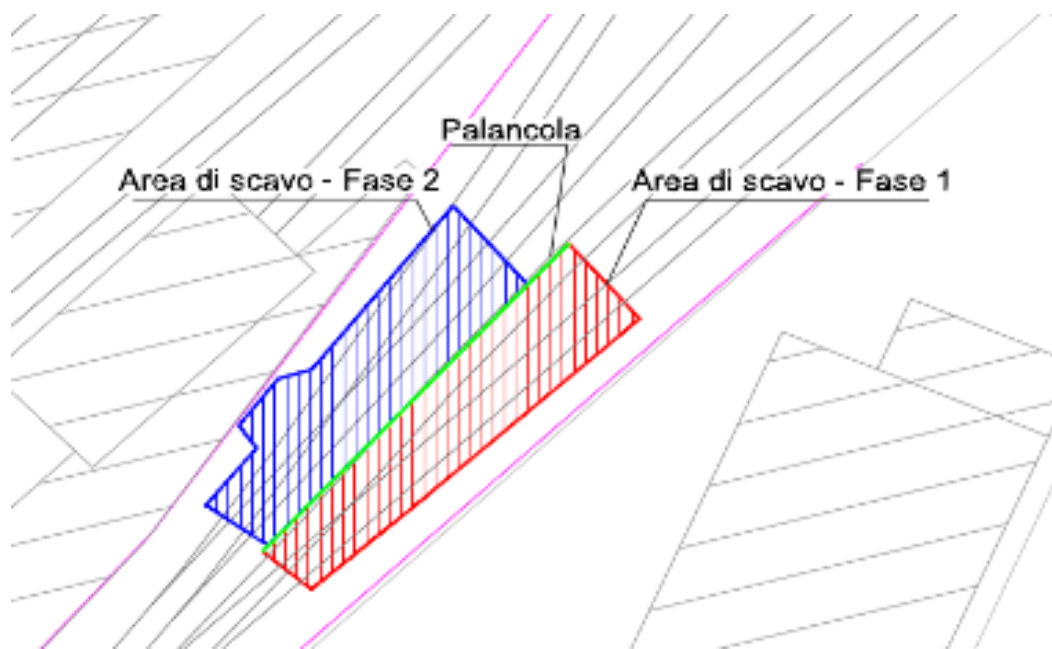


Fig.3.1: Suddivisione delle aree di scavo per le due fasi.

### **3.1 Fase 1: attività effettuate nel periodo 13/12/2013-31/12/2013**

#### **3.1.1 Attività preliminari all'esecuzione della fase 1**

Prima di procedere con gli Interventi di Messa in Sicurezza d'Emergenza è stata eseguita un'indagine ferromagnetica tramite un localizzatore magnetico.

Lo strumento è in grado di individuare l'anomalia elettromagnetica tra due oggetti ferromagnetici rispondendo al campo magnetico tra due sensori posti circa a 24 cm di distanza tra loro, generando una forza elettromotrice indotta che trasformata in corrente produce un segnale sonoro.

L'indagine ha avuto lo scopo di localizzare eventuali ordigni inesplosi o corpi estranei; solo dopo l'esito negativo dell'investigazione si è proceduto allo smontaggio dei binari ferroviari, alla perimetrazione dell'area e al picchettamento

della zona interessata dallo scavo.

L'area di scavo nella fase 1 ha raggiunto dimensioni di circa 25 x 5 m e una profondità di 4,00 m dal piano di sbancamento nella porzione più settentrionale dell'escavazione, mentre nel lato più a sud sono stati raggiunti i 4,40 m di profondità (Fig.3.2).

La quota del fondo scavo è stata dettata dalla distribuzione della contaminazione, in quanto raggiunta la sabbia, data l'elevata conducibilità idraulica di questa litologia, gli inquinanti tendono a muoversi preferibilmente in maniera orizzontale, nella direzione di flusso principale della falda sotterranea.



Fig.3.2: Condizione del sito prima dell'inizio dei lavori.

### 3.1.2 Infissione delle palancole metalliche

Secondo il D.M. 11/03/1998 “*Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali ed le prescrizioni per la progettazione, l’esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione*” le opere di sostegno devono essere adottate tenendo conto delle caratteristiche chimico-fisiche dei terreni coinvolti e da eventuali materiali di riporto, dalla falda idrica, dal profilo della superficie topografica e dai manufatti circostanti.

L’utilizzo delle palancole metalliche si è reso necessario per motivi di sicurezza dei lavoratori, per evitare eventuali crolli, considerate le sollecitazioni subite dai binari al passaggio dei convogli ferroviari, nonché la presenza di una falda acquifera superficiale.

Le palancole metalliche sono dei componenti costruttivi in acciaio laminato a caldo o a freddo con degli incastri (gargami) maschio-femmina che connessi (ingargamati) tra loro durante l’infissione del terreno formano una parete continua definita palancolato.

Per permettere il sostegno delle pareti dello scavo le palancole sono state infisse fino a una profondità di – 12 m dal piano campagna (secondo la normativa i 2/3 della palanca deve essere infissa nel terreno, mentre 1/3 è adibita al sostegno delle pareti dello scavo), in modo tale da realizzare uno scavo fino alla profondità di circa 4 m dal piano di sbancamento.

Poiché il punto D.8 del D.M. 11/03/1998 recita il seguente comma: “*La verifica [delle pareti dello scavo] deve essere eseguita per scavi in trincea di profondità superiore ai 2 m, nei quali sia prevista la permanenza di operai e per scavi che ricadono in prossimità di manufatti esistenti*”, e lo scavo effettuato nel sito ha raggiunto una profondità massima di 450 cm, insieme all’infissione delle palancole si sono installati degli elementi di contrasto per diminuire l’inflessione del palancolato (freccia) indotta dal passaggio dei convogli nel binario attivo accanto. La messa in posa degli elementi di contrasto delle paratie, cioè un’intelaiatura in profili tipo HEB 300, segue lo schema nella figura sottostante (Fig.3.3).

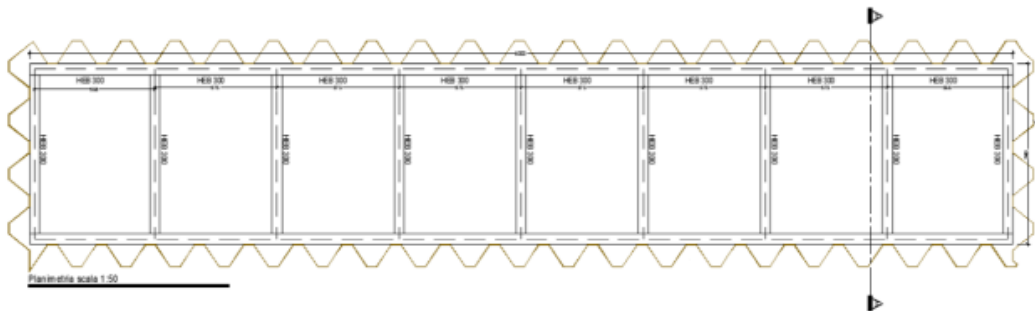


Fig.3.3: Schema della disposizione dei contrasti.

L'infissione delle palancole è avvenuta tramite il metodo "vibroinfissione". Questo metodo utilizza una testa vibrante, con pesi eccentrici azionati in rotazione da un motore elettrico o idraulico, appesa a un'autogru a fune o sul braccio di un escavatore idraulico. Una pinza idraulica ammorsa la palancola e attraverso le vibrazioni, trasmesse dalla testa vibrante, la immette nel terreno. Si è optato per tale modalità di infissione in quanto lo scavo ha coinvolto litologie dotate di una discreta coesione, di conseguenza le vibrazioni create dalla testa vibrante hanno lo scopo di vincere la coesione tra le particelle, sgretolare il terreno e far scendere la paratia nel terreno per peso proprio dell'attrezzo. Al fine di garantire la stabilità del muro perimetrale si è temporaneamente provveduto al puntellamento dei pilastri di sostegno (Fig.3.4). In un secondo tempo si è poi provveduto alla demolizione e ricostruzione del muro stesso.





Fig.3.4: Puntellamento del muro.

### **3.1.3 Allestimento di un sistema well-point**

Una ulteriore problematica nella realizzazione di uno scavo consiste nella presenza della falda acquifera con bassa soggiacenza, la quale ostacola la realizzazione dell'escavazione e l'esecuzione dei campionamenti.

Uno dei sistemi di captazione preventiva dell'acqua di falda al giorno d'oggi più utilizzato e conosciuto negli scavi è l'impianto well-point.

Per la progettazione di questo sistema di drenaggio occorre tenere presenti le caratteristiche fisiche dei terreni, in particolare la composizione granulometrica e la conducibilità idraulica; infine è molto importante conoscere quale sia il rapporto tra le acque sotterranee e superficiali nel sito e le modalità di scavo.

L'analisi granulometrica dei terreni interessati dallo scavo può essere correlata sia alla conducibilità idraulica (K), sia a scelte operative di cantiere: definizione del filtro e metodologie di posa del sistema drenante. I terreni nel sito, come si approfondirà nel Par.4.4.2, hanno valori di permeabilità idraulica molto variabili, sia a causa della natura antropica del riporto, sia dell'eterogeneità della stratigrafia del sottosuolo.

Nonostante i valori di conducibilità idraulica siano molto differenti da punto a punto, l'utilizzo dell'impianto well-point ha permesso l'abbassamento del livello idrico consentendo l'inizio degli scavi, che hanno raggiunto una profondità di -4,00/4,40 m dal p.c.

Il sistema di estrazione dei liquidi è stato posizionato all'interno delle palancole in modo da mantenere lo scavo asciutto.

Il drenaggio viene creato da una batteria di micropozzi o well-point messi in depressione da pompe centrifughe autoadescanti generando così una depressione nelle condotte alle quali vengono collegate.

Tale impianto è formato schematicamente da una serie di micropozzi o aghi di diametro 1 pollice e mezzo, alla cui parte finale è avvitato un filtro. I filtri possono essere di due tipologie principali: per sabbia, con un passaggio di 0,2 mm; per ghiaia, caratterizzati da 36 fori di diametro 8 mm.

I micropozzi sono collegati, attraverso un manicotto flessibile, al collettore principale di aspirazione che è la tubazione che collega i well-points alla pompa

(Fig.3.5). Quest'ultima ha lo scopo di generare la depressione all'interno delle condotte di aspirazione, generando così un'accelerazione e una deviazione del flusso della falda verso i punti di pompaggio, portando la superficie dell'acqua ad assumere un conoide rovescio (cono di depressione).

La pompa è collegata, attraverso una tubazione di scarico, alle cisterne utilizzate per lo stoccaggio delle acque emunte che andranno successivamente inviate ad un idoneo impianto di smaltimento.



Fig.3.5: In questa figura si possono vedere i well-points collegati al tubo collettore mediante il manicotto flessibile.

### **3.1.4 Caratterizzazione dei rifiuti**

Al fine di caratterizzare i materiali oggetto di scavo, preliminarmente all'inizio delle operazioni di movimentazione, sono stati eseguiti 10 saggi esplorativi, spinti ad una profondità di -3 m da p.c.

I saggi esplorativi sono stati realizzati mediante un escavatore ad azione discontinua, in particolare attraverso un escavatore a cucchiaio rovescio. L'utilizzo di questa macchina è stato imposto dal tipo di terreno coinvolto e dalla posizione della macchina rispetto al ciglio dello scavo. Il tipo di escavatore utilizzato si presta meglio, infatti, al taglio delle trincee e alla regolarizzazione delle scarpate e deve essere collocato al di sopra del ciglio dello scavo; gli escavatori equipaggiati con il cucchiaio frontale o con la benna trascinata sono utilizzabili qualora si abbia materiale sciolto, come sabbia, materiale di cava e/o materiale di frantumazione.

Al fine di caratterizzare adeguatamente il materiale scavato, da ogni saggio esplorativo effettuato sono state prelevate 2 aliquote di terreno: una superficiale (a 1 m di profondità dal p.c.) e una più profonda (a 2,5-3 m di profondità dal p.c.), in coerenza a quanto indicato nella D.G.R.V. 2922/03.

Successivamente, per avere un campione rappresentativo di tutta l'area oggetto di intervento, si è proseguito con le operazioni di quartatura del terreno ottenendo un campione medio composito. È stato inoltre prelevato un campione dell'acqua aspirata, da sottoporre ad opportune analisi chimiche.

Il terreno tal quale è stato sottoposto ad analisi chimica per la classificazione come rifiuto, al fine di definirne l'eventuale pericolosità; inoltre è stato eseguito il test di cessione ai sensi del D.M. 27/09/2010 per stabilire in quale tipologia di discarica può essere conferito il terreno/rifiuto (discarica per rifiuti inerti, discarica per rifiuti non pericolosi, discarica per rifiuti pericolosi). Le acque derivanti dalle operazioni di aspirazione sono state sottoposte ad analisi chimiche di classificazione ai sensi del D.Lgs. 152/06 Parte IV e s.m.i.

Il risultato delle analisi chimiche è espresso nella Tab.3.1:

Nome campione	Codice CER	Analisi ai fini della classificazione
Terreno da scavo	<p><b>17 05 04</b></p> <p>“Terre e rocce diverse da quelle di cui alla voce 17 05 03”</p>	<p><b>CLASSIFICAZIONE RIFIUTO:</b></p> <p>Ai sensi dell'art.2 della decisione 2000/532/CE, sulla base di quanto riportato nell'allegato III della direttiva 91/689/CE, in riferimento ai codici di pericolosità da H3 a H8, H10 e H11, ai sensi del D.Lgs. 152/06 del 03/04/2006 e successive modifiche, il campione di rifiuto denominato terra e rocce, diverse da quelle di cui alla voce 17 05 03 (individuato dal produttore con codice C.E.R. 17 05 04) viene caratterizzato come</p> <p><b>RIFIUTO NON PERICOLOSO</b></p> <p><b>CLASSIFICAZIONE IN BASE AL D.M. 27-09-2010 E AL D.LGS 36/2003</b></p> <p>La percentuale di sostanza secca risulta essere conforme alle disposizioni previste all'art. 6 (impianti di discarica per rifiuti non pericolosi) comma 3 del D.M. 27-09-2010. Gli Inquinanti persistenti analizzati, riportati nel regolamento CE n. 850/2004, risultano conformi a quanto previsto dall'art. 6 comma 6 lettera c) del D.M. 27-09-2010.</p> <p><b>PROVA DI ELUIZIONE PER LISCIVAZIONE SECONDO NORMA UNI EN 12457-2/2004 come previsto dalla norma UNI 10802/2004.</b></p> <p>Le concentrazioni delle sostanze analizzate risultano essere inferiori alle rispettive concentrazioni limite Indicate dalla tabella 6 (limiti di eluato per l'accettabilità in discariche per rifiuti pericolosi...) e dalla tabella 5 (limiti di eluato per l'accettabilità in discariche per rifiuti non pericolosi) come previsto dal D.M. 27-09-2010. In base a quanto sopra il rifiuto risulta essere conforme a quanto disposto dall'art. 6 (Impianti di discarica per rifiuti non pericolosi) <u>comma 3 del D.M. 27-09-2010 e può essere conferito in idoneo impianto di smaltimento adeguatamente autorizzato.</u></p>
Acque di scavo	<p><b>16 10 02</b></p> <p>“soluzioni acquose di scarto, diverse da quelle di cui alla voce 16 10 01”</p>	<p><b>CLASSIFICAZIONE RIFIUTO</b></p> <p>Visti i risultati analitici riportati nel certificato a cui questa dichiarazione è allegata, conseguiti sui parametri richiesti dal committente, vista la provenienza del campione analizzato ed il CER sotto riportato definito dal committente e/o produttore, limitatamente alla campionatura ricevuta, tenuto conto delle caratteristiche così come definite dal D.Lgs n.205 del 03/12/2010 e, laddove applicabile, del parere dell'Istituto Superiore di Sanità n. 36565 del 5/7/2006 (II integrazione), si può affermare che il rifiuto corrispondente al campione analizzato è classificabile come:</p> <p>CER 16 10 02</p> <p>soluzioni acquose di scarto, diverse da quelle di cui alla voce 16 10 01 ed è quindi <b>NON PERICOLOSO.</b></p>

Tab.3.1: Riepilogo analisi chimiche eseguite sui rifiuti.

### **3.1.5 Caratterizzazione del terreno fondo scavo**

Il campionamento durante la Messa in Sicurezza d'Emergenza ha lo scopo di accertare se lungo le pareti o il fondo dello scavo si abbia il superamento delle Concentrazioni Soglia di Contaminazione (CSC). Qualora l'esito del campionamento risulti positivo, ovvero si riscontrino superamenti delle CSC per uno o più parametri in funzione della destinazione d'uso del sito, è necessario presentare il Piano di caratterizzazione come espresso nel D.Lgs. 152/06 (Par. 1.4.1).

In relazione alle modalità di campionamento si è fatto riferimento a quanto indicato nel Protocollo Operativo per la Caratterizzazione dei siti ai sensi del D.Lgs. 152/06 e dell'Accordo di Programma per la chimica di Porto Marghera – Revisione ai sensi dell'Accordo di Programma del 16 Aprile 2012 (art. 5, comma 3).

Nella prima fase di lavoro si è proceduto, oltre alla raccolta del campione di terreno prelevato all'inizio dello scavo, al campionamento del terreno a fondo scavo in contraddittorio con i tecnici dell' Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (A.R.P.A.V.). In questa fase, a causa della presenza del palancolato, non si è potuto procedere con il campionamento delle pareti dello scavo, pertanto si è proceduto all'esecuzione di alcuni sondaggi (Par.3.1.8).

Per quanto riguarda il campionamento del terreno del fondo scavo si è scelto di dividere l'area in due ulteriori sub-aree (Area A e Area B) e ciascuna di queste in settori, come illustrato in Fig.3.6.

Per ogni sub-area è stato prelevato un campione medio composito (FSA, FSB) e per ogni settore, di superficie minore di 25 m<sup>2</sup>, è stato raccolto un campione puntuale destinato alla verifica della presenza di composti volatili; complessivamente sono stati quindi prelevati 6 campioni per l'analisi dei VOC: FSA1, FSA2, FSB1, FSB2, FSB3 e FSB4.

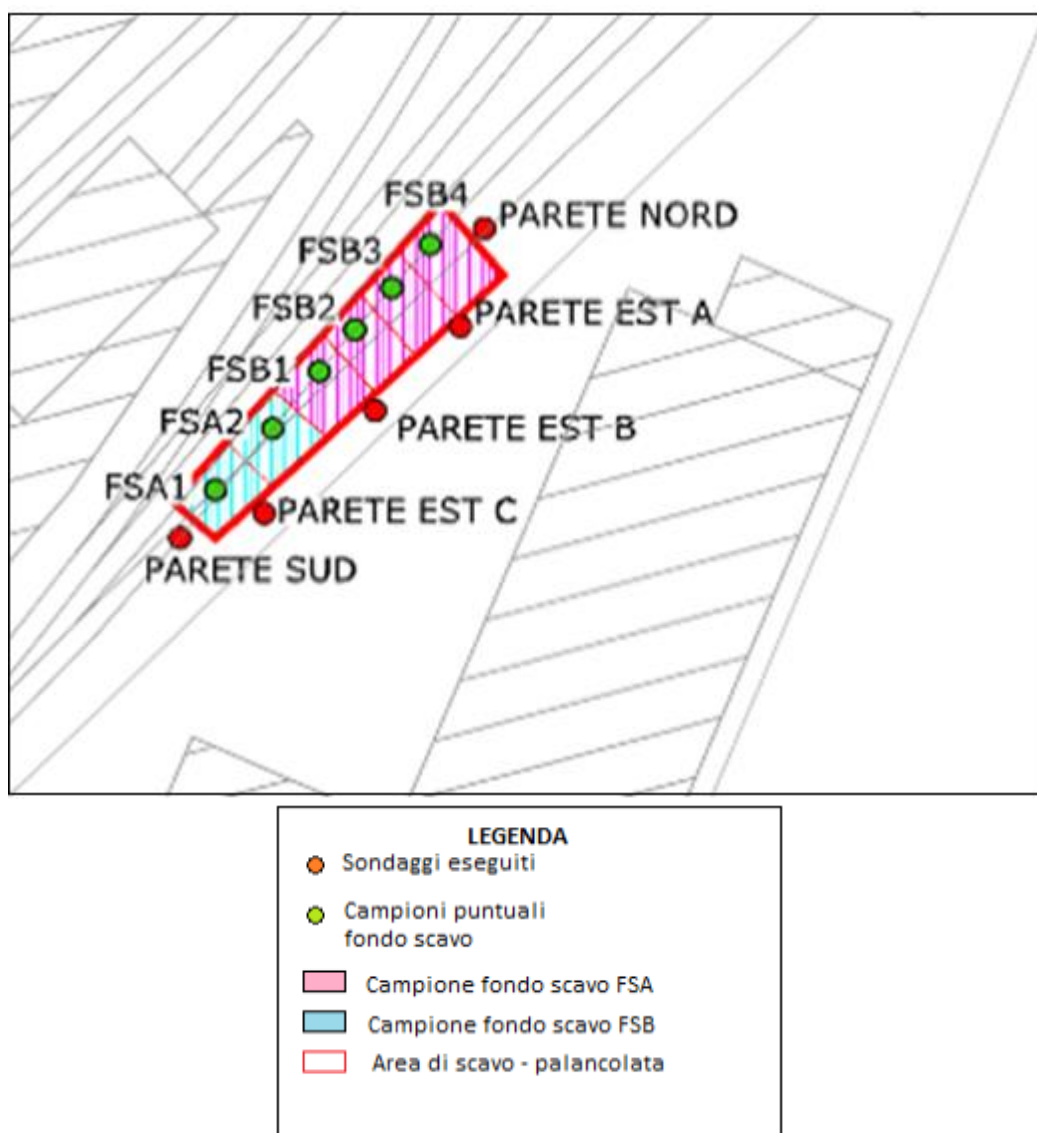


Fig.3.6: Suddivisione dell'area di scavo e posizione del prelievo dei diversi campioni.

La formazione del campione è avvenuta eliminando tutto il materiale (vetro, foglie, rami, etc.) che potrebbe alterare in qualche modo le analisi chimiche e solo successivamente si è separata, attraverso una setacciatura, la frazione granulometrica maggiore di 2 cm. Dopo il prelievo delle aliquote dal terreno setacciato si è proceduto all'omogeneizzazione ed alla suddivisione, attraverso il metodo della quartatura, per rendere il campione più omogeneo e per avere una distribuzione più uniforme dei contaminanti. I campioni sono stati posti in

contenitori di vetro sigillati ermeticamente in maniera tale da evitare e minimizzare qualsiasi tipo di fenomeno degradativo di origine chimica o biologica. Nel caso dei campioni destinati alla verifica dei composti volatili, si sono seguite le indicazioni fornite dal D.G.R.V. 2922/03 dove viene raccomandato, nel caso si usassero tecniche di Purg&Trap o spazio testa, l'utilizzo di minicarotatori monouso, da impiegare ortogonalmente alla carota con successivo scarico della minicarota così subcampionata in vials pre-pesate e certificate, con tappo e setto teflonato, contenenti idonei estraenti/preservanti (spesso vengono utilizzati 10 ml di metanolo EPA 5035A).

Per determinare in campo la concentrazione degli inquinanti volatili nei vari orizzonti si è utilizzato il PID, cioè un fotoionizzatore portatile capace di rilevare la presenza di concentrazioni di composti organici volatili (VOC). Le misure sono state eseguite sui campioni prelevati dal fondo scavo, posti immediatamente all'interno dei barattoli di vetro e coperti da una pellicola in alluminio in modo tale da evitare qualsiasi dispersione dell'inquinante volatile. L'analisi è stata condotta dopo aver agitato per circa 30 secondi i barattoli e inserendo la sonda attraverso la pellicola di alluminio.



### 3.1.6 Analisi chimiche eseguite sui campioni di terreno prelevati nella Fase 1

I campioni di fondo scavo, prelevati durante la Fase 1, sono stati sottoposti ad alcune analisi per la ricerca di tre tipi di inquinanti: BTEX (Benzene, Toluene, Etilbenzene e Xilene), idrocarburi pesanti ( $C>12$ ) e idrocarburi leggeri ( $C\leq 12$ ).

Le varie analisi eseguite sui campioni sono riportate nella seguente tabella (Tab.3.2):

Nome punto	Nome campione	Intervallo di prelievo (m da p.c)	Tipologia di analisi	
			BTEX	Idrocarburi ( $C>12$ )
Fondo scavo	FSA	-4,00		X
	FSA1	-4,00	X	
	FSA2	-4,00	X	
	FSB	-4,00		X
	FSB1	-4,00	X	
	FSB2	-4,00	X	
	FSB3	-4,00	X	
	FSB4	-4,00	X	

Tab.3.2: Visualizzazione delle analisi chimiche effettuate sui diversi campioni.

Il sito oggetto di studio, dal punto di vista degli obiettivi di bonifica, è riconducibile ad un sito “ad uso commerciale e industriale”, pertanto i risultati delle analisi chimiche eseguite sui campioni di terreno prelevati sono stati confrontati con i valori delle CSC riportate nell’Allegato 5, Tab.1, Col. B (Tab.3.3).

<b>Nome campione</b>	<b>Parametro</b>	<b>CSC Tab. 1 Col. B D.Lgs. 152/06</b>	<b>Valore rilevato (mg/kg s.s.)</b>
FSA	Idrocarburi C>12	750	61
FSA1	Idrocarburi C≤12	250	< 1
	Benzene	2	< 0,01
	Etilbenzene	50	0,05
	Stirene	50	< 0,01
	Toluene	50	< 0,01
	Xilene	50	0,03
FSA2	Idrocarburi C≤12	250	< 1
	Benzene	2	< 0,01
	Etilbenzene	50	< 0,01
	Stirene	50	< 0,01
	Toluene	50	< 0,01
	Xilene	50	< 0,01
FSB	Idrocarburi C>12	750	89
FSB1	Idrocarburi C≤12	250	< 1
	Benzene	2	< 0,01
	Etilbenzene	50	0,01
	Stirene	50	< 0,01
	Toluene	50	< 0,01
	Xilene	50	< 0,01
FSB2	Idrocarburi C≤12	250	< 1
	Benzene	2	< 0,01
	Etilbenzene	50	0,01
	Stirene	50	< 0,01
	Toluene	50	< 0,01
	Xilene	50	< 0,01

Nome campione	Parametro	CSC Tab. 1 Col. B D.Lgs. 152/06	Valore rilevato (mg/kg s.s.)
FSB3	Idrocarburi C <sub>≤</sub> 12	250	< 1
	Benzene	2	< 0,01
	Etilbenzene	50	0,01
	Stirene	50	< 0,01
	Toluene	50	< 0,01
	Xilene	50	< 0,01
FSB4	Idrocarburi C <sub>≤</sub> 12	250	5,3
	Benzene	2	< 0,01
	Etilbenzene	50	0,14
	Stirene	50	< 0,01
	Toluene	50	< 0,01
	Xilene	50	0,95

Tab.3.3: Visualizzazione dei superamenti rilevati nei campioni.

Confrontando le concentrazioni dei parametri trovate nei singoli campioni attraverso le analisi, con le Concentrazioni Soglia di Contaminazione (CSC), si può notare che i campioni rappresentanti il fondo scavo risultano conformi ai limiti di legge per la destinazione d'uso prevista.

Il fatto che il trasferimento dell'inquinante sia avvenuto in direzione prevalentemente orizzontale si può spiegare mediante alcune ipotesi:

- La permeabilità orizzontale nel terreno è maggiore della permeabilità verticale;
- Il contaminante è penetrato nel sottosuolo fino alla falda acquifera, e poi è stato trasportato solidamente con il solvente nella direzione principale di flusso.

### 3.1.7 Operazioni conclusive della Fase 1

Successivamente all'esito negativo della verifica del superamento delle CSC nel fondo scavo, i terreni rimossi sono stati conferiti ad idoneo impianto di smaltimento, mentre l'area coinvolta dallo scavo è stata ripristinata alle condizioni originarie del sito.

Il ripristino dell'intera area (Fig.3.7 e Fig.3.8) è avvenuta mediante la posa di:

- inerte riciclato costipato mediante rullatura per strati omogenei non superiori a 30 cm dalla quota di fondo scavo, fino alla profondità di -1,50 m dal p.c;
- materiale stabilizzato costituito da materiale calcareo di cava di pezzatura 0-30 mm, costipato mediante rullatura per strati omogenei non superiori a 30 cm da -1,50 m a -0,50 m dal p.c;
- geotessuto;
- ballast fino al piano campagna.



Fig.3.7: Operazioni di ripristino dell'area



Fig.3.8: Operazioni di compattazione del terreno.

Alla fine del ripristino si è dismesso l'impianto well-point e si sono estratte le palancole della parete Nord, Est e Sud mentre si è mantenuto in opera la palancolatura della parete Ovest in previsione dello scavo nella seconda fase. La prima fase si è conclusa con la riattivazione del binario rimosso.

### **3.1.8 Realizzazione di sondaggi a carotaggio continuo in prossimità delle pareti**

In data 22/01/2014, per fronteggiare il problema dato dal fatto che durante l'esecuzione della fase 1 non è stato possibile procedere al campionamento delle pareti dello scavo a causa della presenza del palancolato, si sono effettuati 5 sondaggi a carotaggio continuo in prossimità delle Pareti Nord, Est e Sud.

Per la realizzazione dei sondaggi è stata utilizzata una sonda di tipo Fraste Multidrill XL (Fig.3.9) dotata di una testa di rotazione e una testa a rotopercussione; la prima è idonea per l'avanzamento in terreni piuttosto impegnativi, come argille e limi, mentre la dotazione del martello a percussione consente l'avanzamento del carotiere a rotopercussione senza l'utilizzo di fluidi o pistoni idraulici per la riduzione degli effetti del riscaldamento causato dalla rotazione del carotiere. La perforazione è avvenuta a secco poiché l'uso di fluidi potrebbe diffondere la contaminazione (cross-contamination) o alterare il materiale da campionare.



Fig.3.9:Realizzazione dei sondaggi tramite la sonda Fraste Multidrill XL.

L'esecuzione di alcuni sondaggi geologici (Fig.3.10) ha avuto lo scopo di ricostruire il profilo stratigrafico per la definizione del modello concettuale del sito e consentire il prelievo dei campioni per sottoporli a specifiche analisi chimiche, oltre che per rilevare evidenze visive od olfattive derivate dalla presenza dell'inquinante nei campioni.

Durante la perforazione sono state utilizzate tutte le precauzioni necessarie e sono state effettuate tutte le operazioni al fine di evitare qualsiasi tipo di contaminazione e diffusione del contaminante.

Particolare attenzione è stata posta nella decontaminazione delle attrezzature, durante il prelievo dei campioni e nella conservazione delle carote in apposite cassette catalogatrici; le modalità di campionamento e successiva formazione dei campioni sono state eseguite come esplicitato nel D.Lgs. 152/06 "Norme in

materia ambientale”, nel “Protocollo Operativo per la Caratterizzazione dei siti” ai sensi del D.Lgs. 152/06 e s.m.i. e nell'Accordo di programma per la Chimica di Porto Marghera – Revisione ai sensi dell'Accordo di Programma del 16 Aprile 2012 e come descritto nel Par.3.1.5.

Lungo la Parete Est si sono eseguiti 3 sondaggi (Parete Est A-C), ciascuno rappresentativo di un'area minore di 100 m<sup>2</sup>, con la formazione di 3 campioni medi compositi per ciascun punto di indagine e rappresentativi delle profondità 0,00-1,50 metri (campione C1), 2,00-3,00 metri (campione C2) e 3,00-4,00 metri dal p.c (campione C3).

In corrispondenza della Parete Nord sono stati prelevati due campioni: C1, relativo all'intervallo 0,00-1,50 metri e C2, che corrisponde alla profondità 1,50-4,00 metri; per quanto riguarda la Parete Sud i due campioni prelevati sono relativi alle profondità 0,00-1,50 metri (per il campione C1) e 1,50-3,70 metri (per il campione C2). Le profondità di campionamento sono state scelte al fine di rappresentare le principali litologie presenti in sito: riporto, limi sabbiosi/argillosi e sabbie.

Lungo la parete Ovest non è stato effettuato alcun sondaggio, poiché al momento dell'estrazione delle palancole, in data 10-12/02/2014, è stato mantenuto in opera esclusivamente il palancolato lungo il lato ovest in previsione dell'esecuzione dello scavo della Fase 2.



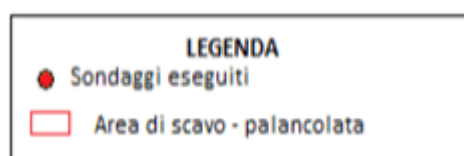
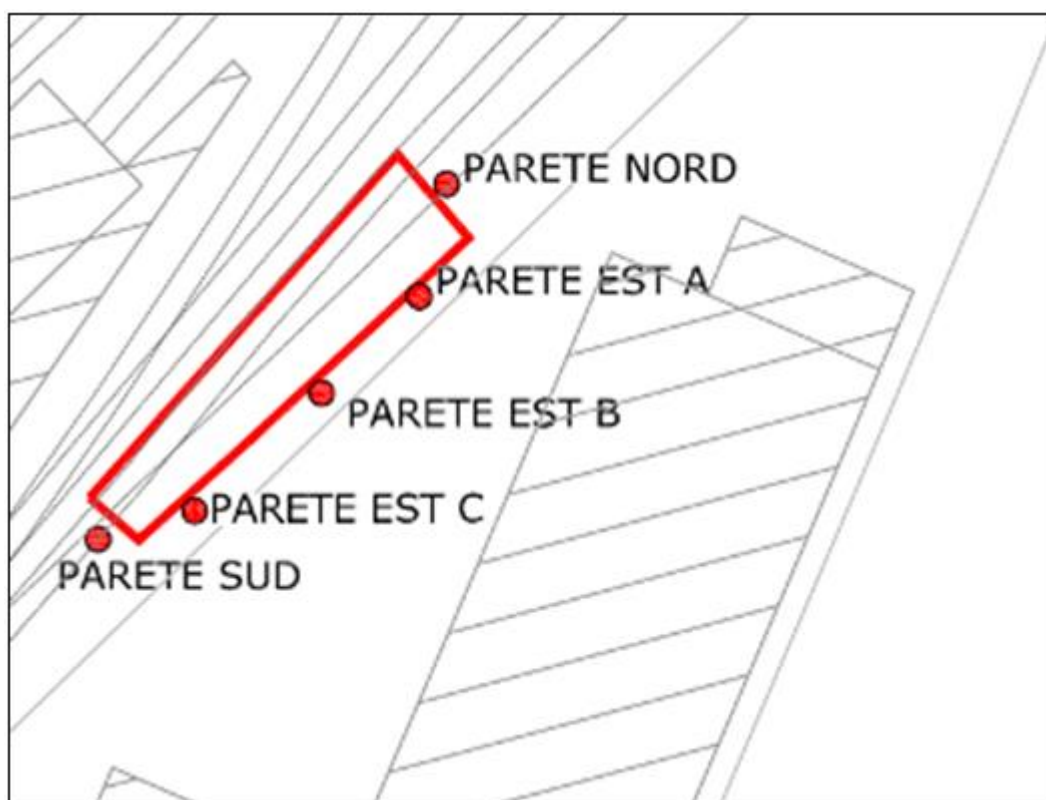


Fig.3.10: Posizione dei sondaggi lungo le pareti dello scavo della Fase 1.

La tabella riassuntiva sottostante (Tab.3.4) contiene un resoconto dei campioni di parete sopra descritti, per ognuno dei quali vengono indicati l'intervallo di profondità del campione medio e la profondità di prelievo del campione puntuale destinato alla determinazione dei composti volatili.

<b>Data campionamento</b>	<b>Nome sondaggio</b>	<b>Nome campione</b>	<b>Profondità di prelievo campione medio (m. da p.c.)</b>	<b>Profondità di prelievo campione puntuale (m. da p.c.)</b>
22/01/2014	Parete nord	C1	0,00 – 1,50	0,75
		C2	1,50 – 4,00	2,75
	Parete est A	C1	0,00 – 1,50	0,80
		C2	2,00 – 3,00	2,50
		C3	3,00 – 4,00	3,50
22/01/2014	Parete est B	C1	0,00 – 1,50	/
		C2	2,00 – 3,00	/
		C3	3,00 – 4,00	/
	Parete est C	C1	0,00 – 1,50	0,80
		C2	2,00 – 3,00	2,50
		C3	3,00 – 4,00	3,50
	Parete sud	C1	0,00 – 1,50	0,75
		C2	1,50 – 3,70	2,60

Tab.3.4: Riepilogo campioni di terreno prelevati dai sondaggi.

### 3.1.9 Risultati delle analisi chimiche sui terreni prelevati lungo le pareti

I campioni prelevati dalle pareti sono stati sottoposti ad alcune analisi per la ricerca di BTEX, idrocarburi <12 e idrocarburi >12.

Le varie analisi eseguite sui campioni sono riportate nella seguente tabella (Tab.3.5):

Nome punto	Nome campione	Intervallo di prelievo (m da p.c)	Tipologia di analisi	
			BTEX	Idrocarburi C>12
Parete nord	C1	0,00-1,50	X	X
	C2	1,50-4,00	X	X
Parete est	C1	0,00-1,50		X
	C2	2,00-3,00		X
	C3	3,00-4,00		X
Parete est A	C1	0,80	X	
	C2	2,50	X	
	C3	3,50	X	
Parete est C	C1	0,80	X	
	C2	2,50	X	
	C3	3,50	X	
Parete sud	C1	0,00-1,50	X	X
	C2	1,50-3,70	X	X

Tab.3.5: Prospetto relativo alle analisi chimiche effettuate sui diversi campioni di parete prelevati

I risultati delle analisi chimiche eseguite sui campioni di terreno prelevati hanno evidenziato superamenti delle CSC fissate per i “siti ad uso commerciale e industriale” dal D.Lgs. 152/06, All. 5, Tab.1, Col. B, per i seguenti parametri (Tab.3.6):

<b>Area indagata</b>	<b>Nome campione</b>	<b>Nome Parametro</b>	<b>CSC Tab.1 Col.B</b>	<b>Valore rilevato (mg/kg s.s.)</b>
Parete nord	C1	Idrocarburi leggeri C<12	250	424
	C2	Idrocarburi leggeri C<12	250	1100
Parete est	C1	Idrocarburi pesanti C>12	750	1346
Parete est A	C2	Idrocarburi leggeri C<12	250	375
Parete est C	C1	Idrocarburi leggeri C<12	250	6980
	C2	Idrocarburi leggeri C<12	250	627
Parete sud		Idrocarburi leggeri C<12	250	888
	C1	Idrocarburi pesanti C>12	750	1405
	C2	Idrocarburi leggeri C<12	250	6458

Tab.3.6: Prospetto contenente i superamenti delle CSC per i siti ad uso commerciale/industriale rilevati nei campioni di parete analizzati.

Come si può notare, il superamento delle CSC avviene solo per i campioni prelevati lungo le pareti, confermando l'ipotesi che il contaminante si sia diffuso prevalentemente in direzione orizzontale.

## **3.2 Fase 2: attività effettuate nel periodo 17/02/2014-22/02/2014**

### **3.2.1 Operazioni preliminari della fase 2: realizzazione di sondaggi a carotaggio continuo**

Al fine di valutare l'estensione della contaminazione nella zona circostante il palancolato e di limitare l'area di scavo della fase 2, si è deciso di eseguire 11 sondaggi a carotaggio continuo e di installare 9 piezometri per misurare lo spessore del surnatante e per la ricostruzione dell'andamento della falda. I sondaggi sono stati effettuati con le modalità descritte nel Par.3.1.8 e secondo lo schema in Fig.3.11.

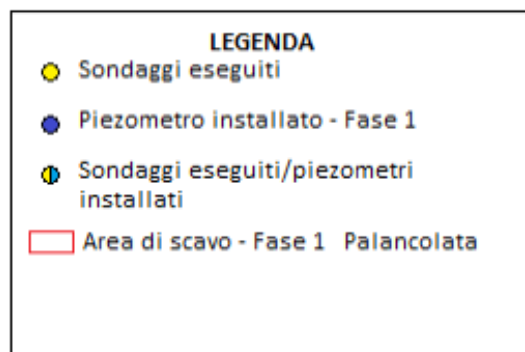
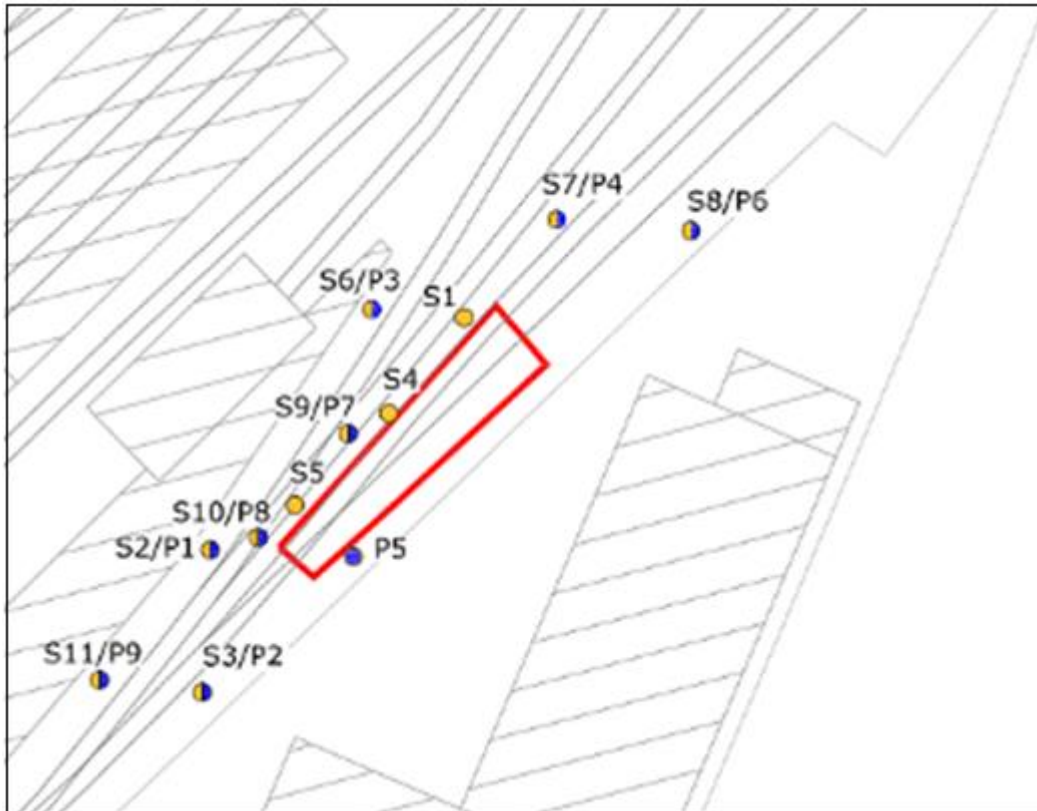


Fig.3.11: Posizione dei sondaggi eseguiti e dei piezometri installati.

Per le procedure di campionamento e la successiva formazione dei campioni si è fatto riferimento a quanto disposto dal D.Lgs. 152/06 “Norme in materia ambientale” e dal “Protocollo Operativo per la Caratterizzazione dei siti” ai sensi del D.Lgs. 152/06 e s.m.i. e dall'Accordo di programma per la Chimica di Porto Marghera – Revisione ai sensi dell'Accordo di Programma del 16 Aprile 2012, come descritto nel Par.3.1.5.

In Tab.3.7 sono riportati tutti i campioni prelevati, l'intervallo di profondità relativo ad ogni singolo campione, nonché la profondità di prelievo delle aliquote destinate all'analisi per la ricerca dei contaminanti volatili.

<b>Data campionamento</b>	<b>Nome Sondaggio</b>	<b>Profondità campione</b>	<b>Nome campione</b>	<b>Prof. prelievo campione medio (m)</b>	<b>Prof. prelievo campione puntuale (m)</b>
21/01/2014	S1	-4,00 metri	C1	0,50-1,20	0,85
			C2	2,00-3,00	2,50
			C3	3,50-4,00	3,75
	S2	-4,00 metri	C1	0,50-2,00	1,25
			C2	2,60-3,00	2,80
	S3	-4,20 metri	C1	2,00-3,00	2,50
			C2	3,80-4,20	4,00
	S4	-4,20 metri	C1	1,50-3,00	2,25
			C2	4,00-4,20	4,10
	S5	-4,20 metri	C1	1,50-2,50	2,00
			C2	4,00-4,20	4,10
	S6	-4,20 metri	C1	2,00-3,00	2,50
C2			4,00-4,20	4,10	
22/01/2014	S7	-4,20 metri	C1	1,50-3,50	2,50
			C2	4,00-4,50	4,25
	S8	-4,20 metri	C1	1,50-2,50	2,00
			C2	3,00-4,00	3,50
23/01/2014	S9	-4,00 metri	C1	0,50-1,50	1,00
			C2	1,50-2,50	2,00
			C3	2,50-3,50	3,00
			C4	3,70-4,00	3,85
	S10	-4,00 metri	C1	0,50-1,50	1,00
			C2	1,50-2,50	2,00
			C3	2,50-3,50	3,00
			C4	3,70-4,00	3,85
	S11	-4,00 metri	C1	2,00-3,00	2,50
			C2	3,50-4,00	3,75

Tab. 3.7: Riepilogo campioni di terreno prelevati dai sondaggi – fase 2.



Nel corso delle campagne alcuni sondaggi sono stati attrezzati a piezometro. Questi, utili per l'esecuzione delle indagini di tipo idrogeologico ed idraulico, sono stati installati mediante la tecnica di perforazione usata nella realizzazione dei sondaggi e secondo le modalità previste dal D.Lgs. 152/06, dal "Protocollo Operativo per la Caratterizzazione dei siti" ai sensi del D.Lgs. 152/06 e s.m.i. e dall'Accordo di programma per la Chimica di Porto Marghera – Revisione ai sensi dell'Accordo di Programma del 16 Aprile 2012 e nella D.G.R.V. 2922/03 "Definizione delle linee guida per il campionamento e l'analisi dei campioni dei siti inquinati. Protocollo Operativo".

Nella D.G.R.V. 2922/03 sono riportati i seguenti criteri generali per la realizzazione dei piezometri:

- *l'installazione del piezometro, la quota di posizionamento del tubo cieco e della porzione filtrante sarà stabilita in funzione dei risultati della perforazione. La porzione filtrante deve permettere di filtrare tutta la zona satura estendendosi parzialmente nella zona insatura in considerazione dell'entità delle fluttuazioni del livello freaticometrico;*
- *Il tubo cieco e il tubo filtro saranno costituiti in materiale compatibile con i composti da campionare e con diametro nominale pari ad almeno 70 millimetri (diametro interno);*
- *Si dovrà eseguire la chiusura del fondo del tubo piezometrico mediante fondello cieco impermeabile e applicare, qualora si rendesse necessario, sulla parte fessurata, una fascia di tessuto non tessuto, specificando la tipologia di materiale utilizzato;*
- *La giunzione dei tubi di assemblaggio del piezometro dovrà essere realizzata evitando di forzare l'avvitamento dei manicotti filettati e di storcere le estremità dei tubi, per garantire il passaggio degli strumenti di campionamento delle acque e degli strumenti di lettura dei livelli piezometrici;*
- *Si dovrà riempire l'intercapedine perforo-tubazione in corrispondenza dei tratti filtrati con un dreno costituito da ghiaietto siliceo uniforme e il*

*diametro del dreno sarà stabilito in corso d'opera sulla base della granulometria effettiva dell'acquifero da filtrare;*

- *Bisognerà continuare la costruzione dell'intercapedine immettendo sabbia, per uno spessore di 0,2 metri al di sopra del dreno, seguita dal tappo impermeabile di bentonite per lo spessore di 0,5 metri e procedere successivamente al riempimento dell'intercapedine fino alla superficie con miscela di cemento e bentonite e infine chiudere con un tappo il tubo di rivestimento che fuoriesce dal piano campagna.*

I piezometri installati nel sito oggetto di studio hanno le seguenti caratteristiche:

- la quota bocca pozzo si presenta ad una profondità tra i 2,643 m s.l.m. e i 2,427 m s.l.m.;
- l'intervallo di fenestrazione va da -1,00 m fino a -4,00 m dal piano campagna. Questo comporta che i terreni interessati alla misura del prodotto surnatante sono il riporto e la sabbia al di sotto del caranto;
- per aumentare la permeabilità in prossimità del piezometro, favorendo in tal modo l'ingresso delle acque drenate, si è collocato all'esterno della colonna un dreno o prefiltro. La migliore granulometria di un dreno deve essere inferiore a 4 volte il diametro d85 e superiore a 4 volte il d15 dell'acquifero;
- i piezometri installati hanno un diametro di 4 pollici e sono costituiti da polietilene (HDPE), materiale resistente alla degradazione e alle sostanze chimiche presenti nel sito.

### 3.2.2 Risultati delle analisi chimiche eseguite sui campioni prelevati in data 21-23/01/2014

I risultati delle analisi chimiche eseguite sui campioni di terreno prelevati hanno evidenziato superamenti delle CSC fissate per i “siti ad uso commerciale e industriale” dal D.Lgs. 152/06, All. 5, Tab. 1, Col. B, per i seguenti parametri (Tab.3.8):

Nome sondaggio	Nome campione	Intervallo di prelievo (m da p.c.)	Parametro	CSC Tab. 1 Col.B D.Lgs 152/06	Valore rilevato (mg/kg s.s.)
S1	C1	0,50-1,20	Idrocarburi leggeri C<12	250	436
			Idrocarburi pesanti C>12	750	1385
	C2	2,00-3,00	Idrocarburi leggeri C<12	250	1219
			Idrocarburi pesanti C>12	750	765
S2	C1	0,50-2,00	Idrocarburi leggeri C<12	250	4166
	C2	2,60-3,00	Idrocarburi pesanti C>12	750	558
S3	C1	2,00-3,00	Idrocarburi leggeri C<12	250	1513
S5	C1	1,50-2,50	Idrocarburi leggeri C<12	250	3714
S6	C1	2,00-3,00	Idrocarburi leggeri C<12	250	1175
S8	C1	1,50-2,50	Idrocarburi leggeri C<12	250	574
S9	C1	0,50-1,50	Idrocarburi leggeri C<12	250	1133
	C2	1,50-2,50	Idrocarburi leggeri C<12	250	997
S10	C1	0,50-1,50	Idrocarburi leggeri C<12	250	1742
	C2	1,50-2,50	Idrocarburi leggeri C<12	250	1516
S11	C1	2,00-3,00	Idrocarburi leggeri C<12	250	752

Tab.3.8: Visualizzazione dei superamenti rilevati nei campioni.

Il superamento delle CSC nei campioni prelevati oltre la Parete Ovest dello scavo effettuato nella Fase 1 ha permesso di stabilire l'estensione e la perimetrazione dello scavo nella fase 2.

### 3.2.3 Operazioni della fase 2

Per effettuare lo scavo dell'area interessata nella fase 2 è stata inizialmente perimetrata la zona di intervento; successivamente è stato smontato il binario soprastante ed infine si è proceduto allo scavo mediante un escavatore cingolato fino alla profondità di -2,00 m dal piano campagna (Fig.3.12).

Questa profondità è stata imposta dal fatto che si è voluto far coincidere il fondo scavo con il tetto dei limi argillosi o limi debolmente sabbiosi.

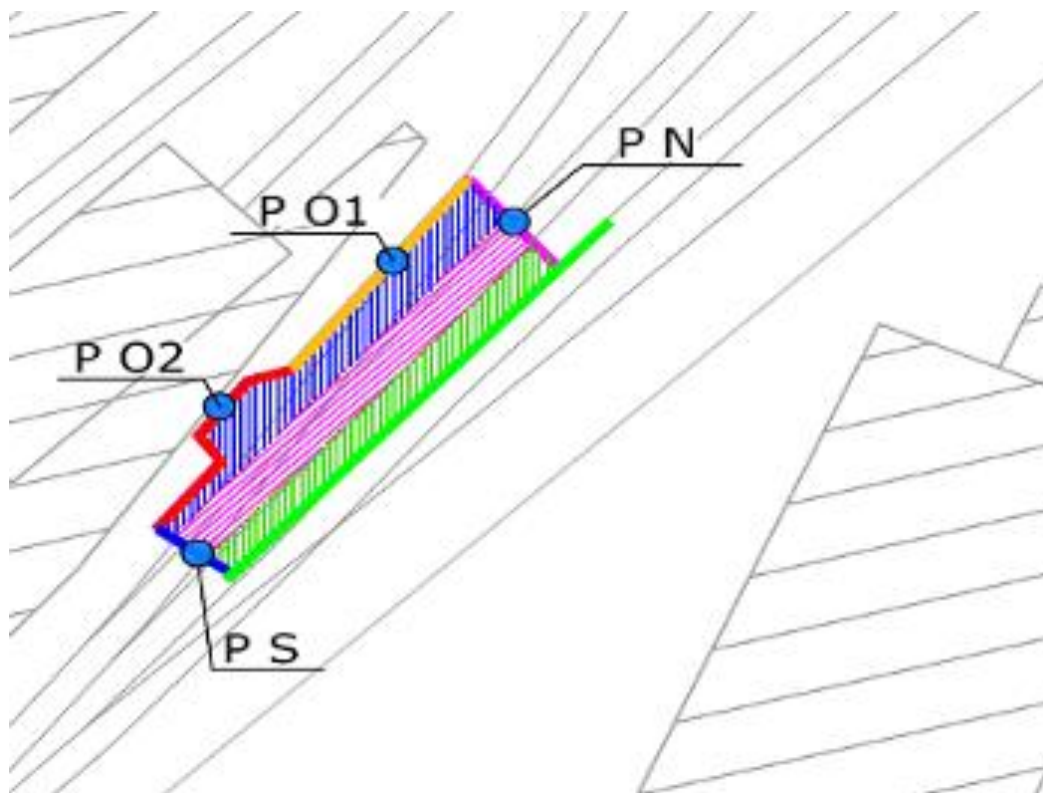


Fig.3.12: Operazioni di scavo.

Al fine di eseguire un campionamento del fondo dello scavo e delle pareti si è proceduto all'aspirazione delle acque presenti nello scavo attraverso un autospurgo e momentaneo stoccaggio in serbatoi stoccati in sito (Par.3.3). Al termine dello scavo, al fine di effettuare il campionamento per la verifica di conformità alle CSC, si è suddivisa l'area in 3 sub-aree, aventi dimensioni minori

di 100 m<sup>2</sup> e per ciascuna sub-area è stato prelevato un campione medio composito del fondo scavo, per un totale di 3 campioni denominati FSC, FSD e FSE. Il campionamento delle pareti è stato effettuato prelevando un campione per la Parete Nord e per la Parete Sud, mentre per la Parete Ovest si sono effettuati due campionamenti.

La suddivisione della Parete Ovest in due porzioni è stata dettata dal ritrovamento di ceneri di pirite, materiale biancastro (calce), legno e orizzonti nerastri e maleodoranti, legati ad attività antecedenti allo sversamento del gasolio avvenuto in data 13/12/2013. Il rinvenimento di questi rifiuti conferma l'ipotesi che nell'area interessata, è molto alto il rischio di ritrovare delle contaminazioni storiche legate a materiali di riporto utilizzati per l'imbonimento. La suddivisione dell'area nelle 3 sub-aree è avvenuta rispettando la morfologia e, ipotizzando che il contaminante raggiunga una profondità massima in prossimità dello sversamento, si è scelto di diminuire la profondità dello scavo man mano che ci si allontanava dalla palancola, raggiungendo la profondità minima a ridosso del muro (Fig.3.13 e Fig.3.14).



LEGENDA	
	Fabbricati
	Binarl
	Palancola
	Area di scavo - Fase 2
	Campioni medio fondo scavo - FSE
	Campione medio fondo scavo - FSD
	Campione medio fondo scavo - FSC
	Campione medio parete scavo - P N
	Campione medio parete scavo - P S
	Campione medio parete scavo - P O1
	Campioni medio parete scavo - P O2

Fig.3.13: Suddivisione dell'area in sub-aree e posizione dei campioni prelevati durante la fase 2.



Fig.3.14: Varie profondità raggiunte dalle diverse sub-aree.

Nella sub-area C, che in Fig.3.13 è rappresentata di colore verde, il fondo scavo arriva a -1,90 m dal piano campagna; la sub-area D, indicata di colore rosa, arriva ad una profondità di -1,50 m mentre la sub-area E, di colore blu arriva ad una profondità di -0,90 m dal piano campagna.

Concluso il campionamento si è ripristinata l'area dello scavo mediante la posa di:

- inerte riciclato costipato mediante rullatura per strati omogenei non superiori a 30 cm dalla quota di fondo scavo, fino alla profondità di -1,50 m dal p.c.;
- materiale stabilizzato costituito da materiale calcareo di cava di pezzatura 0-30 mm, costipato mediante rullatura per strati omogenei non superiori a 30 cm da -1,50 metri a -0,50 metri;
- geotessuto;
- ballast fino al piano campagna e rimuovendo le palancole.

### **3.2.4 Risultati delle analisi chimiche eseguite sui campioni prelevati durante la fase 2**

I campioni, prelevati durante la Fase 2, sono stati sottoposti ad alcune analisi chimiche per la ricerca di BTEX, idrocarburi pesanti ( $C>12$ ) e idrocarburi leggeri ( $C<12$ ).

Inoltre sul campione prelevato nella parete Ovest n. 2 (P O2) sono stati ricercati dei parametri aggiuntivi come: metalli (Arsenico, Cromo totale, Cromo VI, Piombo, Rame e Zinco), Idrocarburi Policiclici Aromatici e Fenoli clorurati (o-m-p-Metifenolo, 2-Clorofenolo, 2,4-Diclorofenolo, 2,4,6-Triclorofenolo, Pentaclorofenolo).

L'integrazione delle analisi aggiuntive per la ricerca degli inquinanti sopra citati è stata dettata dal fatto che durante la raccolta del campione P O2 sono state trovate delle ceneri di pirite, del materiale biancastro (probabilmente calce), del legno e orizzonti nerastri maleodoranti.

Ora, confrontando le concentrazioni dei parametri, trovate nei singoli campioni attraverso le analisi, con le concentrazioni soglia di contaminazione (CSC) fissate per i "siti ad uso commerciale e industriale" dal D.Lgs. 152/06, All. 5, Tab.1, Col B, si è notato il superamento dei limiti di legge per i seguenti campioni (Tab.3.9):



<b>Nome campione</b>	<b>Parametri</b>	<b>CSC (Tab.1 Col.B D.Lgs. 152/06</b>	<b>Valori riscontrati (mg/kg s.s.)</b>
FSD	Idrocarburi leggeri C<12	250	310
FSE	Idrocarburi leggeri C<12	250	413
Parete nord	Idrocarburi leggeri C<12	250	795
	Idrocarburi pesanti C>12	750	2210
Parete sud	Idrocarburi leggeri C<12	250	2548
Parete Ovest n.2	Arsenico	50	741
	Piombo	1000	2606
	Idrocarburi leggeri C<12	250	7185
	Idrocarburi pesanti C>12	750	4170

Tab.3.9: Visualizzazione dei superamenti rilevati nei campioni.

Nella parete Ovest si sono riscontrate concentrazioni elevate di Arsenico e Piombo, parametri non correlati all'evento incidentale occorso, confermando l'ipotesi che in questo caso si tratti di una contaminazione antecedente legata ai materiali utilizzati per l'imbonimento della zona e che non sia quindi collegabile allo sversamento di gasolio. A fronte dei superamenti delle CSC riscontrati, secondo quanto disposto dal D.Lgs. n. 152/06 si è reso quindi necessario procedere con la comunicazione al Comune e Provincia competenti e con la presentazione del Piano di Caratterizzazione.

### 3.3 Impianto Pump & Stock

Nel corso dei rilievi piezometrici in data 29/01/2014, nei piezometri P1, P2, P4 e P9 (Fig.3.11), è emersa la presenza di gasolio in fase surnatante. Per la rimozione del contaminante, come impone la normativa vigente, si è installato un impianto automatico di aspirazione costituito da un sistema di pompaggio temporizzato composto da pompe pneumatiche che convogliano i liquidi aspirati in serbatoi aerei in attesa dello smaltimento, previa analisi di classificazione.

L'aspirazione del prodotto surnatante è possibile grazie alle proprietà chimiche del contaminante, in particolare la densità molto inferiore rispetto a quella dell'acqua permette all'inquinante di galleggiare sulla tavola d'acqua.

La pompa esterna di aspirazione di tipo pneumatico (Fig.3.15) è stata collegata ad un collettore di aspirazione per l'emungimento programmato dei liquidi da ogni piezometro (Fig.3.16).

La sequenza e la programmazione delle fasi di emungimento sono gestite da un sistema di controllo programmabile PLC disposto all'interno del quadro di comando dell'impianto. Il prodotto aspirato è stato convogliato all'interno di due cisterne di capacità 5 m<sup>3</sup> ciascuno (Fig.3.17), collocate in un magazzino adiacente ai binari.

Nell'impianto sono stati installati dei galleggianti sia all'interno delle cisterne, per verificare il raggiungimento del livello massimo di stoccaggio, sia all'interno dei piezometri, dove in ogni punto è stata installata una curva di 90° rivolta verso l'alto per facilitare l'aspirazione del prodotto surnatante anziché l'acqua di falda; il tubo di aspirazione è stato collegato al galleggiante in modo da seguire le fluttuazioni della falda e facilitare l'estrazione del surnatante.



Fig.3.15: Pompa di aspirazione di tipo pneumatico.



Fig.3.16: Posizionamento delle condotte di aspirazione.



Fig.3.17: Cisterne di stoccaggio dei liquidi aspirati dai piezometri.

L'impianto è stato attivato in data 18/02/2014, con funzionamento a ciclo continuo nell'intervallo tra le ore 7.00 e le ore 17.30; all'interno di questo intervallo è stato impostato l'emungimento in successione dei 4 piezometri (P1, P2, P4 e P9) con la seguente sequenza:

- P1: 2 minuti;
- P2: 1,5 minuti;
- P4: 2 minuti;
- P9: 2 minuti.

Al termine dell'aspirazione del piezometro P9 viene attivato l'emungimento del piezometro successivo con i tempi e la sequenza sopra riportata.

Il tutto viene ripetuto per 30 minuti, al termine del quale l'impianto è stato

progettato in modo che si sospenda per circa 2 ore per permettere il riequilibrio della falda e dell'eventuale surnatante.

Nel Luglio 2013 sono stati installati 5 piezometri (P10÷P14) al fine verificare l'estensione dell'area di potenziale contaminazione ed eventualmente per poter implementare ed intensificare l'aspirazione qualora se ne verifici la necessità. In particolare, sono stati realizzati a monte dell'area dello scavo, in prossimità dei piezometri P4 e P6, e a valle delle lavorazioni, nelle vicinanze di P2 e P9. Contemporaneamente è stato chiuso il piezometro P7 , danneggiato nel corso delle operazioni di scavo.

### **3.4 Proseguimento degli interventi di Messa in Sicurezza d'Emergenza**

Dopo il ripristino delle due aree di scavo si è lasciato in funzione l'impianto di Pump & Stock in modo tale che continuasse l'aspirazione della fase surnatante, contribuendo così alla bonifica dell'acqua di falda.

In data 20/03/2014 tale impianto ha subito alcune modifiche tra cui:

- Installazione di 4 valvole pneumatiche per l'aspirazione del surnatante dagli altri piezometri rimanenti (P3, P5, P6, P7 e P8);
- Installazione dei galleggianti di emungimento e regolazione delle quote di aspirazione;
- Regolazione dei tempi di emungimento dei 4 piezometri precedentemente in aspirazione (P1, P2, P4 e P9) con la sequenza di seguito riportata:
  - P1: 4 minuti;
  - P2: 3 minuti;
  - P4: 3 minuti;
  - P9: 3 minuti;
- Modifica dell'orario del funzionamento dell'impianto riprogrammandolo in modo tale che funzioni per 24 h su 24 h.

## 4. Piano di Caratterizzazione

Nel presente capitolo viene illustrato il piano di caratterizzazione del sito, che è stato elaborato dallo scrivente sulla base dei dati a disposizione derivanti dalle indagini preliminari eseguite in fase di MISE.

L'elaborazione di tale piano è stata effettuata sulla base delle seguenti fasi:

- raccolta di informazioni esistenti relative al sito;
- costruzione del modello concettuale;
- pianificazione delle indagini di dettaglio, utili alla definizione dello stato qualitativo del sito ed all'eventuale elaborazione dell'analisi di rischio, ovvero per la selezione delle tecnologie di bonifica applicabili.

Con il termine Piano di Caratterizzazione, secondo l'Allegato 2 del D.Lgs. 152/06, si intendono tutte quelle attività che permettono di ricostruire i fenomeni di contaminazione a carico delle matrici ambientali, in modo da ottenere le informazioni di base su cui prendere decisioni realizzabili e sostenibili per la messa in sicurezza e/o bonifica del sito. In particolare deve comprendere:

- la descrizione tridimensionale del contaminante nel suolo;
- la descrizione tridimensionale del contaminante nelle acque;
- le potenziali vie di migrazione degli inquinanti verso i potenziali recettori;
- le caratteristiche idrogeologiche e geologiche dell'area.

Il seguente capitolo verrà suddiviso in 3 parti: nella prima verranno fornite la descrizione dell'area e la caratterizzazione climatica, mentre nella seconda parte sarà descritto l'assetto geologico e idrogeologico dell'intera zona, nonché il modello concettuale preliminare del sito. Nell'ultima parte verrà sviluppata la pianificazione delle indagini di dettaglio necessarie al fine di sviluppare il modello concettuale definitivo del sito.

## 4.1 Ubicazione e delimitazione dell'area

Inizialmente risulta necessario procedere ad un inquadramento geografico della zona di interesse, al fine di definire il contesto nel quale il sito oggetto di studio risulta inserito ed evidenziarne le peculiarità in funzione dello sversamento accidentale avvenuto.

Come si è visto precedentemente l'area oggetto del Piano di Caratterizzazione si trova adiacente ai binari ferroviari e in prossimità di edifici, strutture edificate come muri perimetrali e capannoni. Nel seguito e nella Tav.1 sono riportati dei particolari della zona ricavati dalla Cartografia Tecnica Regionale (Fig.4.1) e dal software Google Earth (Fig.4.2).

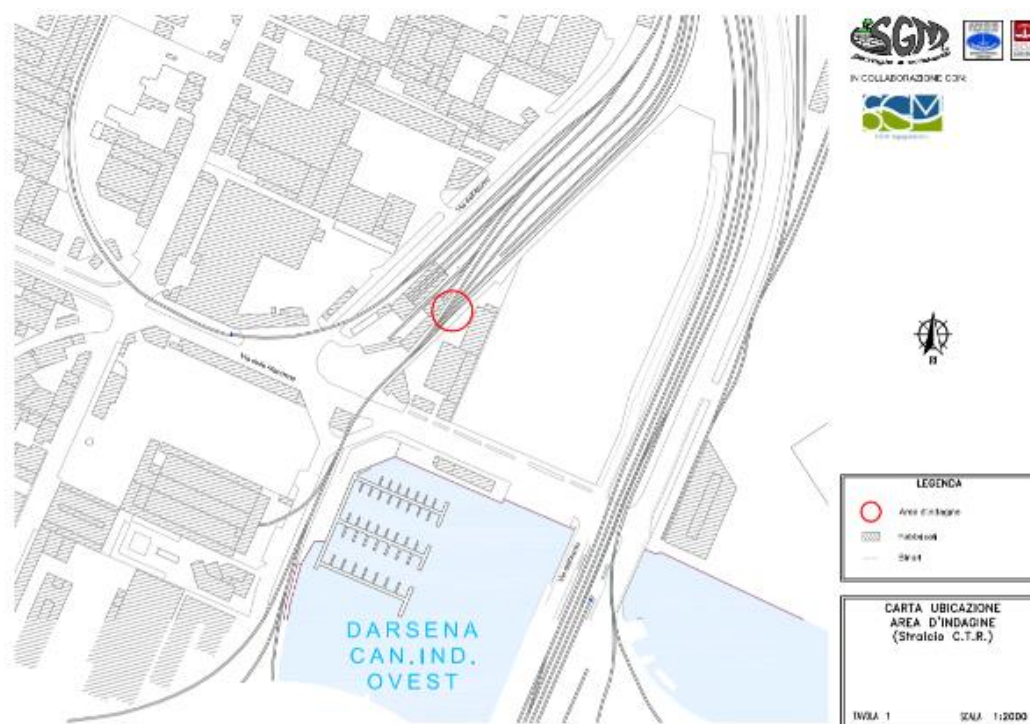


Fig.4.1: Ubicazione del sito di interesse.





Fig.4.2: Immagine tratta da Google Earth che riporta l'ubicazione del sito con particolare riferimento all'area di scavo effettuato nelle 2 fasi.

### **4.1.1 Microrilievo**

Uno degli aspetti più importanti da considerare quando vengono realizzati dei sondaggi è la necessità di poter confrontare le diverse colonne stratigrafiche, riferendo tutti i dati delle diverse perforazioni eseguite a partire dal piano campagna, che può assumere valori differenti per ogni singolo sondaggio, ad una quota assoluta costituita dal livello del medio mare.

A tal fine è possibile utilizzare come riferimento la carta del Microrilievo della Provincia di Venezia. Dalle elaborazioni consultate si evince come l'intera area di Porto Marghera, si trova ad una quota al di sopra del livello del mare che dipende dallo spessore dello strato di riporto depositato nella zona durante tutto il 1900. Il territorio veneziano, grazie alle continue azioni di imbonimento eseguite in passato, presenta quote comprese tra +1 e +4 m sul livello del mare. Le varie fasce

altimetriche di Venezia possono essere ricavate dalla carta altimetrica tratta dall'Indagine idrogeologica di Porto Marghera (Fig.4.3).

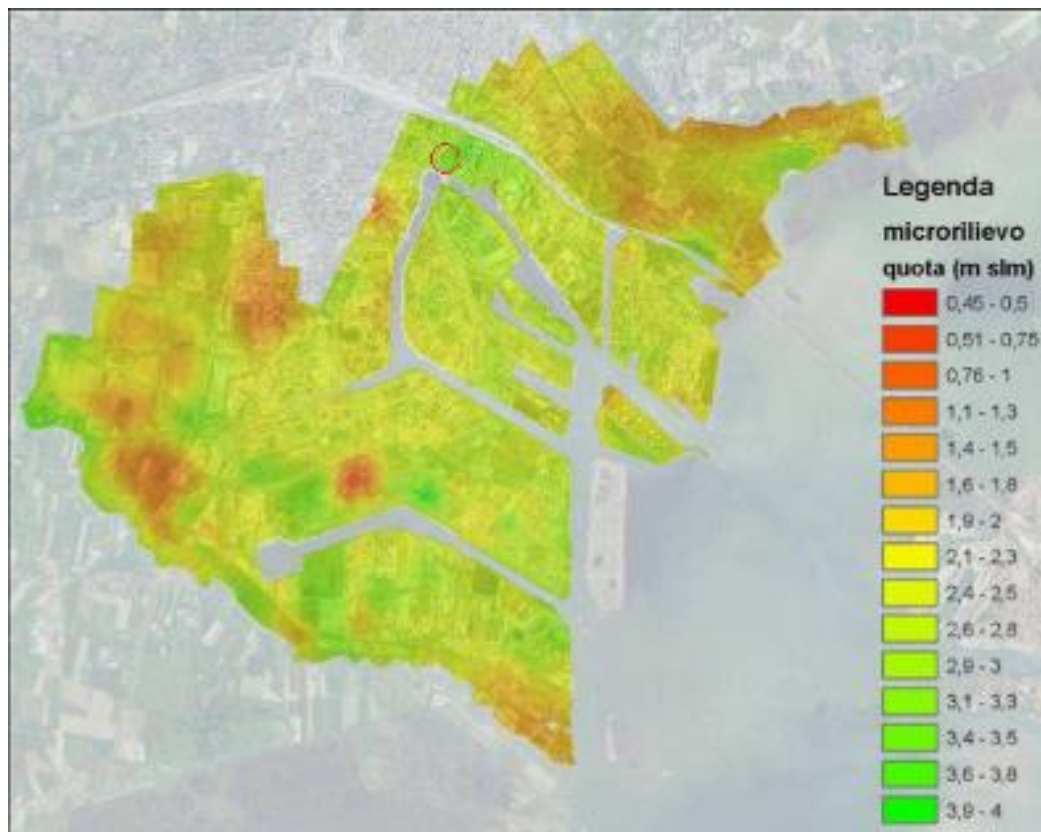


Fig.4.3: Microrilievo LIDAR di Porto Marghera. In particolare vi è segnalata in rosso l'area di studio.

Nella carta in Fig.4.3 si può notare che l'area di interesse è ad una quota tra i +3 m e i +3,5 m s.l.m.

Il LIDAR (Light Detection and Ranging) può commettere un errore nelle altezze in media tra +/- 15 cm, ma può essere soggetto ad errori durante l'acquisizione o nel corso dell'elaborazione e il trattamento dei dati, effettuato con software molto delicati.

A seguito di una prima indicazione di massima fornita dal microrilievo LIDAR, è stato eseguito un rilievo plano-altimetrico dei punti di indagine mediante una strumentazione GPS e una strumentazione topografica tradizionale, sulla base del quale la quota dei sondaggi eseguiti nel sito in esame oscilla tra +2,45 m a +2,69

m s.l.m. (Tab.4.1).

La differenza di quota dei punti registrata può essere chiarita con l'ipotesi che la misura effettuata con la strumentazione satellitare GPS, possa essere soggetta da errori di diverso tipo, ad esempio:

- Errori accidentali: 1% della lunghezza d'onda;
- Errori sistematici, come errori di orologio, errori di orbita e errori di rifrazione, che possono far oscillare la misura da 1 m fino a 10 m;
- Errori di osservazione, ad esempio percorsi multipath, interferenze elettromagnetiche e diversa posizione e geometria dei satelliti rispetto l'osservatore;
- Errori strumentali.

<b>Punto di indagine</b>	<b>Quote p.c. (m s.l.m.)</b>	<b>Quota bocca pozzo (m s.l.m.)</b>
S1	2,507	/
S2/P1	2,694	2,580
S3/P2	2,618	2,438
S4	2,614	/
S5	2,559	/
S6/P3	2,802	2,613
S7/P4	2,594	2,427
S8/P6	2,762	2,643
S9/P7	2,586	2,519
S10/P8	2,605	2,551
S11/P9	2,659	2,436
Parete nord	2,504	/
Parete est A	2,547	/
Parete est B	2,575	/
Parete est C/P5	2,573	2,500
Parete sud	2,451	/

Tab.4.1: Quote dei punti di indagine.

## 4.2 Caratterizzazione climatica

I dati termici, climatici e idrologici presenti nel seguente paragrafo, sono stati inseriti al fine di ottenere un modello concettuale del sito molto più completo ed esaustivo e soprattutto in previsione dell'elaborazione di un'eventuale analisi di rischio.

### **Il clima**

Nel territorio di Venezia si possono distinguere due grandi zone con diverse caratteristiche climatiche in base alla differente azione che il mare esercita sull'entroterra: la zona litoranea, quella prossima al mare e quella interna con caratteristiche simili a quelle della pianura continentale.

La zona litoranea è influenzata dalla presenza del mare, che comporta una mitigazione del clima, anche se l'azione mitigatrice interessa solo un'area piuttosto marginale del territorio poiché il Mar Adriatico risulta essere un mare interno e poco profondo e perché interessa solo l'aria proveniente dai settori sud-orientale e orientale. Questo comporta il fatto di avere inverni con temperature mitigate ma comunque abbastanza basse per la presenza della bora proveniente da NE. Lungo la zona interna il clima diventa simile a quello della pianura veneta, caratterizzato da estati più calde ma inverni più rigidi. Un fattore tipico di Venezia è la nebbia, causata dal grado elevato di umidità (può andare dal 72 % nei mesi più caldi fino a 80% nel mese di dicembre), dalla configurazione geografica e dalla configurazione barica su scala sinottica.

## I venti

Questo parametro risulta molto importante in quanto si tratta di uno dei principali parametri ambientali sito-specifici richiesti per l'elaborazione dell'analisi di rischio; in particolare sono rilevanti la direzione principale e la velocità dei venti regnanti. Questi dati possono essere determinati elaborando i valori misurati dalla centralina meteorologica più vicina al sito e vengono di solito considerati i valori medi annui.

I due venti che interessano la provincia di Venezia sono: la Bora e lo Scirocco. La prima, distinta da elevati valori di persistenza e di intensità, può essere suddivisa in "bora chiara" o "bora scura" in base al diverso sistema di alta e bassa pressione. La "bora chiara" è collegata alla presenza dell'alta pressione nell'Europa Centro-Orientale e ad un sistema di bassa pressione nel Mediterraneo Orientale o nel Basso Adriatico, favorendo l'ingresso delle correnti fredde e secche provenienti dall'Europa Nord-Orientale; mentre la seconda è caratterizzata da un sistema di bassa pressione nel Medio-Alto Adriatico, convogliando così nel territorio italiano correnti più umide da Est Nord-Est determinando condizioni di tempo perturbato nell'intera area.

La determinazione delle informazioni riguardo la velocità e la direzione dei due venti prevalenti è avvenuta utilizzando la stazione meteo-mareografica di Marghera (Fig.4.4).



Fig.4.4: Posizione dell'area oggetto di studio e della Stazione meteorografica Marghera.

Dall'analisi dei dati (Fig.4.5) dell'anno 2013, registrati dalla stazione meteorografica Marghera, i venti con intensità rilevabili dalla strumentazione, ossia con velocità maggiore o uguale di 5,5 m/s, costituiscono circa il 30 % del totale, mentre per il restante 70 % si tratta di brezze e da calma di vento. Inoltre, si può notare come la Bora e lo Scirocco siano venti provenienti rispettivamente dal primo e secondo quadrante, infatti la bora giunge da NE e ENE mentre lo scirocco da SE, SSE e S.

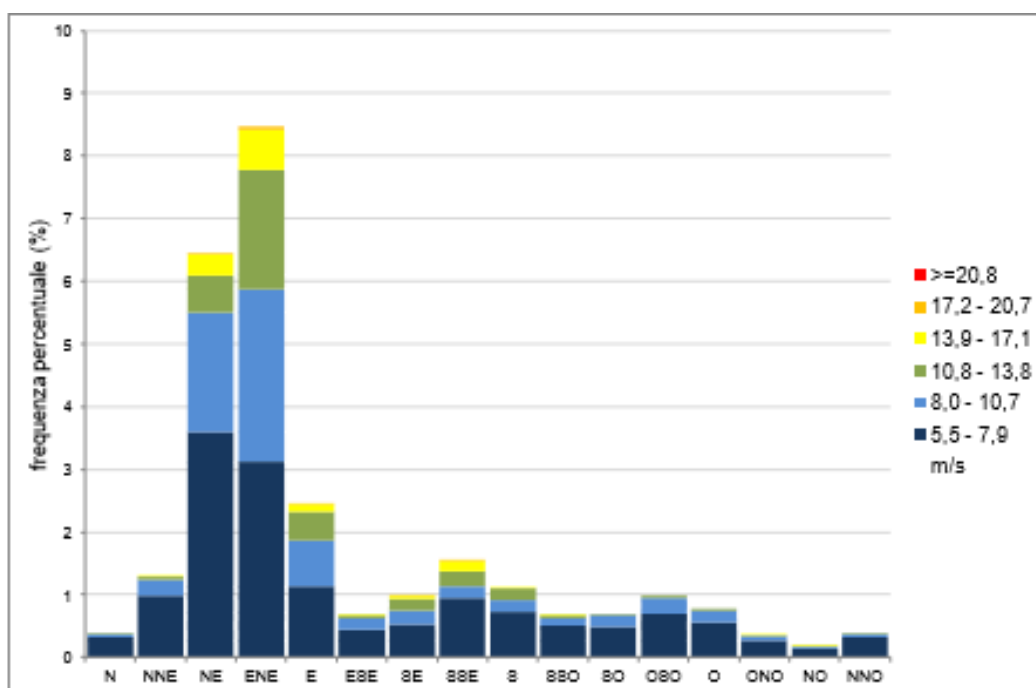


Fig.4.5: Distribuzione del vento  $\geq 5,5$  m/s per intensità e direzione.

## Le precipitazioni

Un altro parametro importante è costituito dalle precipitazioni in quanto, analogamente alla direzione ed all'intensità dei venti, rappresenta uno dei dati sito specifici da utilizzare qualora si debba elaborare un'analisi di rischio.

In base ai dati riguardanti la piovosità (Fig.4.6), registrati dalla stazione meteorografica Marghera, si può notare come nel corso dell'anno 2013 l'altezza di precipitazione totale risulti pari a 1147 mm, distribuita in 100 giorni piovosi. I mesi maggiormente interessati da fenomeni piovosi sono marzo (296 mm e 19 giorni piovosi), maggio (159 mm e 14 giorni piovosi) e ottobre (132 mm e 8 giorni piovosi). Il mese più siccitoso è risultato settembre (9 mm e 4 giorni piovosi).

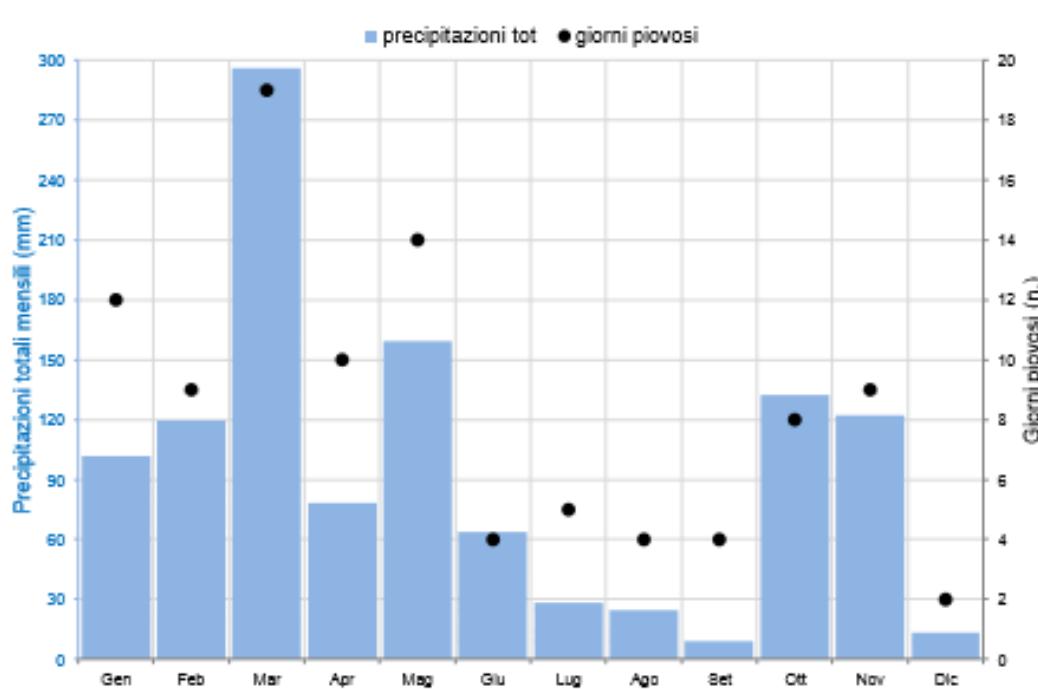


Fig.4.6: Precipitazioni mensili e numero di giorni piovosi.

Analizzando i dati del periodo 1961-90 si può dedurre un andamento crescente delle precipitazioni che va da Sud a Nord, con valori che variano da meno di 700 mm nella Venezia Meridionale fino a 1100 mm nelle zone nord-orientali, mentre nella parte centrale i valori di precipitazione registrati risultano nell'intervallo



compreso tra 800 mm e 900 mm. Questo andamento crescente è stato confermato anche dalle osservazioni fatte nel ventennio 1992-2002 (Fig.4.7).

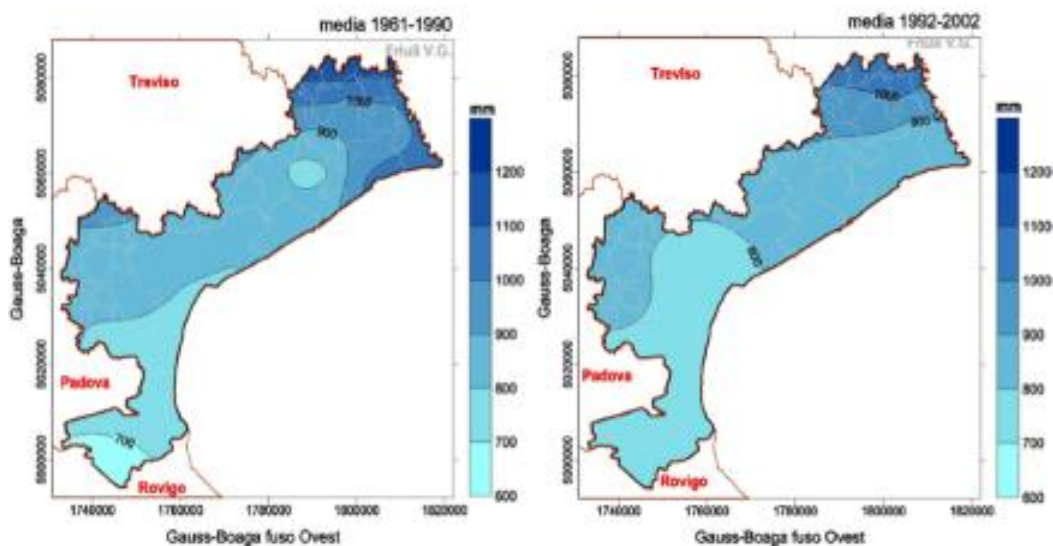


Fig.4.7: Distribuzione delle medie annuali per il periodo 1961-1990 e per il periodo 1992-2002.

Dal punto di vista stagionale il regime pluviometrico di Venezia è di tipo “equinoziale” con dei picchi massimi di precipitazione nel periodo primaverile e autunnale, mentre la stagione più secca è mediamente quella invernale.

### La temperatura

Analizzando il periodo 1961-90 si può notare come le medie annuali delle temperature massime raggiunte nel territorio siano piuttosto omogenee e siano comprese tra i  $+16^{\circ}\text{C}$  e i  $+19^{\circ}\text{C}$ . Questa omogeneità viene dimostrata anche esaminando le temperature del periodo 1992-02, con la differenza che la media delle temperature si attesta tra i  $+18^{\circ}\text{C}$  e i  $+20^{\circ}\text{C}$  (Fig.4.8).

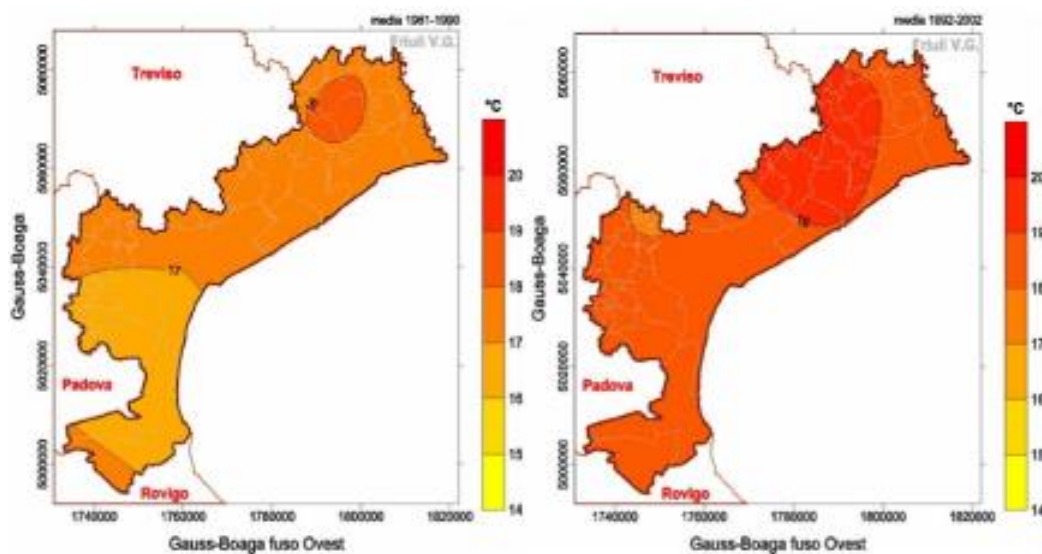


Fig.4.8: Distribuzione dei valori medi annui della temperatura massima per il periodo 1961-90 e per il periodo 1992-02.

Per quanto riguarda la media annuale delle temperature minime annuali raggiunte nel territorio veneziano si nota maggiormente l'effetto mitigatore del mare che comporta una diminuzione della temperatura minima procedendo verso

l'entroterra. In questo caso si apprezza di più una variazione delle temperature del periodo storico 1961-90 (valori tra +7°C e +10°C) rispetto a quelle del periodo 1992-02 (valori compresi tra +8°C e +11°C).

La distribuzione dei valori medi annuali della temperatura minima è visualizzabile della figura sottostante (Fig.4.9).

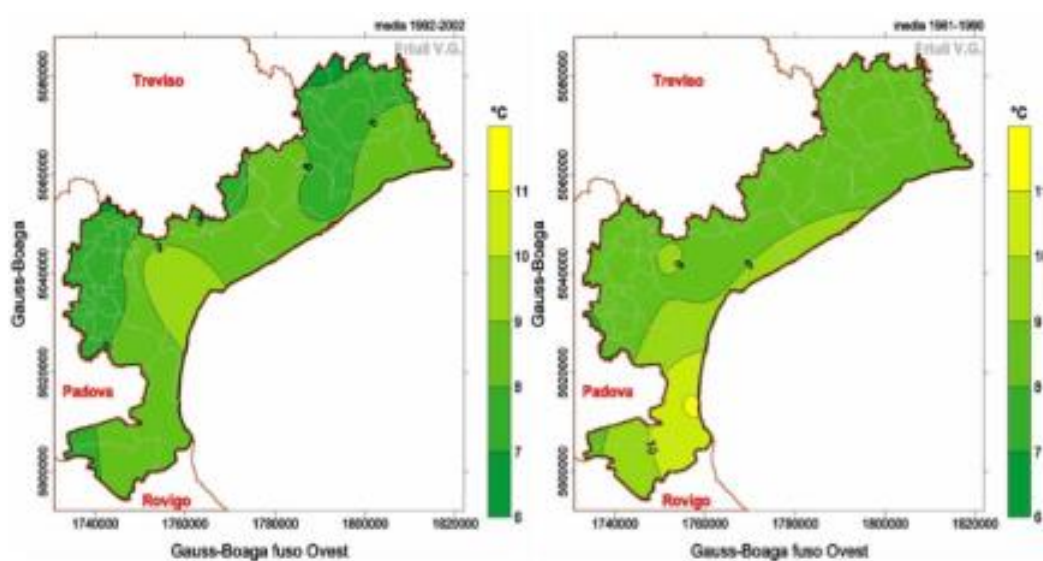


Fig.4.9: Distribuzione dei valori medi annui della temperatura minima per il periodo 1961-90 e per il periodo 1992-02.

La distribuzione delle temperature su base stagionale confermano il trend evidenziato su livello annuo, con valori massimi estivi in aumento e valori minimi in diminuzione allontanandoci dalla costa.

Un ultimo, ma non meno importante, fattore molto caratteristico di Venezia è la marea, fenomeno che verrà affrontato successivamente (Par.4.4.2).

### 4.3 Inquadramento idro-geologico generale

Prima di affrontare l'inquadramento generale di Porto Marghera è utile discutere l'evoluzione geomorfologica e geologica della Pianura Padana in modo tale da comprenderne al meglio la geologia attuale e tutti i processi geologici che hanno reso la zona di interesse peculiare dal punto di vista geologico ed idrogeologico. L'evoluzione della pianura padana si può suddividere in tre grandi fasi: la prima ha un'età maggiore dei 30.000 anni ed è definita "Pre-LGM"; la seconda, compresa tra i 30.000 e i 17.000 anni, è chiamata "LGM" (Last Glacial Maximum) e l'ultima fase racchiude il periodo che va dai 17.000 anni fino alla base dell'Olocene e viene denominata "Post-LGM".

Per la suddivisione delle varie fasi evolutive si è scelto di suddividere la scala stratigrafica in base al rapporto tra gli isotopi stabili dell'ossigeno ( $\delta^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ ) presenti nel guscio dei foraminiferi oceanici poiché questo è un buon indicatore indiretto della temperatura e del paleoclima. Gli vari stage isotopici (Marine Isotopic Stage) con cui è stato suddiviso il Pleistocene sono stati numerati in modo tale che i numeri dispari coincidano con i periodi caldi e quelli pari con le glaciazioni e in maniera che il MIS 1 corrisponda con la base dell'Olocene. Durante la penultima glaciazione (166.000-132.000 anni fa), il pianeta raggiunse delle condizioni climatiche tali da permettere la fuoriuscita dei ghiacciai dagli sbocchi vallivi e una notevole fase di sedimentazione in pianura. Al di sotto della linea delle risorgive i depositi che si vennero a formare furono prevalentemente limosi, limosi-argillosi con sottili canali sabbiosi a geometria lenticolare e si intercettano ad una profondità di 60-70 m. Al di sopra di questi, si misero in posto sedimenti di tipo costiero-lagunari, appartenenti al MIS 5. In questo periodo si ebbe un'importante variazione del clima con il conseguente scioglimento dei ghiacciai vallivi e una fase high stand che portò il livello marino a raggiungere un'altezza massima di + 6 m s.l.m. I depositi che si vennero a formare, quindi, si trattano di alternanze decimetriche di sabbia e sabbie-limose con abbondanti resti di conchiglie marine. Verso 116.000 anni fa iniziò una fase fredda, ritenuta l'inizio del periodo Würmiano (116.000-11.500 anni fa), che durò fino all'inizio dell'Olocene, mentre attorno a 80.000 anni fa ci fu il passaggio tra MIS 5 e MIS 4,

cioè da condizioni mediamente più calde a decisamente più fredde. Questo cambiamento del clima comportò un periodo con scarso apporto sedimentario tanto che il MIS 4 viene preso come hiatus sedimentario e questa scarsa sedimentazione durò fino a 30.000 anni fa. Nel settore orientale della pianura tale hiatus sedimentario è rappresentato da alcuni orizzonti di torbe con uno spessore di 1-3 m. Una delle fasi evolutive più importanti della pianura veneta- friulana ebbe inizio 30.000 anni fa e corrisponde all'avanzata delle fronti glaciali fino in alta pianura. In questo periodo (Last Glacial Maximum) si ebbe una fortissima deposizione con la conseguente formazione di megafan alluvionali che raggiunsero dimensioni tra i 1.000 e 2.500 Km<sup>2</sup>. Queste strutture sedimentarie presentano una differenziazione longitudinale passando da depositi ghiaiosi e ghiaiosi-sabbiosi nella parte apicale del megafan, mentre dalla linea di risorgiva fino alla parte distale si hanno depositi limosi- argillosi e corpi di canale sabbiosi, o più raramente, ghiaiosi. Un'altra importante differenziazione interna di queste strutture sta nel fatto che un sistema fluviale è attivo solo in alcune fasce limitate, mentre il resto del megafan non è più soggetto alla sedimentazione bensì alla pedogenesi determinando così differenze pedologiche, geomorfologiche e idrologiche anche in parti adiacenti del megafan. Lo spessore dei sedimenti depositi durante il LGM è, in alcuni tratti, superiore ai 15 m ma può raggiungere un massimo di 25-30 m come è documentato nel megafan del Brenta nelle zone di Mestre e Marghera (Unità di Mestre). La notevole sedimentazione contrasta i modelli di stratigrafia sequenziale infatti, secondo la letteratura mondiale quando si è in un periodo glaciale, la caduta del livello eustatico (low stand) dovrebbe portare ad un' incisione dei letti fluviale a monte con conseguente erosione della pianura retrogradante. Questa differenza è stata spiegata dal fatto che il bassissimo gradiente topografico (3-0,5 ‰) possa aver assorbito gli effetti dell'abbassamento eustatico pleniglaciale permettendo così l'aggradazione dei megafan. Tra 20.000 e 17.000 anni fa ebbe inizio la fase di deglaciazione nelle aree alpine con il conseguente ritiro dei fronti glaciali dall'alta pianura. Questo comportò un terrazzamento nella parte apicale dei megafan da parte dei corsi d'acqua e la modifica della configurazione degli alvei provocò un aumento delle velocità

idriche e della capacità di trasporto degli scaricatori. A differenza dell'alta pianura, dove si instaurò un ambiente nettamente erosivo, nella parte distale dei megafan si manifestò un carattere deposizionale in quanto la bassa pianura non fu soggetta all'incisione fluviale. Per tale motivo, i depositi cataglaciali andarono a mettersi in posto al di sopra di depositi pleniglaciali con la formazione di dossi caratterizzati dalla presenza di ghiaie e sabbie-ghiaiose. Attorno ai 17.000 anni fa si presentò un notevole cambiamento del clima e questa data viene presa a livello mondiale come fine del LGM e come inizio del Tardoglaciale. I fronti dei ghiacciai si ritirarono completamente dalle valli alpine verso i 14.000 anni fa comportando in questo stadio la totale mancanza di sedimentazione e la progressiva erosione anche in bassa pianura. L'ambiente erosivo venutasi a creare è stato imputato a diverse cause: il ritiro definitivo dei ghiacciai, alla formazione di laghi intravallivi all'interno delle cerchie moreniche e alla nascita della vegetazione connessa al miglioramento climatico. Questa forte tendenza erosiva durò fino a circa 3.000 anni fa e finì grazie alla trasgressione marina olocenica, causata sia dallo scioglimento dei ghiacciai alpini sia della calotta artica, che comportò un sollevamento del livello eustatico, che da un livello di -120 m s.l.m. arrivò ad un livello inferiore di pochi metri dall'attuale. L'high stand che venne ad instaurarsi comportò un'aggradazione della linea di costa e il completo riempimento delle depressioni da parte di depositi lagunari olocenici con la formazione di dossi fluviali attorno a 3.000-4.500 anni fa. Durante l'Olocene, con la crescita di una buona copertura vegetale e grazie ad un clima caldo-umido, iniziò a svilupparsi la pedogenesi sulle superfici dei depositi del LGM. La presenza della falda freatica in prossimità della superficie topografica inibì localmente la formazione di un suolo, soprattutto nelle aree più elevate e ben drenate, mentre nelle aree dove i depositi furono di granulometria inferiore (limi-argille), la presenza della falda e la minore permeabilità portarono alla formazione di notevoli orizzonti di concrezione carbonatiche. Queste concrezioni, nella Provincia di Venezia, prendono il nome di "Caranto" e si identificano come un livello limo-argilloso, notevolmente sovraconsolidato, posto ad una profondità che varia tra 60-120 cm. Questo livello, poiché si mise in posto al di sopra dei depositi

LGM, viene considerato come un marker stratigrafico del limite Pleistocene – Olocene. Nella parte sommitale della colonna stratigrafica, soprattutto nella Provincia veneziana, si trovano i materiali di riporto utilizzati per le bonifiche moderne. In questo territorio l'attività dell'uomo iniziò ad avere una certa importanza da 7.500 anni fa ma solo durante la Repubblica di Venezia si cominciò a modificare l'idrografia superficiale per favorire lo sfruttamento del territorio. La deviazione e la conseguente modifica dei tracciati fluviali comportò, dal XVIII secolo, un'eliminazione della sedimentazione in laguna e l'arrestamento della sua aggradazione. Un discorso a parte meritano le casse di colmata della zona di Porto Marghera, dove nel XX secolo vennero accumulati artificialmente dai 3 ai 5 m di depositi per rendere edificabile la laguna.

#### **4.3.1 Inquadramento geologico generale**

Come si è visto nel capitolo precedente, durante il Last Glacial Maximum vi è stata una forte deposizione in tutta la pianura padana, anche con spessori di circa 25 m. I depositi che si andarono a depositare furono una successione di sabbie, limi e argille; in particolare, nella zona di Porto Marghera e di Mestre a tale alternanza è stata attribuito il nome di Unità di Mestre. Questa unità, di età pleistocenica e appartenente alla parte distale del megafan del Brenta, è ricoperta, nei pressi di Marghera, da depositi di origine antropica costituiti da materiale eterogeneo, in prevalenza sabbioso-limoso, con abbondanti resti provenienti dal disfacimento di materiale da costruzione e archeologico (laterizi, malte) o da materiale di origine naturale (depositi lagunari e ghiaie alluvionali). In questa unità sono compresi anche i terrapieni e le casse dal colmata. Lo spessore medio dei depositi antropici rinvenuti nell'area portuale è di 4-5 m ma può raggiungere anche punte di 9 m. I massimi spessori del riporto sono distribuiti nell'area centrale e meridionale del Sito di Interesse Nazionale (SIN) mentre gli spessori ridotti risultano a Nord-Est e ad Est. Secondo il modello geologico redatto dal

Master Plan per la bonifica dei siti inquinati di Porto Marghera, l'Unità di Mestre può essere schematizzata così come segue (Fig.4.10):

- Un primo livello impermeabile, costituito dalla sequenza barena/caranto e da altri sedimenti di granulometria fine (argilla e limi);
  - Barena: tale livello è costituito da limi argillosi e argille limose di colore scuro con frequenti inclusioni di vegetali o livelli di torba;
  - Caranto: costituito da un'argilla limosa nocciola molto compatta (sovracconsolidata), con inclusioni di noduli calcarei e screziature ocracee. Tale livello non è sempre continuo e le interruzioni nell'estensione areale sono interpretabili in termini di variazioni delle caratteristiche geopedologiche del substrato alluvionale pleistocenico o a eventi di erosione localizzata del caranto.
- Un primo livello sabbioso, composto da sabbie medio-fini limose e limi sabbiosi in eteropia con più o meno spessi e estesi livelli di argille e limi argillosi. Questo complesso coincide con la prima falda acquifera e ha uno spessore medio di circa 5,4 m;
- Il letto del primo livello sabbioso è rappresentato da un secondo livello impermeabile con uno spessore che va da un minimo di 0,45 m fino al massimo di 1,28 m. Il tetto di questo acquiclude è ad una quota media di -10,5 m s.l.m. I pochi sondaggi che hanno raggiunto queste argille hanno fatto emergere la presenza di questo livello in tutte le aree indagate del polo industriale di Porto Marghera anche se la continuità laterale non sempre è garantita, permettendo la connessione tra il primo livello sabbioso e quello sottostante;
- L'ultimo livello della classificazione litostratigrafica elaborata sulla base delle informazioni contenute nel Master Plan riguarda un secondo orizzonte sabbioso. Tuttavia le informazioni attualmente disponibili non permettono una conoscenza dettagliata sui spessori e sulle quote del tetto del secondo acquifero.



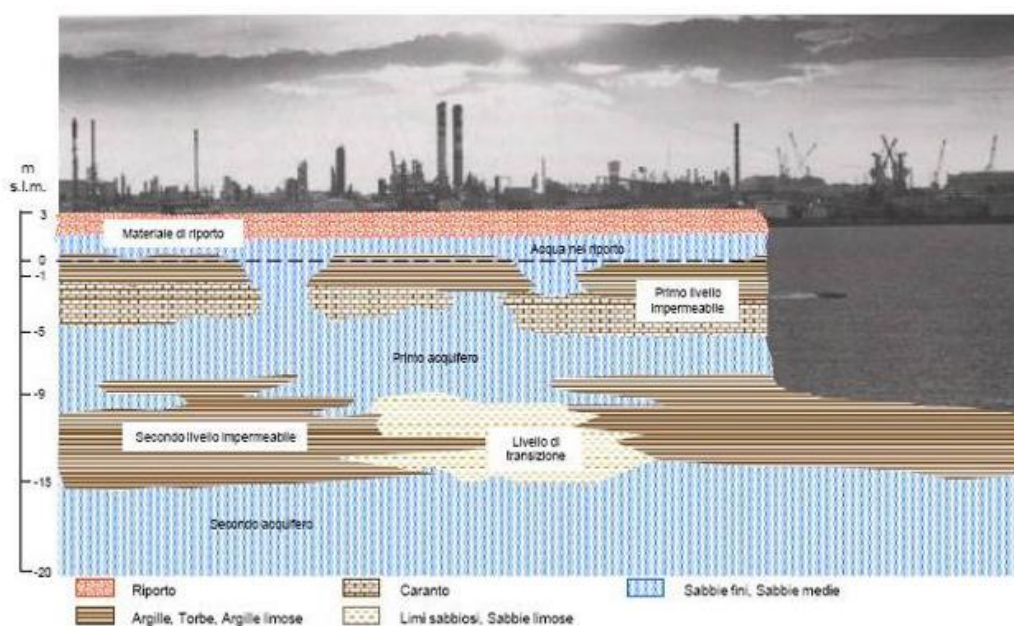


Fig.4.10: Modello idrogeologico di Porto Marghera.

Grazie all'indagine idrogeologica sull'area di Porto Marghera, effettuata nell'anno 2009 da enti come il Comune di Venezia, l'ARPAV e il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, possiamo avere un quadro geologico molto più completo attraverso la visualizzazione delle carte di distribuzione delle varie litologie. L'acquisizione di informazioni di dettaglio sulla stratigrafia e l'assetto geologico del sito risulta fondamentale al fine di raffinare il modello concettuale preliminare ipotizzato presso il sito, che dovrà poi essere confermato o meno mediante le indagini di dettaglio previste dal Piano di Investigazione (Par.4.6).

### Carta di distribuzione del riporto

Per avere questo tipo di informazione, gli enti sopra citati, hanno utilizzato una serie di sondaggi ubicati all'interno del Sito di Interesse Nazionale (Fig.4.11).

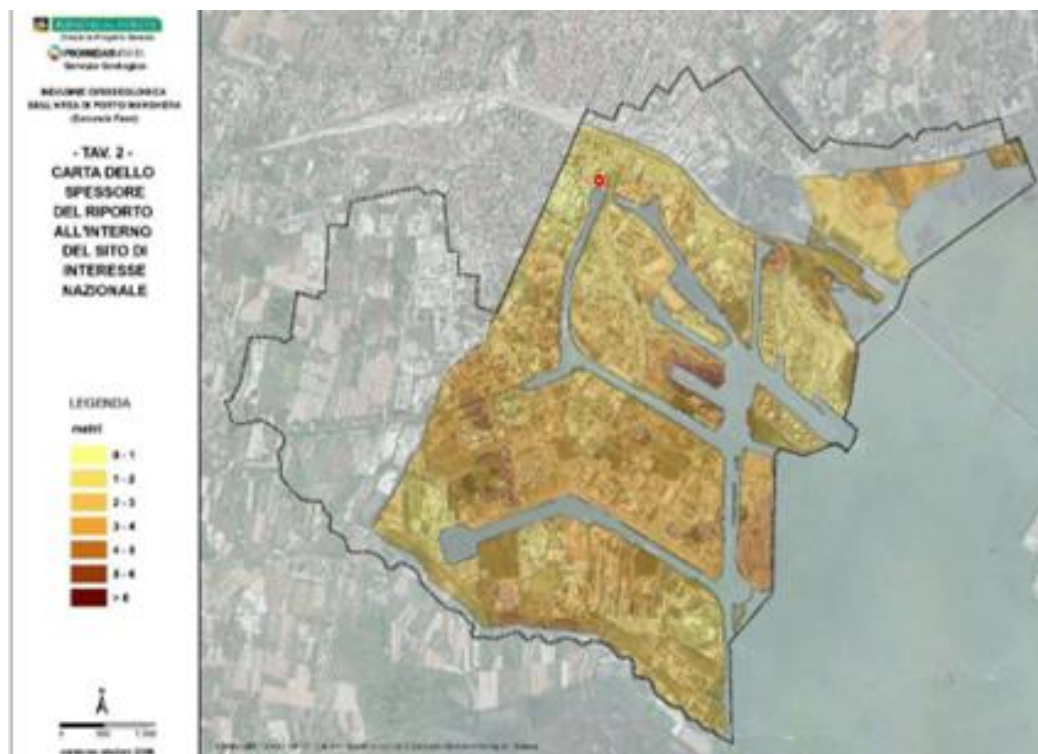


Fig.4.11: Carta di distribuzione del riporto.

Dalla lettura della carta di distribuzione si può notare che il riporto ha spessori massimi nella zona centrale e meridionali dell'area industriale, mentre gli spessori minimi risultano essere a Nord-Est e ad Est.

**Nella zona oggetto della seguente tesi, evidenziata in rosso, si può evincere che lo spessore del riporto dovrebbe essere tra 0 m e 2 m.**

**In base alla quota del piano campagna dei sondaggi eseguiti (Tab.4.1), il letto di questa litologia dovrebbe stare ad una quota che assume valori tra + 2,694 m s.l.m. e + 0,451 m s.l.m.**

**I valori dello spessore e della quota del letto del riporto sono stati confermati**

**attraverso i sondaggi effettuati durante gli interventi di messa in sicurezza d'emergenza (Par.4.4.1).**

### **Carta di distribuzione del caranto**

Questa litologia, come si è visto in precedenza, non è presente con una certa continuità laterale bensì fenomeni di erosione localizzata e variazioni delle caratteristiche geopedologiche ne hanno comportato l'assenza in alcune zone nell'area di interesse, rendendo possibile la migrazione del contaminante, attraverso fenomeni advettivi o diffusivi, in altre parti del sito. In base alla carta di distribuzione (Fig.4.12), tratta da "*Indagine idrogeologica sull'area di Porto Marghera*" e ottenuta con un metodo di interpolazione, si può notare che il tetto del suolo pleistocenico si approfondisce a partire dal settore nord-occidentale verso il settore sud-orientale.

**Inoltre è possibile osservare come nella zona interessata il tetto del caranto si trovi ad una quota compresa tra +0 e +1 m s.l.m. Questo intervallo, tramite l'analisi delle stratigrafie ottenute mediante l'esecuzione di alcuni sondaggi durante le operazioni di MISE, è stato parzialmente confermato, poiché in campagna il tetto è stato rilevato tra +0,194 m s.l.m. e +1,702 m s.l.m. Come si vedrà nel Par.4.4.1 solamente in alcuni sondaggi è stata riscontrata la presenza di questo livello, confermando l'ipotesi secondo cui il caranto non sia continuo all'interno dell'area oggetto di studio.**

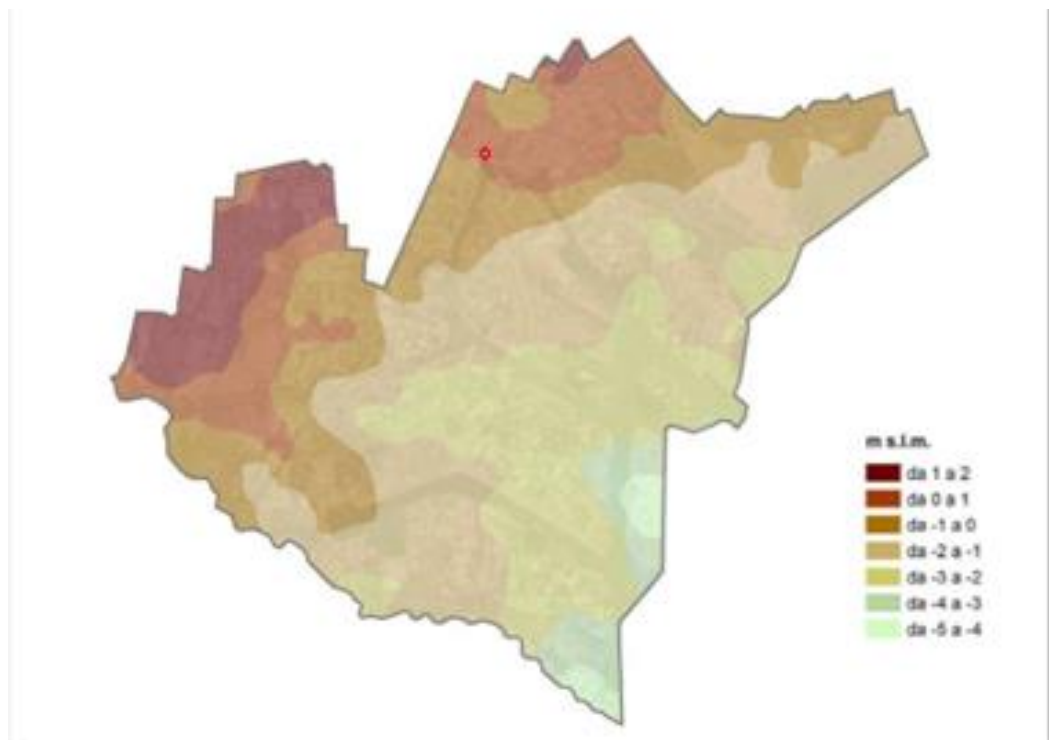
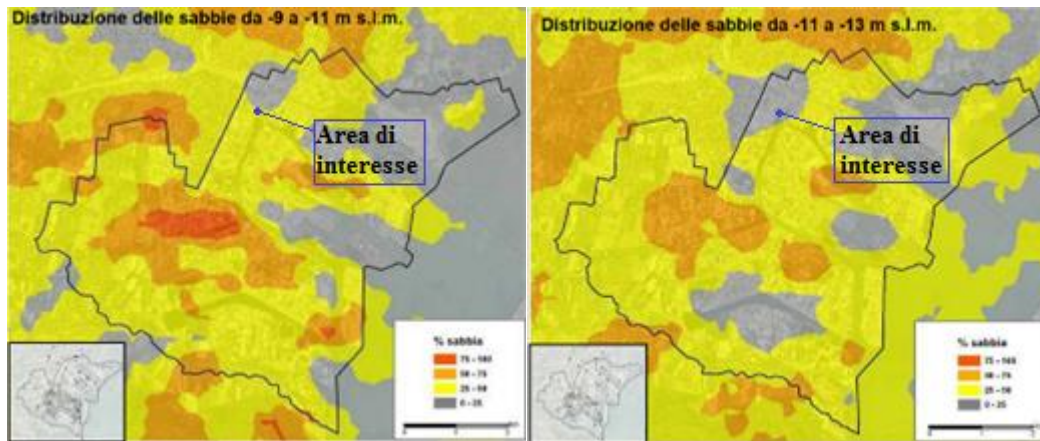
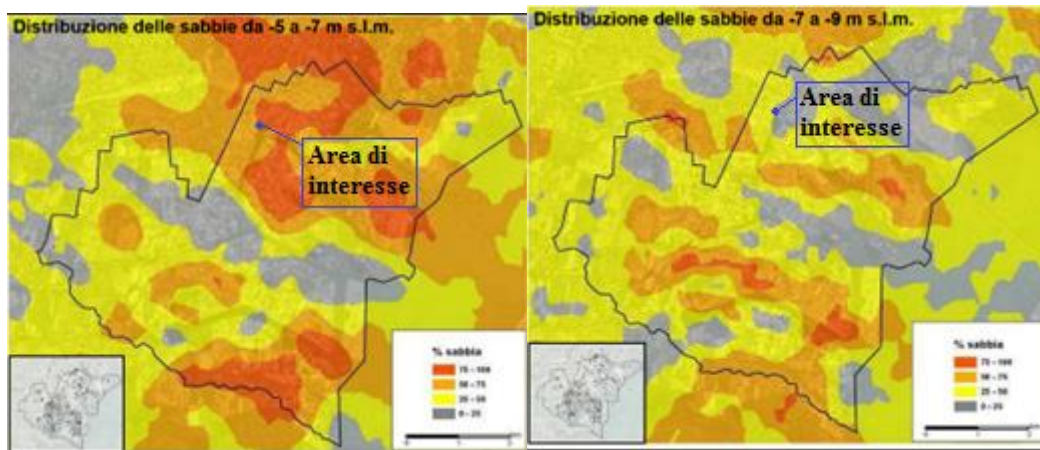
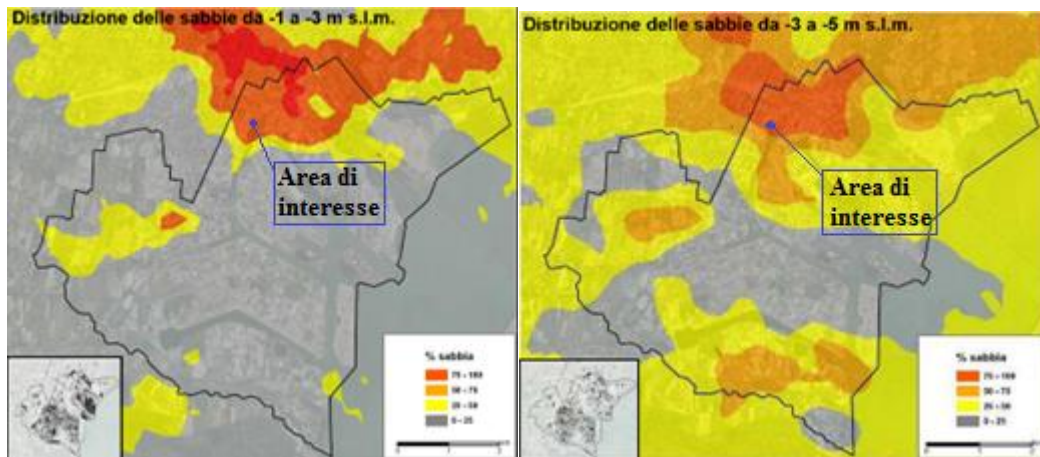


Fig.4.12: Quota del tetto del caranto, espressa in m s.l.m.

### **Carta di distribuzione delle sabbie**

Per questa litologia, nella relazione “*Indagine idrogeologica sull'area di Porto Marghera*”, viene rappresentata la distribuzione delle sabbie per definiti intervalli di profondità, in modo tale da determinare la presenza di corpi sabbiosi e la loro evoluzione spaziale e temporale; inoltre, nel seguente capitolo si è deciso di dare molta importanza a questa litologia al fine di acquisire tutte le informazioni necessarie per determinare quali siano le tecniche migliori per il ripristino ambientale del sito, come profondità del primo acquifero ed eventuali connessioni tra i vari corpi sabbiosi.

Le mappe sono state realizzate per le sabbie distribuite da una profondità di -1 a -21 m s.l.m. e sono riportate nelle pagine successive (Fig.4.13).



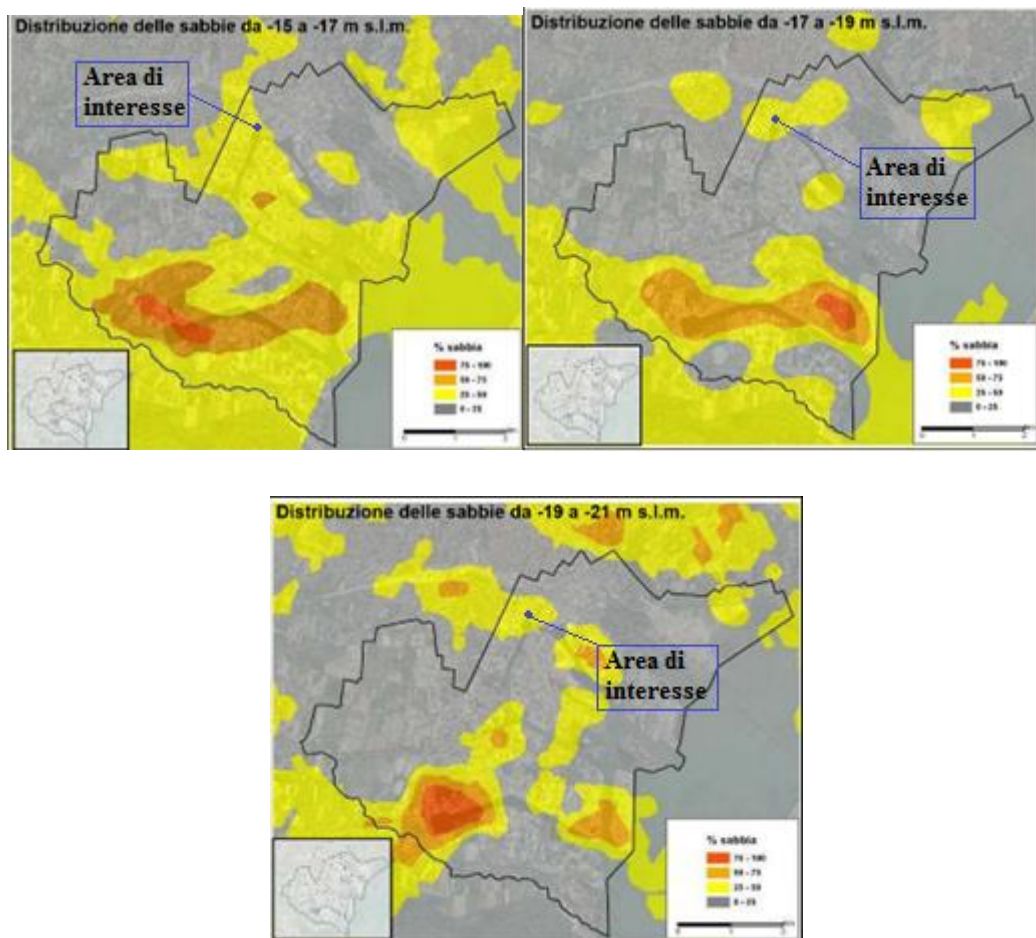


Fig.4.13: Carte di distribuzione dei corpi sabbiosi per le diverse profondità.

Attraverso l'analisi delle mappe di distribuzione della sabbia si può evidenziare come nei primi 3 metri al di sotto del livello del mare le sabbie interessino solo la porzione più settentrionale del sito, mentre l'area circostante, ad eccezione di una modesta porzione ad ovest, risulta a basso contenuto sabbioso. Al di sotto dei 3 metri le sabbie iniziano a coinvolgere anche la parte meridionale e tra i -5 e i -7 m s.l.m. si evidenzia un netto aumento della presenza di sabbia con l'instaurarsi di due corpi sabbiosi, a nord e a sud, mentre la parte centrale risulta a basso contenuto sabbioso. Aumentando la profondità si ha la continuità del corpo sabbioso meridionale, lo spostamento verso sud del corpo settentrionale con un conseguente restringimento dell'area a basso contenuto sabbioso nella parte centrale e una diminuzione nel contenuto di sabbia nella parte più settentrionale.

Dalla profondità di -11 fino a -17 m s.l.m. si ha ancora l'esclusione delle sabbie nella parte settentrionale mentre si riscontrano le massime concentrazioni della litologia nella parte meridionale e la loro persistenza nelle zone più centrali. Dopo i - 17 m s.l.m. i corpi sabbiosi interessano solamente la parte meridionale mentre la sabbia nell'area restante è quasi assente tranne in alcune porzioni locali. Secondo quanto riportato nel documento “*Indagine idrogeologica sull'area di Porto Marghera*”, l'interpretazione dei dati è stata eseguita sulla base dell'analisi di 1700 stratigrafie, con profondità maggiore di 10 m, contenute nella banca dati del servizio Geologico Provinciale (Fig.4.14).

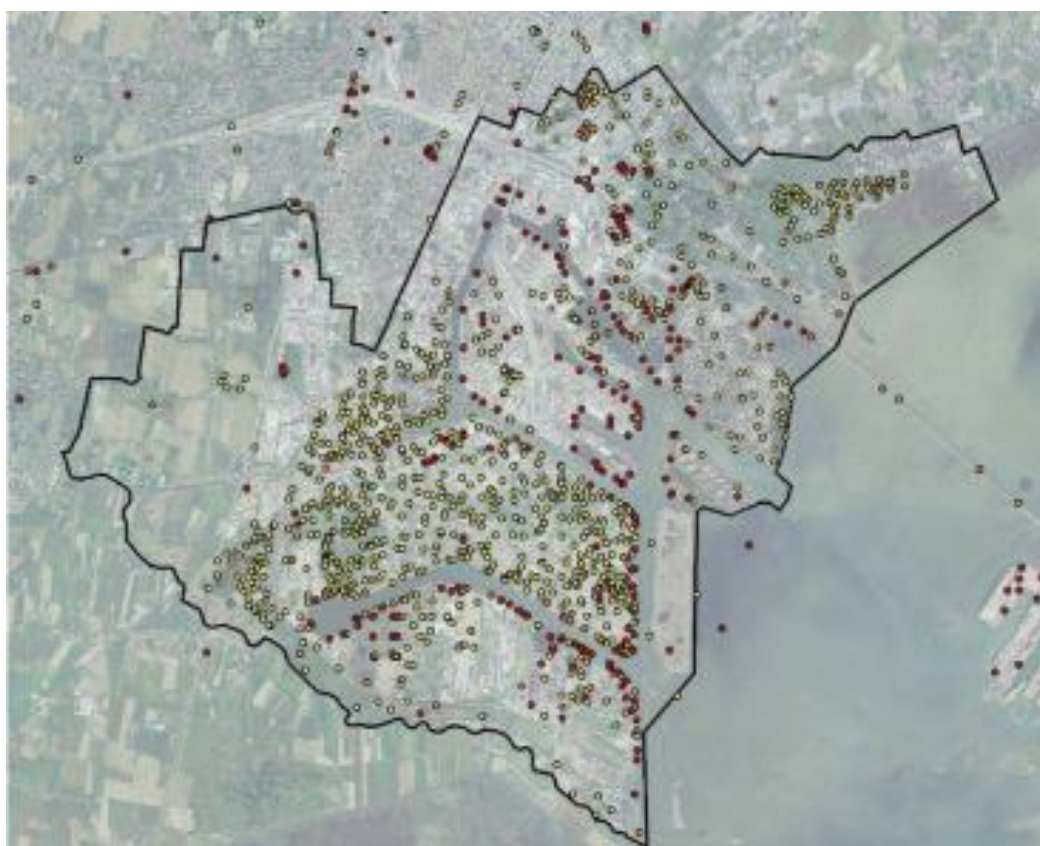


Fig.4.14: Ubicazione delle stratigrafie utilizzate per l'interpretazione dell'area.

L'analisi stratigrafica è stata realizzata mediante la costruzione di 10 profili di direzione N-S e 10 profili in direzione W-E disposti in maniera parallela e



ortogonale ai sistemi morfo-sedimentari conosciuti in bibliografia e in base alle zone di maggior importanza all'interno del SIN. L'area d'interesse, quindi, è stata coperta con una maglia di forma rettangolare, con asse maggiore, in direzione NNE- SSW, di lunghezza 7 km e asse minore di circa 6,5 km mentre tra i profili esiste una distanza media pari a 500 m (Fig.4.15).

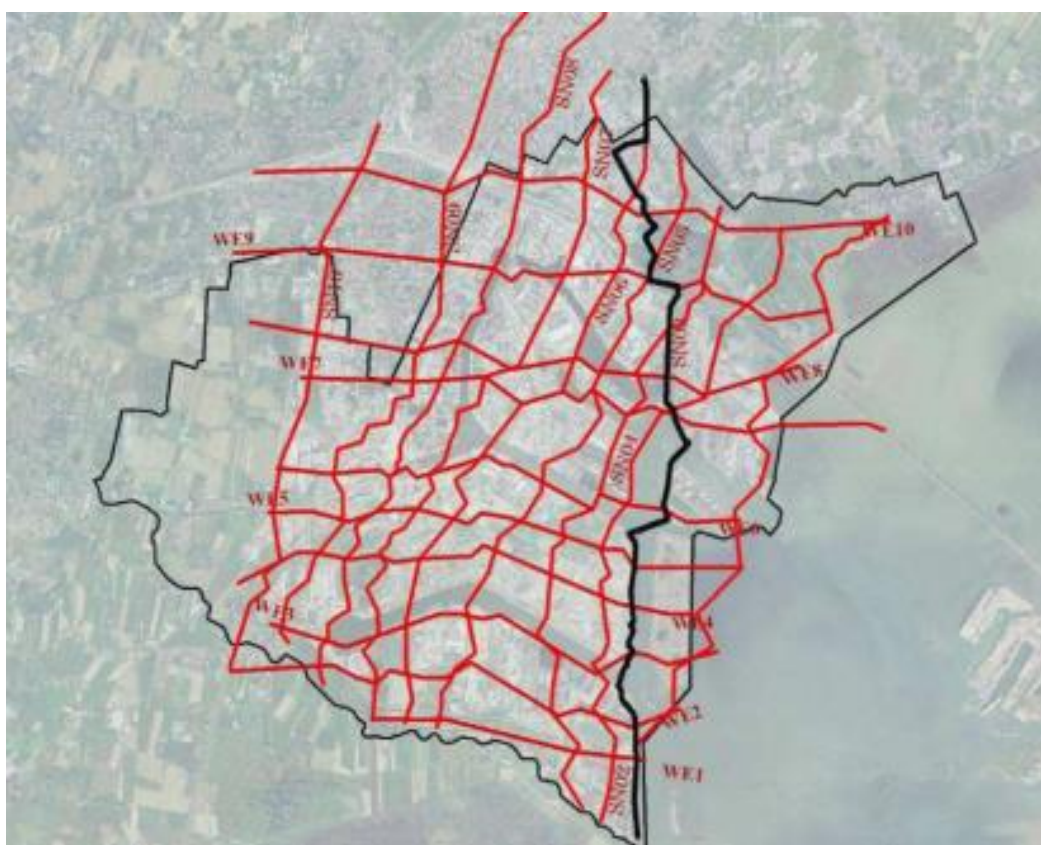


Fig.4.15: Ubicazione delle sezioni stratigrafiche utilizzate per l'interpretazione geologica.

Dall'elaborazione dei profili di direzione S-N si è potuto riconoscere quattro strutture morfo-sedimentarie principali a granulometria grossolana, caratterizzate da una successione continua di sabbie o sabbie limose di spessore di almeno 6 metri. I vari sistemi sono caratterizzati da una sedimentazione piuttosto grossolana con granulometrie che spaziano dai limi sabbiosi alle sabbie grossolane. Poiché non tutti i profili evidenziano la presenza dei corpi sabbiosi principali, si è scelto

di analizzare il profilo SN7, il quale risalta tutte e quattro le strutture sabbiose, incluse le loro estensioni (Fig.4.16).

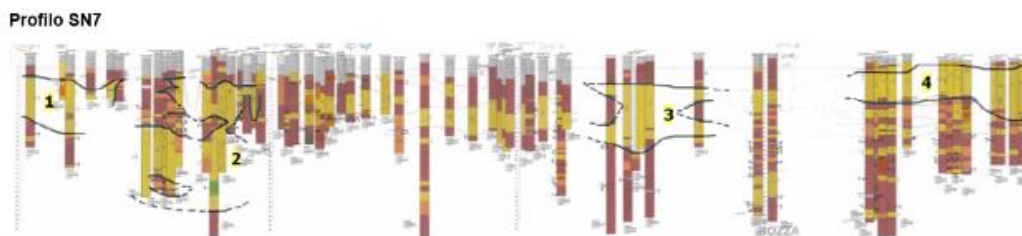


Fig.4.16: Distribuzione dei corpi principali in base all'analisi del profilo SN7

In base all'interpretazione delle stratigrafie che compongono il profili SN7 si sono identificati i seguenti 4 corpi sabbiosi principali:

- Corpo sabbioso di Fusina: corpo piuttosto tabulare con spessori massimi compresi tra -2 e -13 m s.l.m. e larghezza incerta poiché il limite sud non è definito. E' situato in corrispondenza del Naviglio Brenta;
- Corpo sabbioso del Malcontenta: sovrapposizione di diverse strutture sabbiose di larghezza pari a 800 m, con un tetto e un letto posti rispettivamente ad una profondità di -3 m s.l.m. e fra -10 e -30 m s.l.m. Spostandosi verso est tende a dividersi in due corpi distinti separato da un livello di sedimenti fini. Questa struttura è posizionata al di sotto della darsena Sud dell'area industriale;
- Corpo sabbioso dell'area portuale: è situato nel sottosuolo dell'area ferroviaria ed è largo circa 400 m, con uno spessore compreso fra -3 e -18 m s.l.m.;
- Corpo sabbioso di viale San Marco: corpo sabbioso tabulare di larghezza superiore a 1200 m e spessore 8/9 m, il tetto ha quote comprese tra +1 e 0 m s.l.m. mentre il letto, verso l'area dell'Osellino, raggiunge la quota di -13 m s.l.m. E' situato nell'area sud-orientale di Mestre.

I diversi corpi sabbiosi possono essere interrotti lateralmente da corpi minori a sedimentazione più fine o dalla presenza di torbe oppure possono mantenere una certa continuità, diminuendo però lo spessore. Per visualizzare la continuità tra le varie strutture si sono utilizzati i profili SN4 e SN5 (Fig.4.17).

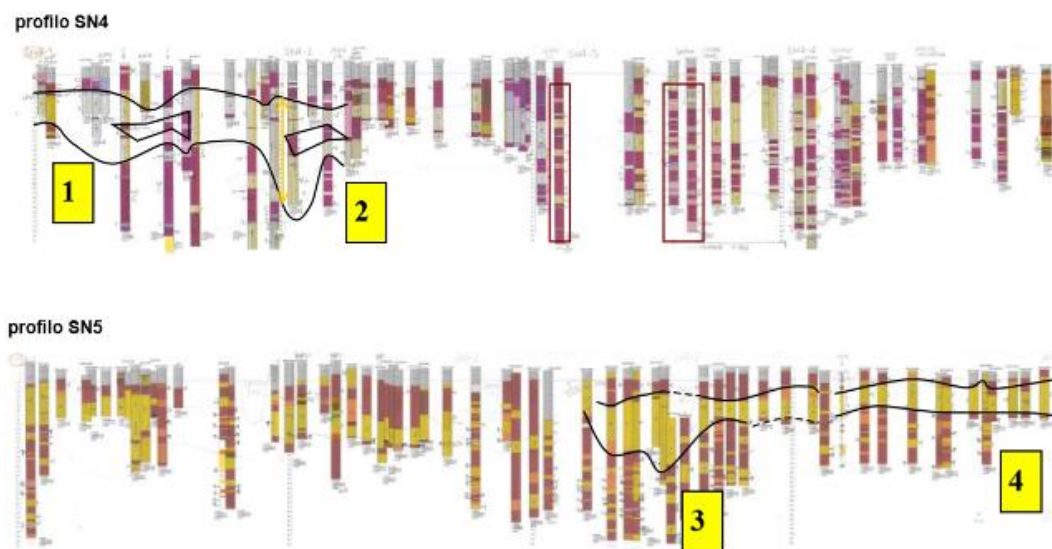


Fig.4.17: Continuità laterale dei corpi sabbiosi evidenziata tramite i profili SN4 e SN5.

Nel profilo SN4 si possono sottolineare i collegamenti esistenti fra i due corpi posti più a sud (Corpo di Fusina e Corpo di Malcontenta) che con la loro continuità verticale possono raggiungere spessori anche di 24 m mentre il secondo profilo rimarca il possibile collegamento tra il corpo tabulare di viale San Marco e il corpo dell'area portuale.

**Nell'area di interesse, come si può notare nelle diverse carte di distribuzione, le percentuali di sabbia sono alte (50-75 %) tra i -1 e -7 m s.l.m., diminuiscono progressivamente fino a -15 m s.l.m. per poi aumentare nuovamente raggiungendo una concentrazione del 50 % di sabbia fino a -21 m s.l.m. Questa evoluzione verticale permette di ipotizzare che nell'area interessata dallo sversamento esistano due falde acquifere: la prima, più superficiale, presenta il letto alla quota -7 m s.l.m., mentre il tetto**

dell'acquifero più profondo si riscontra a -15 m s.l.m. Nel Par.4.4.2 verrà dimostrato come le due falde acquifere siano in connessione tra loro, confermando il fatto che l'assetto idrogeologico della zona sia molto complesso ed eterogeneo. In base alla quota del piano campagna dei sondaggi eseguiti (Tab.4.1), il tetto di questa litologia nell'area di indagine è stato rilevato ad una quota tra +2,20 m s.l.m. e -0,50 m s.l.m.

### **4.3.2 Inquadramento idrogeologico generale**

Per quanto riguarda il modello idrogeologico per l'area di interesse si è nuovamente fatto riferimento a quanto riportato nel documento “*Indagine idrogeologica sull'area di Porto Marghera*”.

Per ottenere la carta del primo acquifero si sono utilizzati vari sondaggi ubicati all'interno del Sito di Interesse Nazionale (Fig.4.18) e per ogni sondaggio sono stati prelevati tutti gli strati di spessore maggiore o uguale a 2 m e con una permeabilità idraulica maggiore di  $10^{-5}$  m/s.



Fig.4.18: Ubicazione dei sondaggi all'interno del SIN.

La ricerca è stata effettuata fino ad una profondità massima di 15 m dal piano campagna e tutti quei strati privi delle caratteristiche sopra menzionate sono stati considerati privi di acquifero. I risultati ottenuti sono riportati nella Fig.4.19.

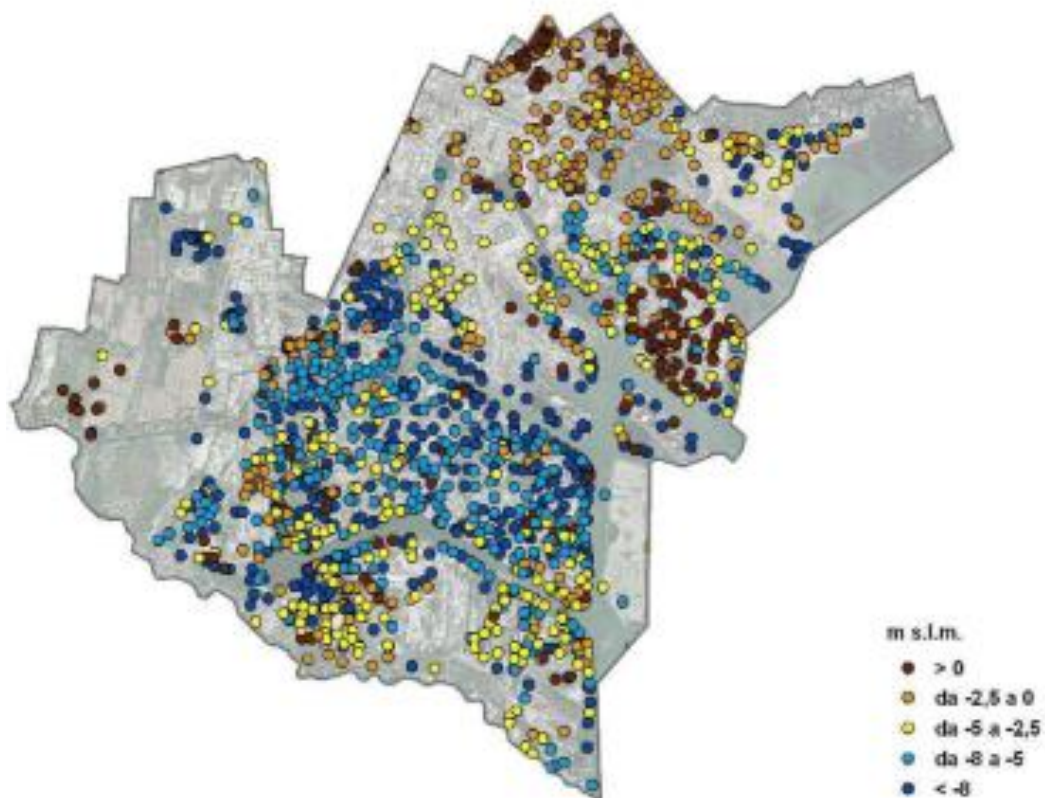


Fig.4.19: Visualizzazione della profondità del primo acquifero nei sondaggi considerati.

Dall'interpolazione di questi dati puntuali, attraverso un Kriging Ordinario, si è potuto, infine, creare la carta del tetto del primo acquifero (Fig.4.20).

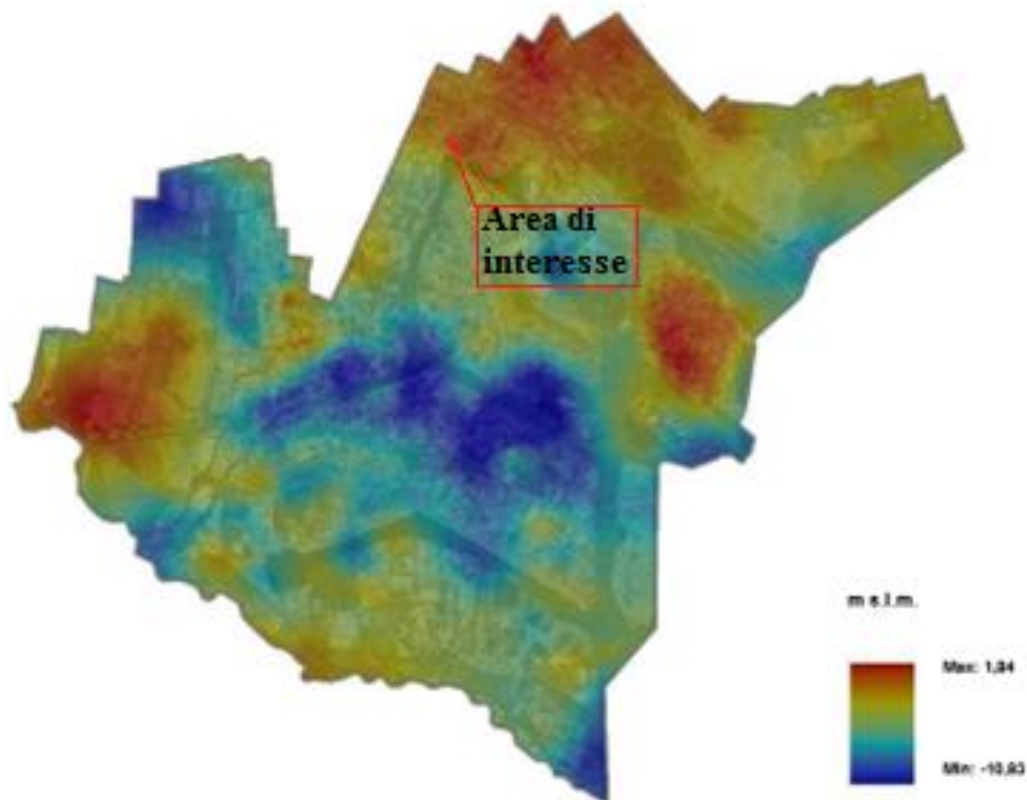


Fig.4.20: Carta del tetto del primo acquifero.

Dalla visualizzazione della carta sovrastante si può notare che la profondità del tetto del primo acquifero si trova a diverse profondità: risulta affiorante ad ovest e nella parte settentrionale (tale andamento concorda con la massima presenza di sabbie nei primi metri al di sotto del livello del mare a nord e ad ovest del sito), mentre nella porzione centrale sembra non ci sia un acquifero significativo prima di -8/-10 m s.l.m.

**Da questa carta di distribuzione si può evincere come nella zona oggetto di studio il tetto del primo acquifero sia pressoché superficiale. Tale ipotesi è stata confermata dalle perforazioni eseguite durante le attività di MISE che hanno rivelato dei valori della quota compresi nell'intervallo -0,50 m s.l.m. e +2,2 m s.l.m.**

Un ulteriore approfondimento contenuto nello studio “*Indagine idrogeologica sull'area di Porto Marghera*” riguarda il confronto tra la profondità del tetto del primo acquifero ed il grado di impermeabilità e continuità del livello di caranto sovrastante. Ciò è utile al fine di comprendere la vulnerabilità degli acquiferi all'interno del SIN, ed è stato utilizzato nella presente tesi al fine di estrarre alcune informazioni in particolare nella zona interessata dallo sversamento. Nello studio succitato coordinato dalla Provincia di Venezia sono stati calcolati per ogni sondaggio la profondità del tetto dell'acquifero (Fig.4.20) e il letto del riporto per l'intera zona (Fig.4.11), identificando così la profondità del tetto e del letto dell'intera “copertura”. Il passo successivo è stato quello di prendere tutti gli strati compresi tra il p.c. e il letto della copertura e ricavare per ognuno lo spessore e la permeabilità verticale equivalente (Fig.4.21).

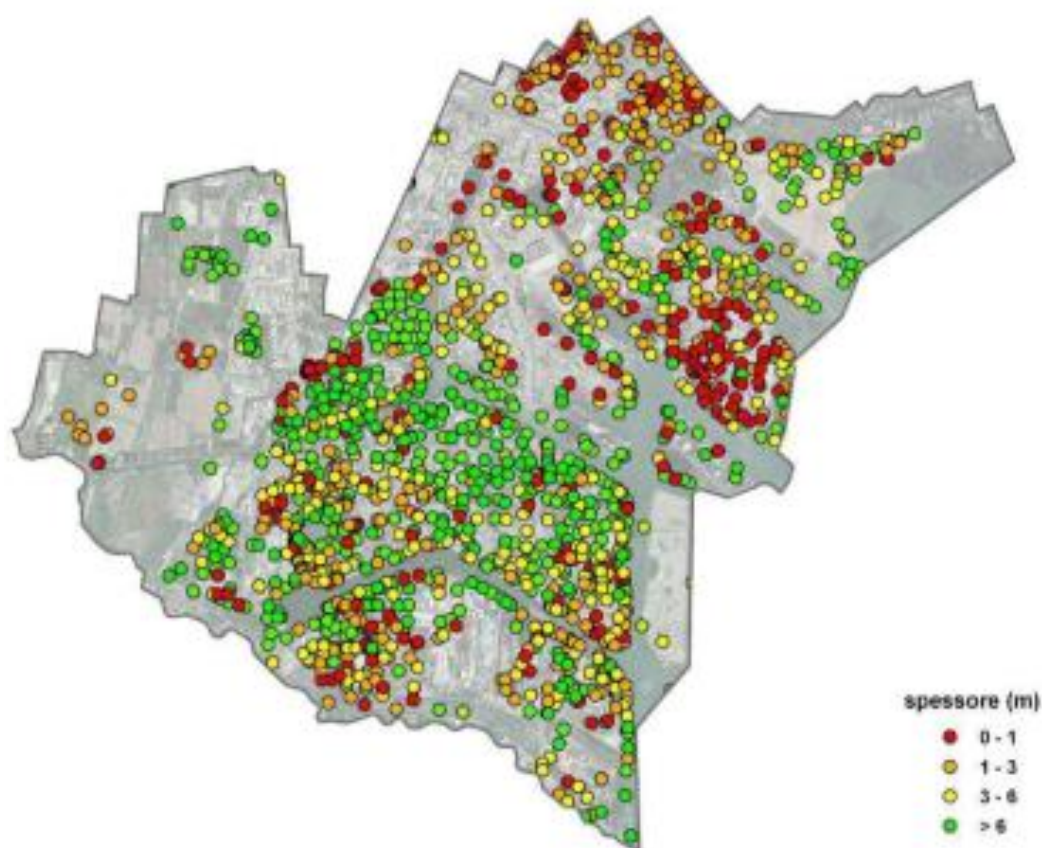


Fig.4.21: Carta dello spessore della copertura sovrastante il primo acquifero.



La permeabilità verticale equivalente è stata calcolata applicando tale formula:

$$k_{\text{equivalente}} = \frac{\sum L_i \text{ (da J:1 a i:1)}}{\sum L_i / K_i \text{ (da J:1 a i:1)}}$$

dove:  $L_i$  = spessore di ogni singolo strato

$K_i$  = permeabilità di ogni singolo strato

La permeabilità verticale equivalente mette in relazione la permeabilità di ogni singolo strato con il proprio spessore e i valori di questo parametro per i sondaggi effettuati nella zona sono riportati nella figura sottostante (Fig.4.22).

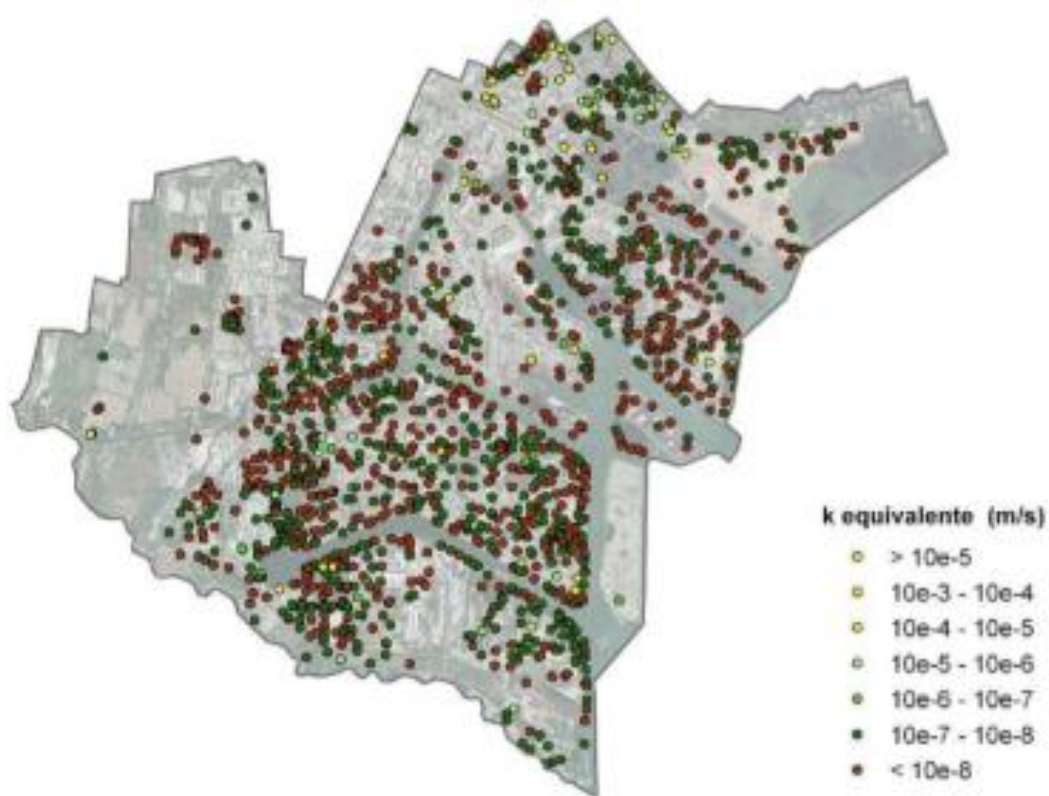


Fig.4.22: Permeabilità verticale equivalente del primo acquifero.

Come si può notare, la permeabilità verticale equivalente della copertura del primo acquifero è piuttosto bassa, ad esclusione della parte più settentrionale dove si ha l'affioramento delle sabbie. Questo parametro ha il difetto di essere troppo influenzato dalla presenza di strati a bassa permeabilità, anche se spessore ridotto, tanto da rendere a bassa permeabilità tutto il sondaggio. Per eliminare questo problema si è calcolato l'indice di copertura  $I_c$ , in modo tale da estendere il risultato a tutta l'area e non avere dei valori solamente puntuali. L'indice di copertura viene calcolato tramite la sommatoria del prodotto tra la permeabilità e lo spessore degli strati che compongono la copertura del primo acquifero e poi normalizzando il risultato a 100. All'inizio si sono trovati dei valori puntuali (Fig.4.23) che poi sono stati interpolati attraverso il metodo "Inverso della distanza" ottenendo una carta dove è riportato l'indice di copertura dell'intera zona (Fig.4.24).

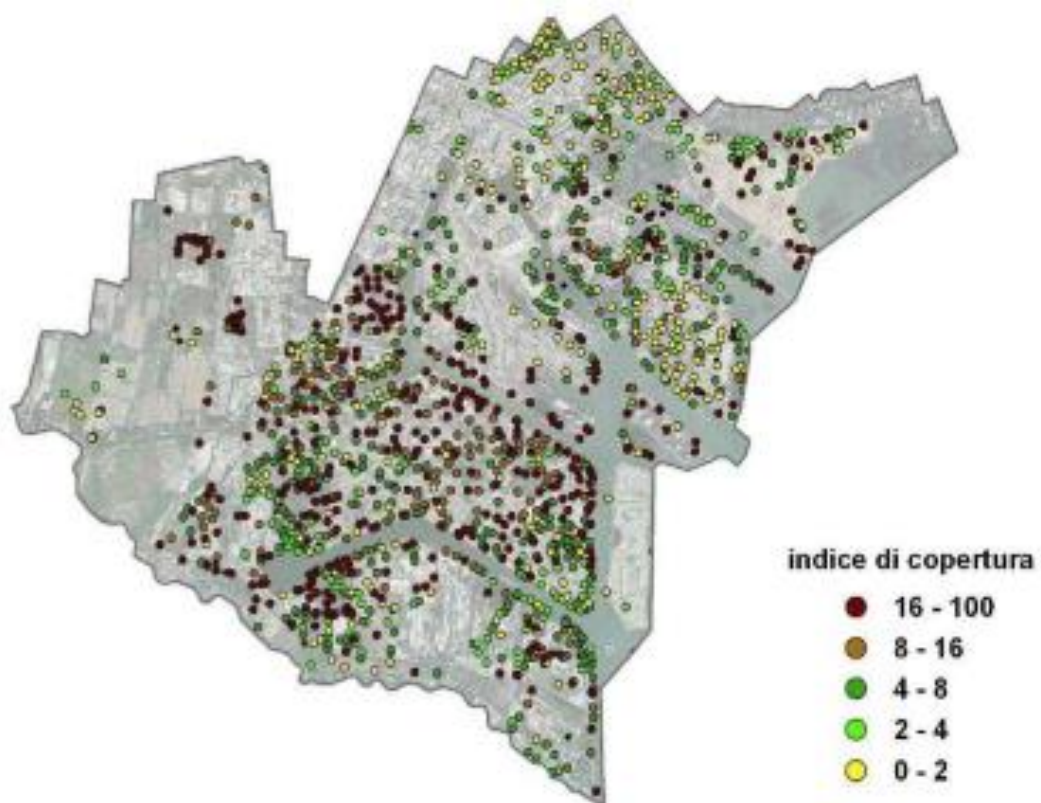


Fig.4.23: Valori puntuali dell'indice di copertura Ic.

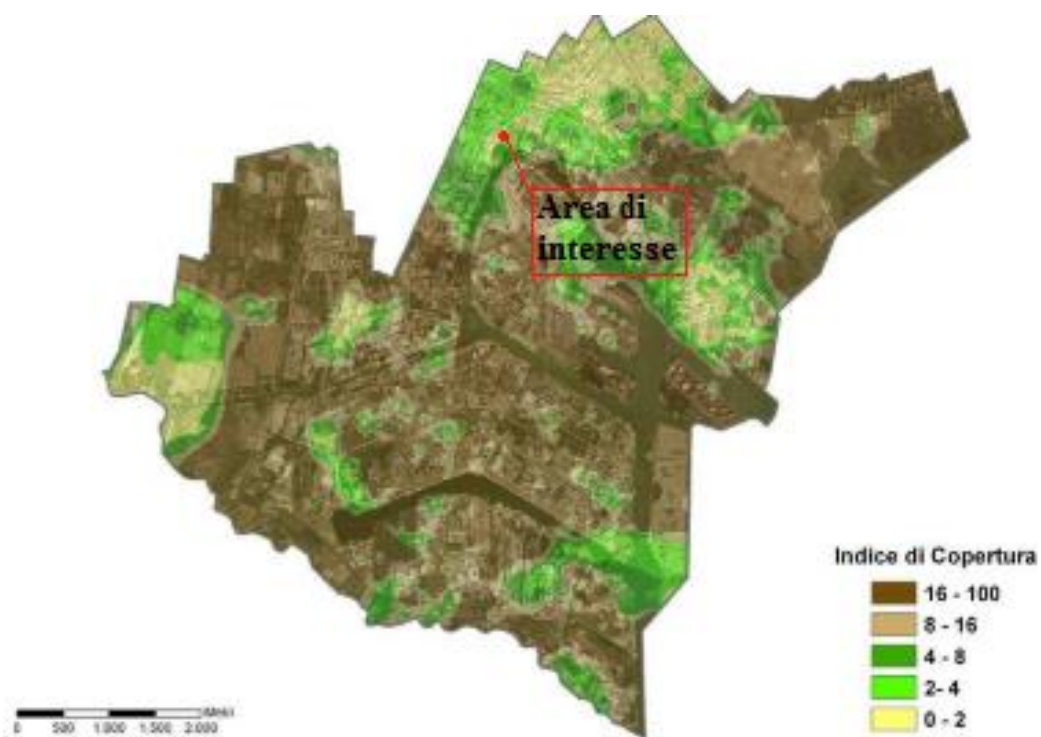


Fig.4.24: Indice di copertura interpolato per tutta l'area del SIN.

La carta dell'indice di copertura in Fig.4.24 evidenzia il fatto che la prima falda è più protetta (indice di copertura elevato) in tutta la parte centrale mentre lo è meno nella parte settentrionale e nella zona dell'estremo orientale.

**In base alla Fig.4.24 si può notare come nella zona d'interesse l'acquifero presenti un minore indice di copertura. Tale conclusione è concorde con il fatto che il tetto del primo acquifero in quest'area è quasi superficiale (Fig.4.20).**

### **4.3.3 Sintesi dell'inquadramento idro-geologico generale**

Attraverso le varie carte di distribuzione presentate nella pagine precedenti si può schematizzare il quadro geologico del Sito di Interesse Nazionale:

- l'area è interessata da spessori anche notevoli di riporto. Lo spessore varia da 0 m, nella parte occidentale e settentrionale, fino a raggiungere spessori maggiori di 6 m nell'area industriale. Il riporto può ospitare localmente un acquifero;
- si ha la presenza diffusa ma non costante del caranto. Lo spessore di questa litologia risulta ridotto dove si ha l'affioramento della sabbia dal piano campagna;
- al di sotto del piano campagna si sono individuati 4 corpi sabbiosi principali, in parte connessi idraulicamente tra di loro, caratterizzati da spessori continui fino a 10-20 m di sabbia. Le quattro strutture sono: Corpo sabbioso di Fusina, Corpo sabbioso di Malcontenta, Corpo sabbioso dell'area portuale e Corpo sabbioso di viale San Marco. Per le interconnessioni tra loro, i corpi sabbiosi possono essere ricondotti a due strutture, uno più a sud (Corpo sabbioso di Fusina e Corpo sabbioso di Malcontenta) e il secondo più a nord (Corpo sabbioso dell'area portuale e Corpo sabbioso di viale San Marco);

- il tetto del primo acquifero si colloca tra -10,83 m e +1,84 m s.l.m. e considerato che il piano campagna varia da +0,5 m e +4,0 m s.l.m. il tetto dell'acquifero si trova tra 2 m e 15 m dalla superficie.

Il primo acquifero risulta, quindi, praticamente affiorante nella parte a Nord e nell'estremo Ovest, mentre nel settore centrale si trova ad una profondità notevole (circa 15 m);

- il grado di protezione dell'acquifero più superficiale dipende dal grado di copertura e la permeabilità verticale equivalente risulta essere bassa un po' ovunque, ad eccezione dell'estremo nord ove le sabbie sono sub-affioranti.

#### **4.4 Inquadramento idro-geologico sito-specifico**

In base a quello che si può dedurre dalle Carte di distribuzione illustrate nel precedente capitolo, per il sito oggetto di studio, si può ipotizzare questo modello preliminare del sito:

- In base alla Carta di distribuzione del riporto (Fig.4.11), il riporto dovrebbe presentare uno spessore tra 1 m a 2 m e il letto dovrebbe essere riscontrato ad una quota che assume valori tra +2,694 m s.l.m. e +0,451 m s.l.m.;
- Il tetto del caranto dovrebbe essere ad una quota compresa tra +0 m e +1 m s.l.m (Fig.4.12).

Qualora questa litologia sia presente si dovrebbe riscontrare con uno spessore di pochi decimetri, nel caso il tetto delle sabbie sia più superficiale; mentre se le sabbie si riscontrano ad una profondità maggiore il caranto può arrivare ad uno spessore di un metro. E' molto importante ricordare che questo livello stratigrafico guida nell'area in esame spesso è assente;

- La distribuzione delle sabbie osservata nelle Carte di distribuzione dello studio succitato (Fig.4.13) suggerisce l'ipotesi che il sottosuolo, al di sotto dell'area in esame, sia interessato da due falde acquifere, molto

probabilmente collegate tra loro. Il letto della prima si attesta all'incirca ad una profondità di -7 m s.l.m. mentre il tetto dell'acquifero più profondo si dovrebbe riscontrare alla quota -15 m s.l.m.;

- Il tetto del primo acquifero dovrebbe essere pressoché superficiale (Fig.4.20). Questo è in accordo con lo spessore minimo riscontrato per il riporto;
- L'indice di copertura dovrebbe essere spesso tra gli 0 m e i 2 m (Fig.4.24). Questi valori sono concordi con quanto osservato per il sito nelle Carte di distribuzioni precedenti, le quali hanno evidenziato un basso spessore del riporto e come, sia il tetto del caranto sia il tetto del primo acquifero siano piuttosto superficiali.

In base al modello geologico generale di Porto Marghera e in base ai sondaggi effettuati durante gli interventi di Messa In Sicurezza d'Emergenza, si può avere un'idea più specifica della geologia e dell'idrogeologia che caratterizzano l'area oggetto di studio della presente tesi.

#### **4.4.1 Inquadramento geologico sito-specifico**

La conoscenza dei principali parametri della matrice sottosuolo (permeabilità, granulometria, porosità e densità) è importante al fine di raffinare il modello concettuale preliminare del sito, conoscere le modalità con cui può avvenire la migrazione delle varie fasi inquinanti attraverso la zona insatura e per definire la distribuzione tridimensionale della contaminazione; inoltre, qualora si renda necessario elaborare l'analisi di rischio la determinazione delle caratteristiche geologiche sito-specifiche diventa indispensabile.

In base ai sondaggi eseguiti all'interno dell'area oggetto di indagine si è potuto ricostruire in maniera più dettagliata la stratigrafia del sottosuolo indagato fino ad una profondità di -4,00 m dal piano campagna.

In seguito si riporta la posizione dei vari sondaggi (Fig.4.25 e Fig.4.26) sia della fase 1 e sia dell'indagine conoscitiva della fase 2 (Par 3.1.8 e Par.3.2.1).

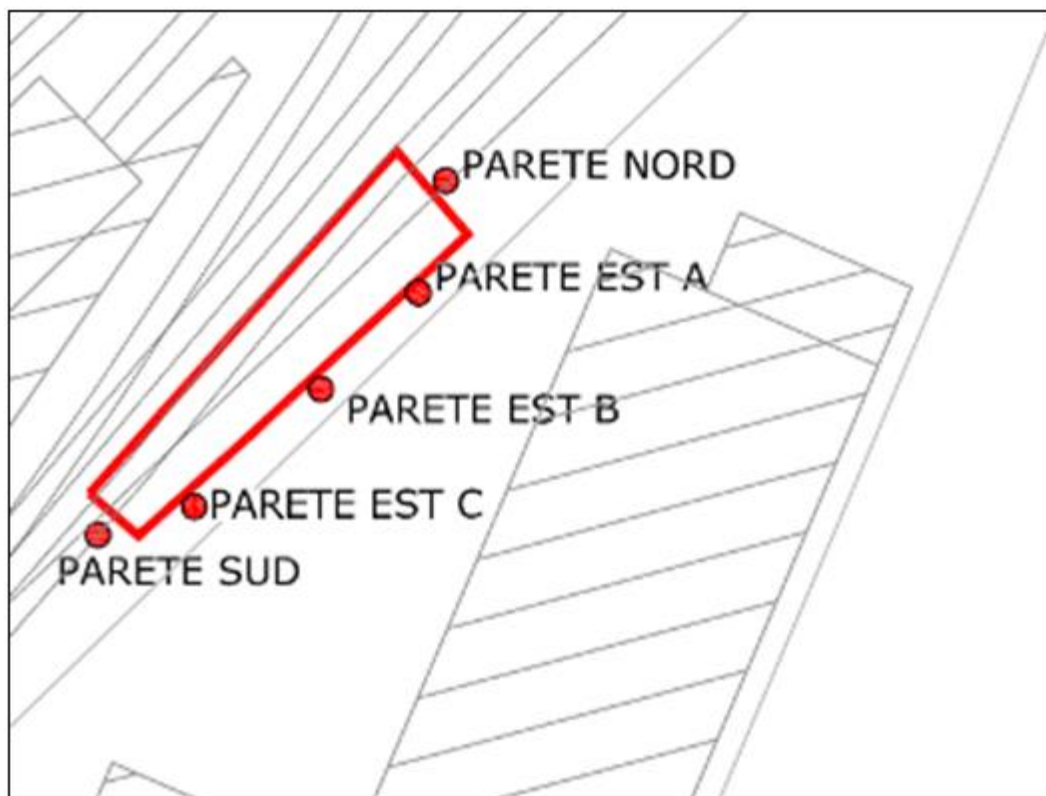


Fig.4.25: Posizione dei sondaggi lungo le pareti dello scavo della Fase 1.

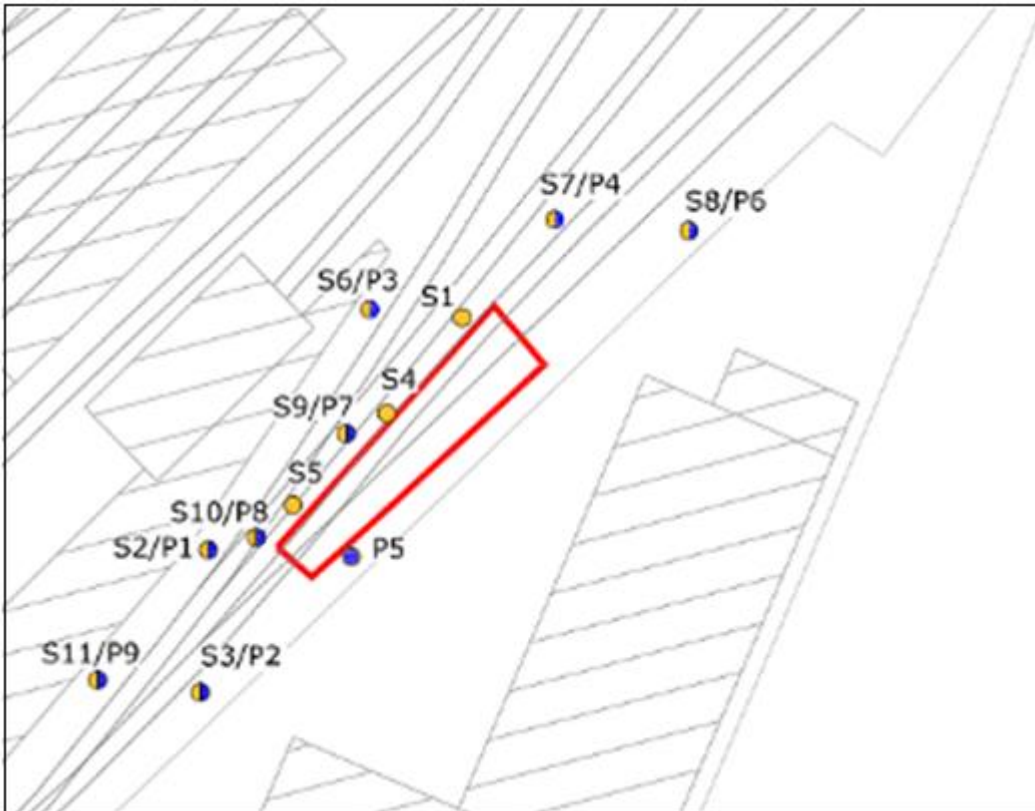


Fig.4.26: Posizione dei sondaggi eseguiti per l'indagine conoscitiva della fase 2.

Analizzando le 16 stratigrafie, riportate nell'All.1, possiamo ottenere alcune informazioni riguardo la geologia della zona investigata:

- Il primo materiale che si incontra nella carota è un terreno di riporto costituito da materiale di sottofondo della massicciata ferroviaria in una matrice spesso limo-argillosa di colore marrone (nocciola) o di colore grigio scuro. Lo spessore di tale strato è costante in tutti i sondaggi ed è mediamente di circa 0,4-0,5 m, tranne nel sondaggio della Parete Nord dove raggiunge uno spessore di 0,80 m;
- Successivamente, nella colonna stratigrafica, troviamo il riporto costituito principalmente da limi-argillosi (S1, S3, S4, S5, S6, S7, Parete Est B, Parete Est C, Parete Nord) e da limi-sabbiosi (S9, Parete Est A, Parete Sud) di colore che varia da nocciola a grigio-verde. Questo tipo di terreno,



anche se molto frequente, non sempre è presente; infatti nei sondaggi S2, S8 e S10 non ne viene riscontrata la presenza. Gli spessori massimi, ricavabili dai sondaggi, appartengono ai sondaggi: Parete Est B (1,5 m), Parete Est C (1,70 m), Parete Sud (1,20 m), S5 e S8 (1,1 m) mentre i valori minimi si riferiscono ai sondaggi S5 (0,5 m), Parete Est A e S1 (0,6 m). In base a questo si può ipotizzare che lo spessore del riporto sia massimo lungo la Parete Est e che vada ad assottigliarsi procedendo dalla Parete Sud verso la Parete Nord e dalla Parete Est verso la Parete Ovest;

- Al di sotto del riporto e prima dell'incontro con i corpi sabbiosi si trovano una serie di limi sabbiosi e limi argillosi. I limi argillosi trovati sono generalmente di colore nocciola con concrezioni calcaree e screziature ocracee e sono stati intercettati nei sondaggi S6, S7, S8, S10, S11, Parete Est A e Parete Est C. Lo spessore di questa litologia, che possiamo considerare come Caranto, è mediamente di 0,5 m (tranne nei sondaggi S6 e S8 dove lo spessore è di circa 1 m) e il tetto si approfondisce procedendo dalla Parete Ovest verso la Parete Est.

Nonostante il caranto non sia sempre presente, nella zona sono stati trovati frequentemente dei limi, contenenti percentuali variabili di sabbia, che ne aumentano il grado di copertura al di sopra dell'acquifero. Questa formazione può raggiungere anche spessori di oltre 3,5 m (S2) e di 2,6 m (S1). Nei restanti piezometri i limi sabbiosi raggiungono spessori che variano da pochi decimetri (0,3 m-0,5 m) fino a 2 metri (1,1 m, 1,70 m, 1,90 m).

I piezometri che al di sotto del riporto presentano subito le sabbie sono: Parete Est B, Parete Sud e S6;

- I corpi sabbiosi raggiunti dai sondaggi si presentano all'inizio debolmente limosi, di color nocciola, mentre procedendo in profondità la granulometria cambia diventando più grossolana e di colore grigio. Il tetto di questa formazione sembra si approfondisca procedendo da Nord-Ovest verso Sud-Est.

Dall'inquadramento geologico sito-specifico si può dedurre come i processi geomorfologici avvenuti durante la formazione della pianura padana abbiano reso il sito molto disomogeneo e anisotropo dal punto di vista geologico, determinando la formazione di strati in continua eterotopia tra loro e con caratteristiche geotecniche e idrogeologiche costantemente variabili nelle tre dimensioni. Questo particolare assetto geologico rende molto complicata la determinazione dei parametri principali della matrice sottosuolo richiesti per sviluppare il Modello Concettuale del sito e qualora si debba effettuare l'Analisi di Rischio.

#### **4.4.2 Inquadramento idrogeologico sito-specifico**

Al fine di determinare le modalità di migrazione, i fattori di trasporto e il comportamento degli inquinanti presenti nella falda sotterranea è importante la conoscenza delle caratteristiche piezometriche e dei principali parametri idrogeologici che caratterizzano il primo acquifero. Inoltre, la determinazione di dati sito-specifici, come direzione e gradiente del livello della falda, permeabilità idraulica della zona satura e trasmissività, sono indispensabili per avviare un'eventuale analisi di rischio e per selezionare una tecnica di bonifica applicabile nel sito.

Come si è visto nell'Inquadramento Generale (Par.4.3), la zona è caratterizzata da un'alternanza di terreni a diversa permeabilità: quelli con permeabilità bassa (limi-argillosi, argille), che formano gli acquicludi/acquitardi e orizzonti ad alta permeabilità (sabbie, sabbie limose).

Questa alternanza comporta la formazione di due acquiferi o “falde” principali, definendo il sistema multi-falda caratteristico della bassa pianura veneta. Attraverso i piezometri installati e in base alle stratigrafie conseguenti ai carotaggi si possono fare alcune considerazioni riguardo il primo acquifero:

- Caratteristiche piezometriche;
- Parametri idrogeologici;
- Influenza delle lavorazioni sui livelli piezometrici;
- Interazione tra il regime di marea e il regime piezometrico dell'acquifero;

#### **Caratteristiche piezometriche**

In seguito viene riportata la carta piezometrica della zona di Porto Marghera (Fig.4.27) tratta da “*Indagine idrogeologica sull'area di Porto Marghera*”.

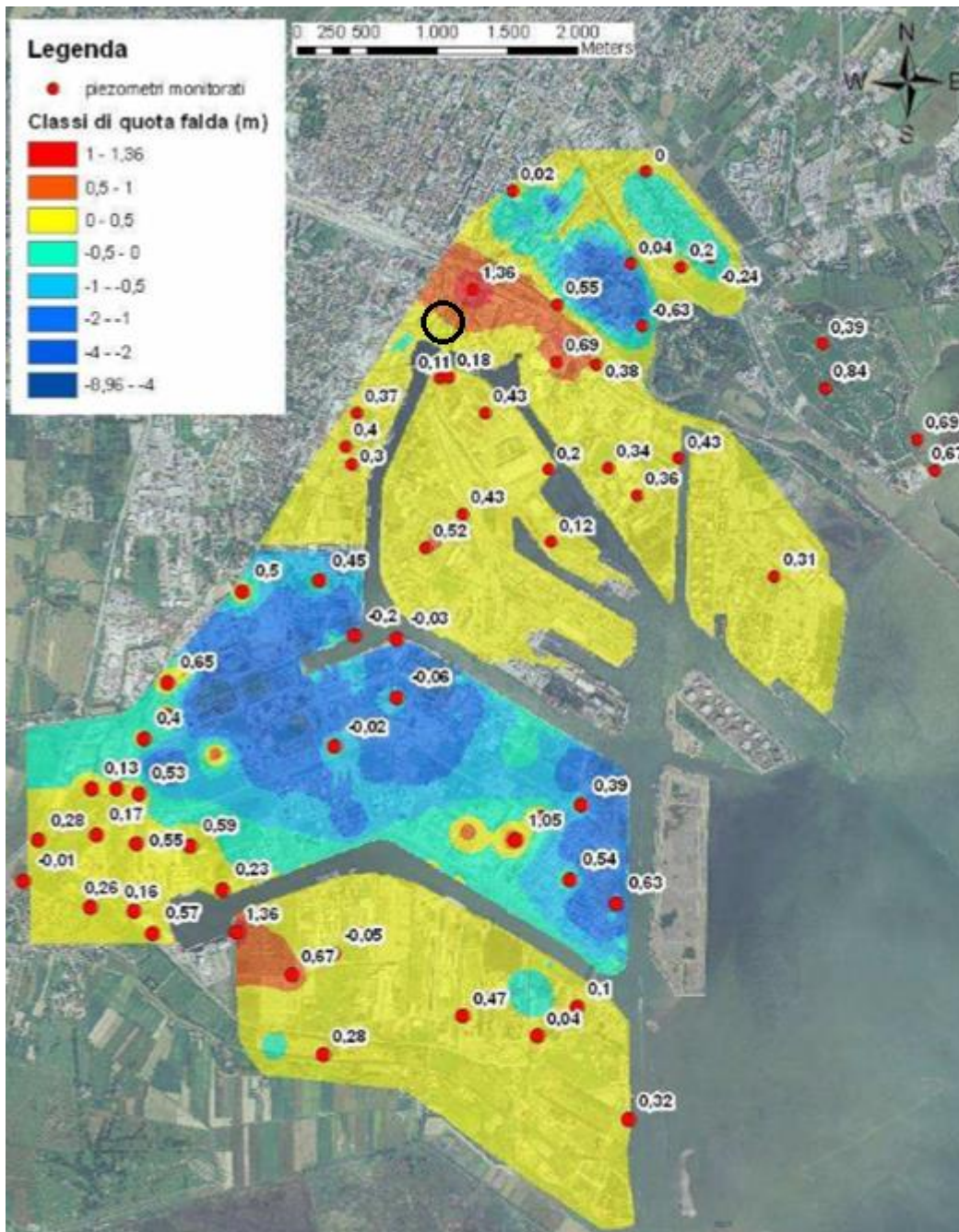


Fig.4.27: Carta piezometrica dell'Area di Porto Marghera. Nel cerchio nero è evidenziata la zona d'interesse.

Come si può vedere esiste un “alto” piezometrico appena a Nord della zona interessata, dove la falda raggiunge le quote massime di +1 - +1.36 m s.l.m., che coincide con l'alto morfologico visualizzabile nella carta del microrilievo (Fig.4.3). Dall'alto piezometrico la quota inizia a scendere fino al “basso” piezometrico lungo la zona del Canale Industriale Sud, verso la quale convergono le linee di flusso. Questa depressione potrebbe essere spiegata formulando l'ipotesi che si tratti di un possibile collegamento fra il primo acquifero e il secondo, più profondo.

L'andamento generale della superficie piezometrica è in direzione Est-Ovest immergente verso Ovest e il gradiente idraulico nell'Area si attesta al di sotto dello 0,1 %.

**Nella zona oggetto di studio il primo acquifero si incontra ad una quota, rispetto il livello del mare, che può assumere valori da +0 m a +1 m, come dimostrato dalla carta piezometrica soprastante.** Questa quota discosta leggermente da quella misurata durante i rilievi piezometrici (All.2) effettuati durante le operazioni di MISE, dove si riscontrano valori che rientrano nell'intervallo +1.168 m s.l.m. e +2,030 m s.l.m. Questa differenza può essere spiegata dal fatto che durante le campagne freaticometriche i livelli piezometrici della falda risentono del periodo di elevata piovosità ed inoltre gli interventi di marginamento dei canali hanno indotto un innalzamento generale dei livelli di falda superficiale.

### **Parametri idrogeologici**

I parametri idrogeologici che caratterizzano maggiormente un acquifero sono la permeabilità (K) e la trasmissività (T). La permeabilità è intesa come la capacità di un litotipo di farsi attraversare dall'acqua per effetto di un carico idraulico. Questa grandezza può assumere diversi valori a seconda del diametro dei granuli che vengono attraversati: per una ghiaia pulita la permeabilità varia da 1 a  $10^{-1}$  m/s; per le sabbie varia da  $10^{-2}$  a  $10^{-4}$  m/s; per i limi da  $10^{-5}$  a  $10^{-8}$  m/s e per le argille si va fino a permeabilità di  $10^{-11}$  m/s.

La trasmissività, invece, è il prodotto della permeabilità idraulica per lo spessore dell'acquifero considerato e pertanto può essere valutata come il volume d'acqua gravifica che passa attraverso una sezione di larghezza unitaria e di altezza pari allo spessore saturo dell'acquifero per effetto di un gradiente idraulico unitario e nell'unità di tempo (alla temperatura di 20°C).

**A causa della natura antropica del riporto, per quanto riguarda la zona d'interesse, si hanno dei valori di permeabilità piuttosto variabili tra  $10^{-8}$  m/s (per il riporto costituito da limi argillosi) e  $10^{-4}$  m/s (quando si tratta di sabbia limosa), mentre la trasmissività presenta un valore medio di  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s.**

**I limi sabbiosi che possiamo riscontrare al di sotto del riporto hanno una permeabilità idraulica tra  $10^{-6}$  e  $10^{-5}$  m/s mentre il caranto presenta una permeabilità  $\leq 10^{-8}$  m/s.**

**Le sabbie che immagazzinano il primo acquifero hanno una permeabilità tra  $10^{-5}$  m/s e  $10^{-4}$  m/s (per una sabbia debolmente limosa) e  $10^{-4}$  m/s e  $10^{-3}$  m/s per la sabbia medio-fine.**

#### **Influenza delle lavorazioni sui livelli piezometrici**

Per monitorare il problema dato dagli scavi e dagli impianti installati durante gli interventi di messa in sicurezza d'emergenza sono stati eseguiti dei rilievi piezometrici al fine di controllare la variazione della superficie piezometrica.

Complessivamente sono state effettuate le seguenti campagne di misura:

- in data 24/01/2014 e 29/01/2014, quando lo scavo della fase 1 era già ripristinato e le palancole non erano ancora state estratte;
- in data 14/02/2014, quando le palancole sono state estratte (ad eccezione della palanca ovest);
- in data 17/02/2014, mentre nel lato opposto della palanca risultava attivo lo scavo della fase 2;
- in data 22/02/2014 e 27/02/2014, dopo l'estrazione delle palancole e il ripristino dello scavo della fase 2;

- in data 31/03/2014 sono stati effettuati due rilievi: il primo subito dopo lo spegnimento dell'impianto Pump & Stock ed il secondo dopo circa 120 min.;
- nelle giornate del 4-11-17-24-29/04/2013 sono stati eseguiti i rilievi a fine ciclo e a fine pausa.

Si ricorda che l'impianto è stato attivato il giorno 18/02/2014 e il pompaggio interessava solo i piezometri P1, P2, P4 e P9; solo successivamente, in data 20/03/2014 il pompaggio è stato esteso ai piezometri P5, P6 e P8.

L'esecuzione dei rilievi piezometrici ha messo in luce delle differenze, sia negative che positive, della posizione del livello piezometrico della falda.

Le diverse tabelle sono state riportate nell'All.2.

In particolare l'andamento delle linee freatiche durante il giorno 17/02/2014 e 27/02/2014 è visualizzabile nelle figure sotto riportate (Fig.4.28 e Fig.4.29).

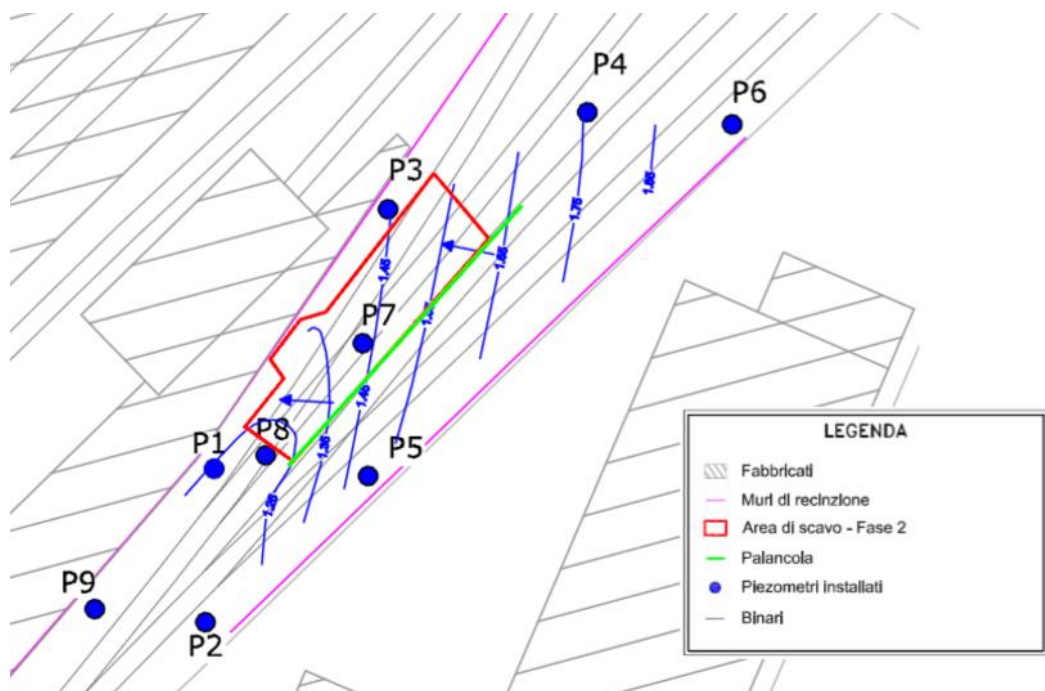


Fig.4.28: Superficie piezometrica rilevata in data 17/02/2014.

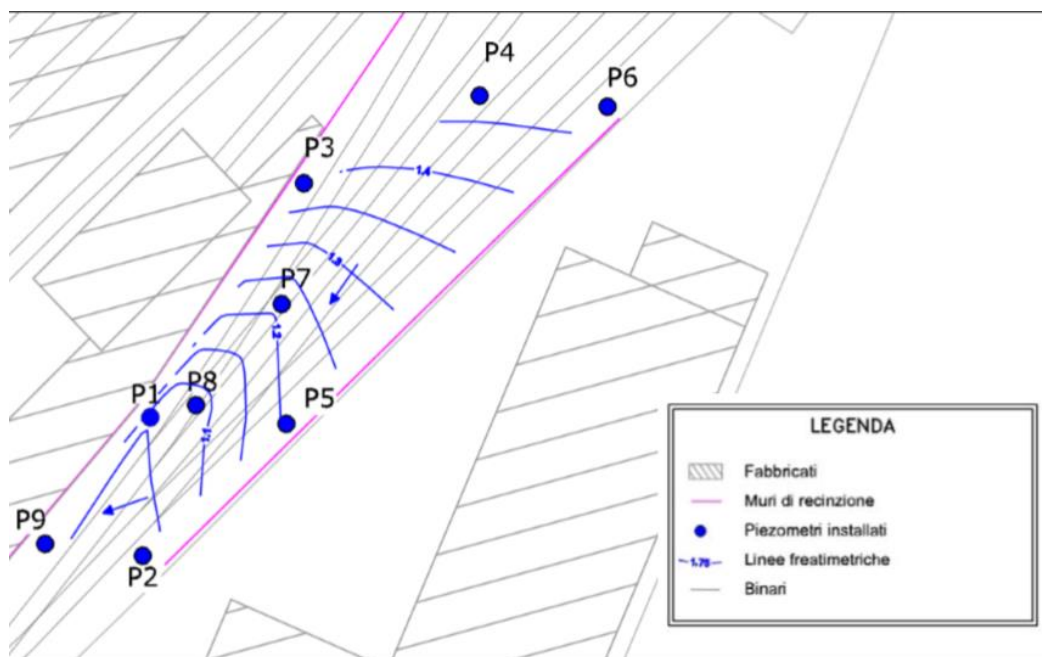


Fig.4.29: Superficie piezometrica rilevata in data 27/02/2014.

La differenza tra la superficie piezometrica nei due casi è data molto probabilmente dal fatto che nel giorno 17/02 lo scavo opposto alla palancola era ancora attivo, determinando una differenza di quota piezometrica e una conseguente variazione nella rete di flusso.

Dopo l'attivazione dell'impianto Pump & Stock si ha nuovamente un cambiamento delle linee freatiche, dovute al fatto che per estrarre il prodotto surnatante dai piezometri, il collettore di aspirazione crea un cono di depressione richiamando a sé l'acqua e il prodotto in questione (Fig.4.30).



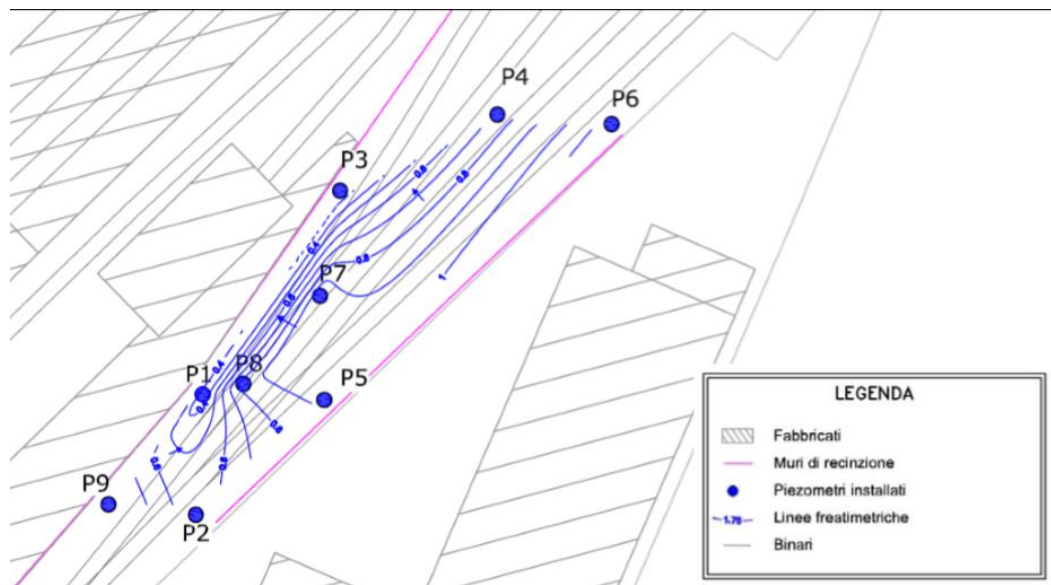


Fig.4.30: Superficie piezometrica rilevata il giorno 31/03/2014.

L'andamento generale della superficie piezometrica evidenzia un deflusso verso sud est.

**Interazione tra regime di marea e regime piezometrico dell'acquifero**

Un ulteriore fenomeno che rende complessa la determinazione dell'andamento generale della superficie piezometrica della falda e del gradiente idraulico dell'area, è la marea.

La variazione della superficie piezometrica della tavola d'acqua è da imputarsi, come viene espresso nell'“Indagine idrogeologica sull'area di Porto Marghera”, ad una variazione della pressione collegata all'innalzamento dei livelli marini anziché essere causata dall'aumento dei livelli idrici dei canali dovuto al flusso di acqua entrante. E' legato, dunque, all'onda di pressione trasmessa a profondità maggiore dei marginamenti presenti nella zona.

Quando il regime piezometrico è influenzato in maniera decisiva dal regime di marea si nota che ad ogni picco relativo di marea corrisponde un picco del regime piezometrico, anche se con un certo ritardo (Fig.4.31).

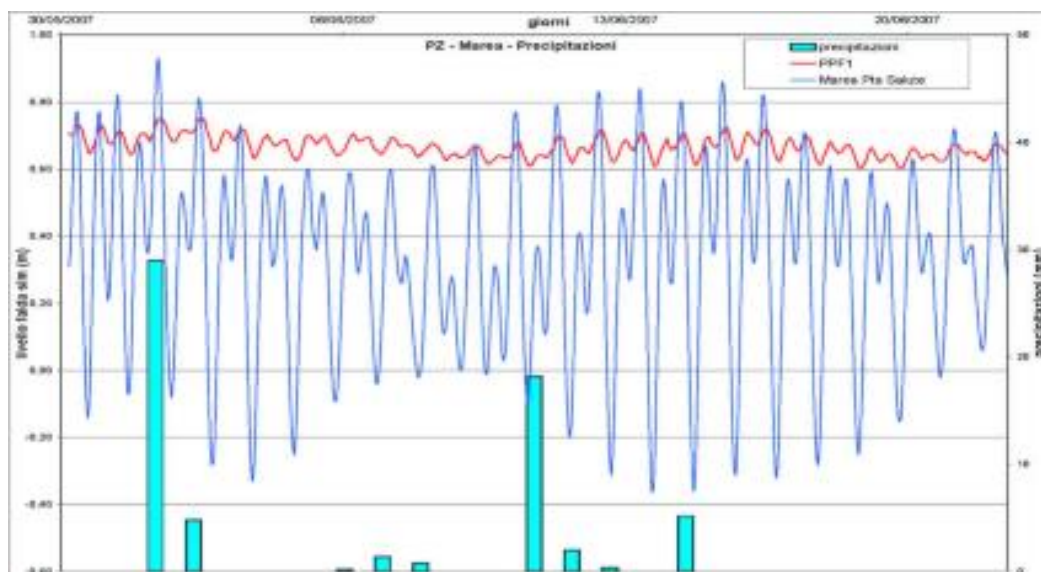


Fig.4.31: Regime influenzato dalla marea.

Il ritardo può assumere valori molto diversi, da un minimo di 0 ore ad un massimo di 4 ore.

Il fatto di avere un ritardo nullo significa che il regime piezometrico è in fase con quello di marea mentre all'aumentare del ritardo aumenta lo sfasamento tra i due regimi, sino ad essere completamente “sfasati”. Secondo gli studi fatti dal gruppo di lavoro che hanno svolto l'indagine sull'area di Porto Marghera, sembrerebbe che la principale causa del ritardo sia legata alla collocazione dei piezometri all'interno dei corpi sabbiosi e dalla trasmissività della zona in cui si è costruito il piezometro, mentre sembra non sia collegato, a scala del Sito di Interesse Nazionale, alla distanza tra i piezometri e i canali industriali.

Per capire quanto la marea potesse influenzare i vari piezometri all'interno del SIN è stato svolto un confronto tra i vari regimi in tutti i piezometri con il tratto finestrato ad una quota di -10 m s.l.m.

Le conclusioni a cui è pervenuto lo studio sono le seguenti:

- i piezometri più profondi risentono della marea, con sfasamenti dello stesso ordine di grandezza dei piezometri meno profondi;

- i valori minimi di sfasamento sono stati registrati per piezometri posizionati all'interno dei corpi acquiferi, testimoniando il fatto che questi risentono della pressione esercitata tra l'entroterra e la laguna;
- i piezometri che non risentono di alcuna correlazione tra i due regimi sono quelli posizionati in zone dove la continuità spaziale dei corpi sabbiosi è limitata, cioè in zone dove la trasmissività è relativamente bassa, oppure dove è limitato o assente il collegamento con la laguna.

## 4.5 Modello concettuale preliminare del sito

Una volta definiti l'inquadramento geologico e idrogeologico della zona oggetto di studio, occorre elaborare il modello concettuale preliminare ipotizzando quali siano le sorgenti e le caratteristiche del contaminante, l'estensione della contaminazione nelle diverse matrici ambientali ed i possibili percorsi di migrazione dell'inquinante in relazione ai recettori. La ricostruzione del modello concettuale preliminare per quest'area risulta molto complessa a causa di molteplici fattori:

- il rinvenimento di una contaminazione pregressa non correlata allo sversamento di gasolio, dovuta alla presenza di rifiuti costituiti da ceneri di pirite, rappresenta un'ulteriore complicazione dal punto di vista non solo amministrativo, in quanto l'accumulo di rifiuti rappresenta un'ulteriore sorgente primaria che concorre alla contaminazione;
- la difficoltosa determinazione dell'estensione, delle caratteristiche e dello stato qualitativo della matrice sottosuolo, a causa dell'eterogeneità dell'assetto geologico del sito, dei continui rapporti eteropici che interessano gli strati e della discontinuità del caranto. Tali elementi rendono complessa sia l'individuazione delle possibili vie di migrazione degli inquinanti dalle fonti verso i potenziali recettori, sia la determinazione delle caratteristiche geologiche dell'area al fine di sviluppare il modello concettuale definitivo del sito e di condurre nel dettaglio l'analisi di rischio sito specifica;
- la difficoltosa determinazione dell'estensione della contaminazione nella matrice acque sotterranee, a causa dell'eterogenea evoluzione spaziale verticale ed orizzontale dei corpi sabbiosi presenti nel sottosuolo, dell'influenza delle lavorazioni sui livelli piezometrici della falda e della correlazione esistente tra quest'ultimi e la marea. Tutto questo rende complicata l'individuazione delle possibili vie di dispersione e migrazione degli inquinanti dalle fonti verso i potenziali recettori, nonché la determinazione delle caratteristiche idrogeologiche dell'area al fine di

sviluppare il modello concettuale definitivo del sito e di condurre nel dettaglio l'analisi di rischio sito specifica.

Un ulteriore aspetto alquanto rilevante da tenere in considerazione ai fini della pianificazione e dell'esecuzione di un piano di indagine di dettaglio finalizzato a sviluppare il Modello Concettuale definitivo del sito, è rappresentato dalle condizioni al contorno caratteristiche del sito ovvero la presenza di capannoni, di attività in esercizio, nonché la presenza di convogli ferroviari in transito.

### **Le sorgenti**

Le sorgenti dell'inquinamento si dividono in primarie e secondarie. Le prime costituiscono gli elementi che causano la contaminazione (es. accumulo di rifiuti); le secondarie sono tutte quelle matrici ambientali soggette alla contaminazione diretta che fungono da fattori di trasferimento di inquinanti verso altri siti. Nel caso di studio le sorgenti primarie sono rappresentate dal gasolio sversato dalla ferrocisterna e dai rifiuti, costituiti dai depositi di ceneri di pirite rinvenuti nel sottosuolo nel corso delle attività svolte nell'ambito della Messa in Sicurezza di Emergenza; diversamente, le matrici suolo superficiale, sottosuolo e acque sotterranee caratterizzate da concentrazioni eccedenti le CSC sono le sorgenti secondarie.

Per suolo superficiale si intende la porzione di suolo da 0 a -1 m dal piano campagna e per suolo profondo o sottosuolo si riferisce alla parte di suolo che va da -1 m fino alla tavola d'acqua.

### Contaminanti di interesse

La selezione dei parametri di interesse è avvenuta in base ai risultati delle analisi chimiche eseguite sui campioni prelevati durante le due fasi di lavoro della Messa in Sicurezza di Emergenza (MISE), ossia verranno ricercate tutte le sostanze le cui concentrazioni non sono conformi al limite di legge.

Nelle tabelle sottostanti (Tab.4.2 e Tab.4.3) sono riassunte le concentrazioni delle varie sostanze inquinanti eccedenti le CSC per la destinazione d'uso industriale riscontrate nelle matrici suolo/sottosuolo durante le due fasi.

Area indagata	Nome campione	Parametro	CSC Tab.1 Col.B	Valore rilevato (mg/kg s.s.)
Parete nord	C1	Idrocarburi leggeri C<12	250	424
	C2	Idrocarburi leggeri C<12	250	1100
Parete est	C1	Idrocarburi pesanti C>12	750	1346
Parete est A	C2	Idrocarburi leggeri C<12	250	375
Parete est C	C1	Idrocarburi leggeri C<12	250	6980
	C2	Idrocarburi leggeri C<12	250	627
Parete sud		Idrocarburi leggeri C<12	250	888
	C1	Idrocarburi pesanti C>12	750	1405
	C2	Idrocarburi leggeri C<12	250	6458

Tab.4.2: Concentrazioni rilevate nelle matrici suolo/sottosuolo durante la fase 1.

Nome campione	Parametri	CSC (Tab.1 Col.B D.Lgs. 152/06	Valori riscontrati (mg/kg s.s.)
FSD	Idrocarburi leggeri C<12	250	310
FSE	Idrocarburi leggeri C<12	250	413
Parete nord	Idrocarburi leggeri C<12	250	795
	Idrocarburi pesanti C>12	750	2210
Parete sud	Idrocarburi leggeri C<12	250	2548
Parete Ovest n.2	Arsenico	50	741
	Piombo	1000	2606
	Idrocarburi leggeri C<12	250	7185
	Idrocarburi pesanti C>12	750	4170

Tab.4.3: Concentrazioni rilevate nelle matrici suolo/sottosuolo durante la fase 2.

Le principali sostanze rilevate in concentrazioni non conformi sono quindi:

- Idrocarburi leggeri e pesanti;
- BTEX;
- Piombo;
- Arsenico.

In seguito è riportata una breve descrizione delle caratteristiche chimico fisiche di ogni singolo parametro:

## **Idrocarburi**

Con questo termine ci si riferisce ad una classe di composti organici caratterizzati da una struttura composta da atomi di C e H.

Gli idrocarburi, a causa della loro immiscibilità in acqua, vengono denominati NAPL (Non-Aqueous phase liquids) e in base alla loro densità vengono suddivisi in: LNAPL (Light NAPL), se sono meno densi dell'acqua; DNAPL (Dense NAPL), se sono più densi.

Quando si ha una contaminazione dovuta a queste sostanze, è necessario tenere in considerazione che gli idrocarburi possono percolare nel sottosuolo attraverso la porosità del terreno, venire lisciviati dalle acque meteoriche o dalle acque di falda ed essere trasportati orizzontalmente come prodotto surnatante o adagiati sul letto della litologia che ospita la falda .

Poiché una miscela idrocarburica è formata da un numero variabile di sostanze organiche con distinte proprietà chimico-fisiche, la composizione della miscela può continuamente cambiare nel corso della migrazione; gli idrocarburi possono venire a contatto con la falda o le acque di infiltrazione, causando un processo lento di dissoluzione mentre i componenti volatili possono ripartirsi e riempire gli interstizi del terreno. Una parte della contaminazione può aderire al terreno e venire lisciviata successivamente dalle acque di percolazione o venire assorbita dalle sostanze umiche. A causa di tutti questi processi la miscela, col procedere della contaminazione, si arricchirà di componenti meno solubili e meno volatili, cioè nelle frazioni più pesanti.

Nelle condizioni normali la maggior parte degli idrocarburi si presenta in forma liquida, con eccezione dei composti più leggeri (C1-C4), che si presentano in forma gassosa e i composti pesanti (C>20-25), che si trovano in forma solida. Solitamente all'aumentare della complessità della catena, per ogni composto diminuiscono la solubilità in acqua e la volatilità.



## **Arsenico**

L'Arsenico (As) è un metalloide, appartenente al V gruppo della tavola periodica degli elementi.

Questo metallo in acqua si può trovare sia in forma organica che in forma inorganica, anche se in soluzione la forma con cui si trova più spesso è quella inorganica. In soluzione acquosa si formano principalmente l'acido arsenioso ( $\text{H}_3\text{AsO}_3$ ) con As(III) e acido arsenico ( $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ) per As(V). Le varie specie in soluzione sono regolate dalle condizioni Eh-pH: elevati valori di Eh, indicano condizioni ossidanti e la specie prevalente è quella dell'Arsenico pentavalente mentre a valori minimi di Eh, quindi a condizioni riducenti, la specie prevalente è As(III). L'origine dell'Arsenico può essere naturale (assunto spesso come valore fondamentale o background geochimico), industriale (conservazione del legno attraverso l'uso di Arseno cromato di rame, fabbricazione di cristalli nell'industria del vetro) oppure attraverso la combustione del carbone.

## **Piombo**

Il Piombo (Pb) è un metallo che si caratterizza per la sua malleabilità e tenerezza. La sua densità è molto elevata ( $8,960 \text{ kg/m}^3$ ) rispetto agli altri elementi come rame, ferro o lo stagno. Questo metallo non è intaccato dall'acido solforico e cloridrico se sono a bassa concentrazione, bensì si scioglie nell'acido nitrico e negli acidi solforici e cloridrici se altamente concentrati. In superficie può venire attaccato dall'ossigeno atmosferico e da acidi deboli comportando la formazione di ossido di Piombo (PbO), se poco alterato, o di  $\text{Pb}_3\text{O}_4$ , se l'alterazione è più pronunciata. La sua mobilità è abbastanza bassa poiché tende a precipitare sotto forma di Anglesite ( $\text{PbSO}_4$ ) o Cerussite ( $\text{PbCO}_3$ ) mentre risulta in forma mobile solo in condizioni di elevata acidità. Questo elemento ha scarsa mobilità anche in mancanza di ossigeno precipitando sotto forma di Galena (PbS).

E' da ricordare il fatto che le concentrazioni elevate di Arsenico e Piombo non sono imputabili allo sversamento di gasolio ma sono legate ad una contaminazione precedente.

## Le matrici

In base ai campioni prelevati durante gli interventi di messa in sicurezza d'emergenza è stato possibile determinare quali siano le matrici più coinvolte dalla contaminazione e in che litologie si ha la presenza di contaminanti aventi concentrazioni eccedenti le Concentrazioni Soglia di Contaminazione (CSC). Per rappresentare le matrici coinvolte dalla contaminazione e la distribuzione degli inquinanti, sono state elaborate alcune sezioni stratigrafiche: una parallela alla Parete Est e due parallele alle Pareti Nord e Sud degli scavi effettuati durante gli interventi di Messa in Sicurezza d'Emergenza.

Le tre sezioni stratigrafiche effettuate seguono i profili A, B e C riportati nella figura sottostante (Fig.4.32) e nella Tav.3.

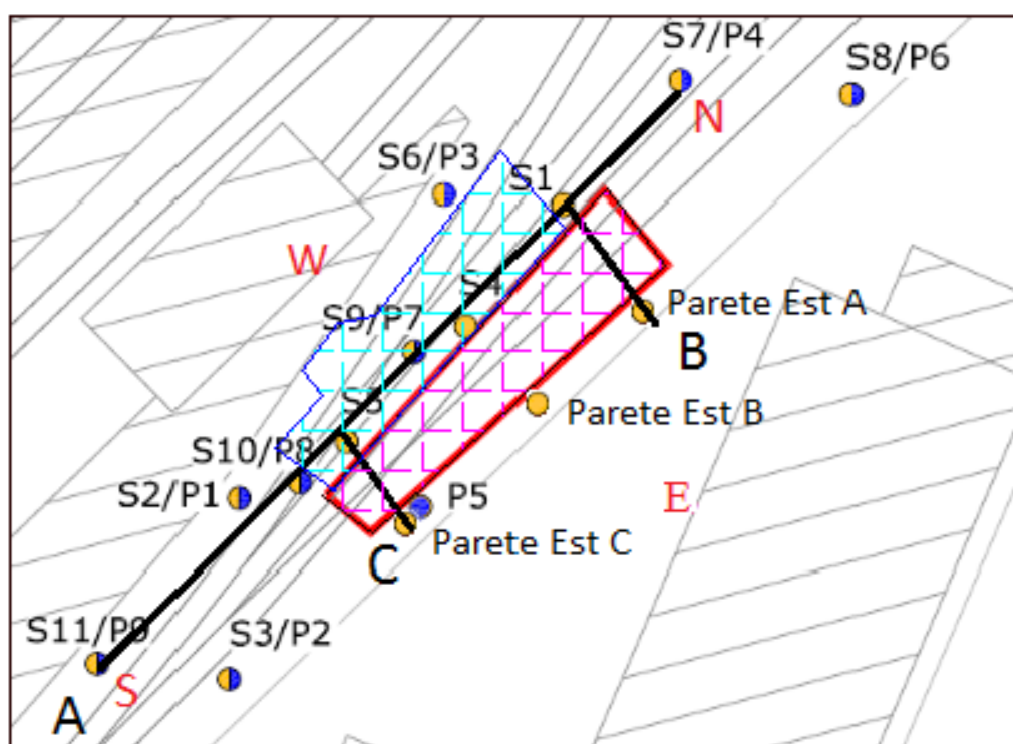


Fig.4.32: Orientazione delle sezioni stratigrafiche.

La sezione stratigrafica del profilo A è riportata in Fig.4.33, mentre le sezioni stratigrafiche del profilo B e C sono illustrate rispettivamente in Fig.4.34 e in Fig.4.35.

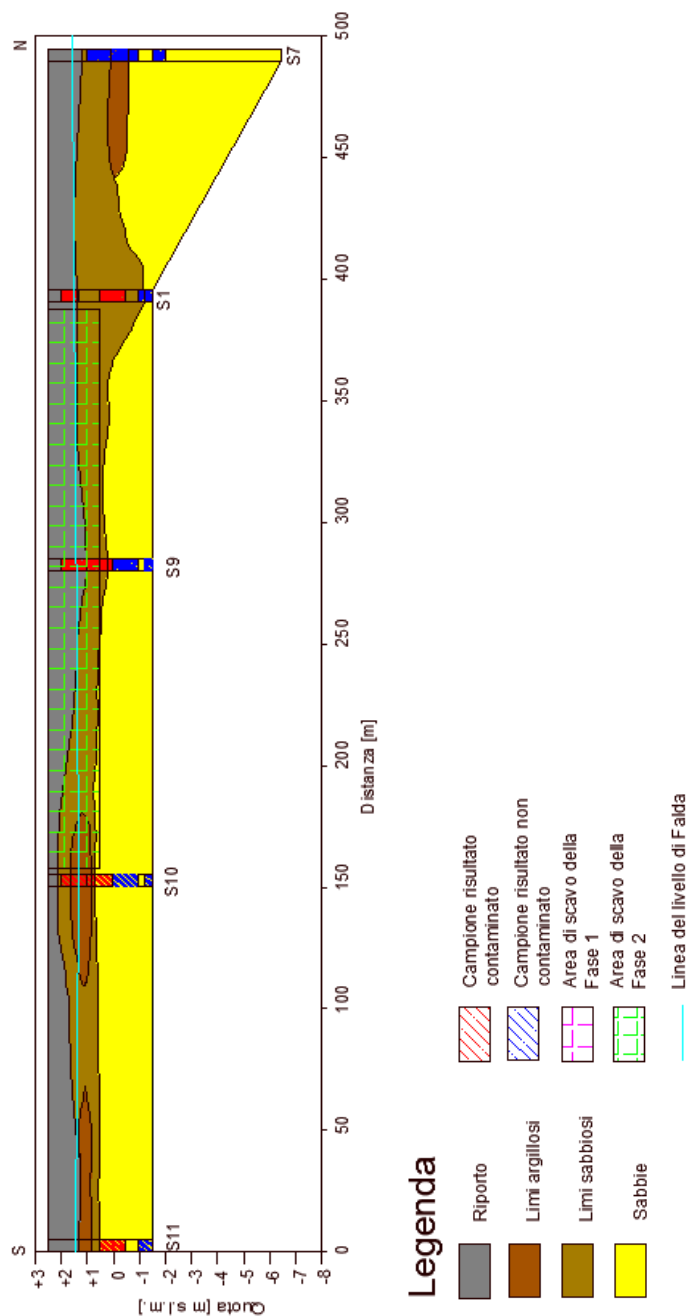
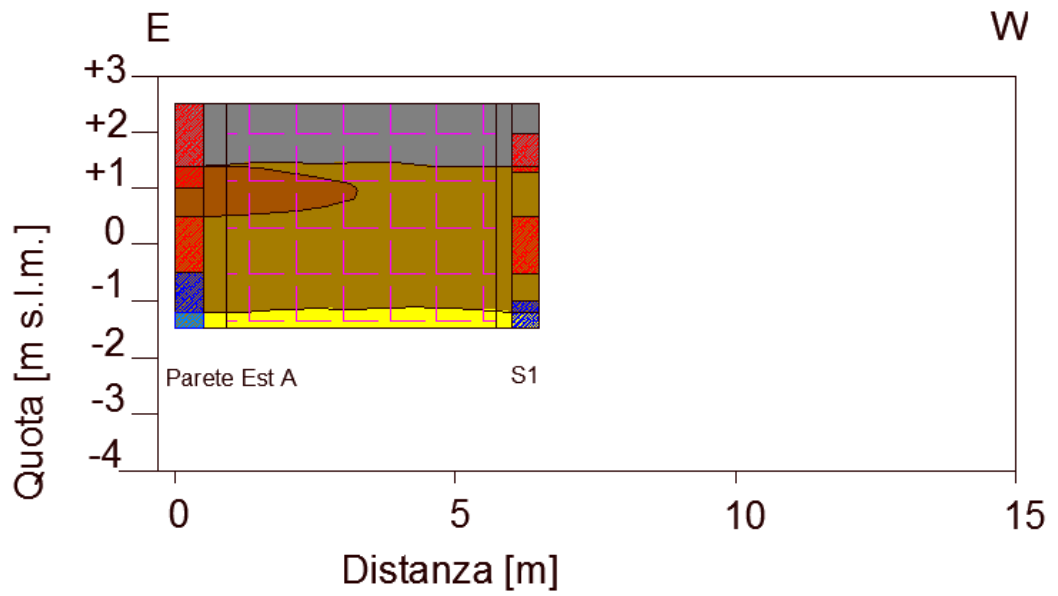


Fig.4.33: Sezione stratigrafica del profilo A.



### Legenda

	Riporto		Campione risultato contaminato
	Limi argillosi		Campione risultato non contaminato
	Limi sabbiosi		Area di scavo della Fase 1
	Sabbie		Area di scavo della Fase 2
			Linea del livello di Falda

Fig.4.34: Sezione stratigrafica E-W del profilo B.

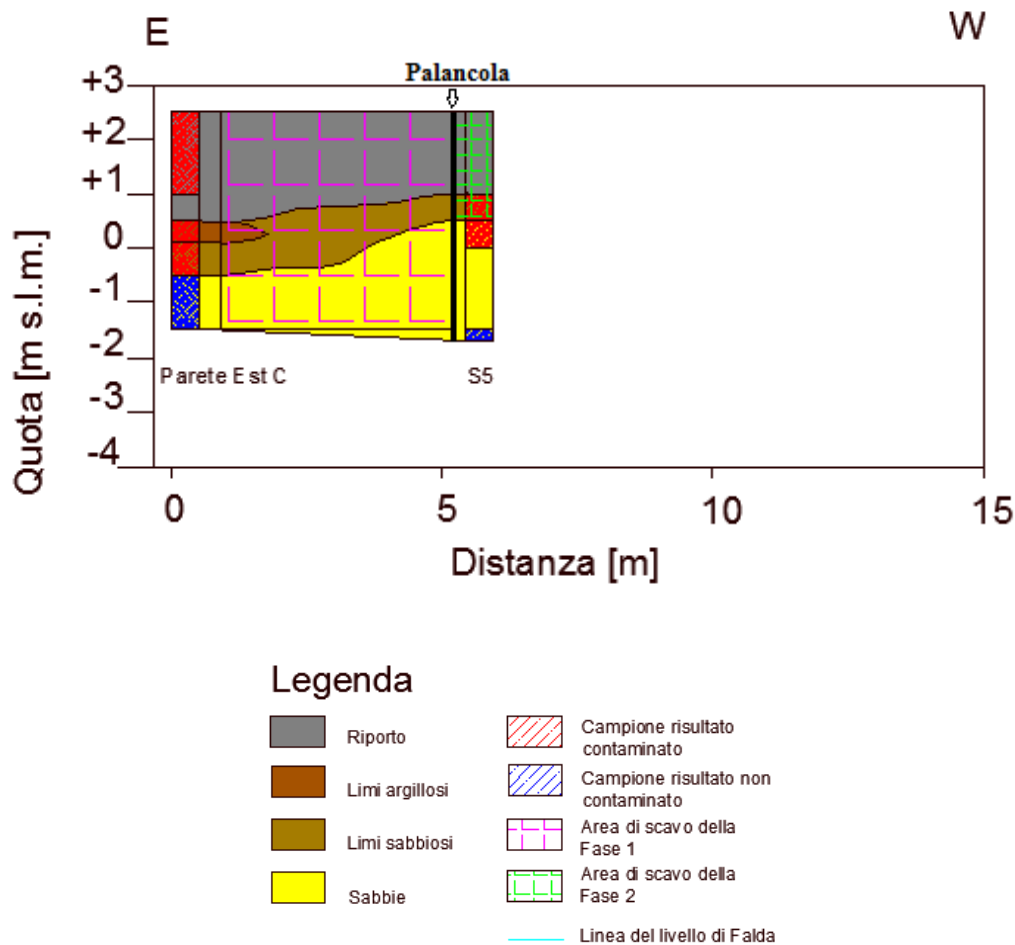


Fig.4.35: Sezione stratigrafica E-W del profilo C.

Al fine di meglio rappresentare il sottosuolo ed effettuare correlazioni con la distribuzione del contaminante si è scelto di suddividerlo in n.4 litologie principali: Riporto, limi argillosi, limi sabbiosi e sabbie.

Come si può notare dalle figure sopra riportate, le litologie più coinvolte dalla contaminazione sono il riporto e i limi, mentre nelle sabbie si riscontrano superamenti delle CSC ad uso commerciale/industriale solo nella parte più superficiale; questo è spiegabile attraverso l'ipotesi secondo cui il contaminante, data la sua bassa solubilità, il suo basso peso specifico, la permeabilità più elevata delle sabbie e il livello della falda acquifera, si muova preferibilmente in senso orizzontale, nella direzione di flusso principale.

## **I percorsi di migrazione**

Le modalità o vie di migrazione determinano le modalità mediante le quali il potenziale bersaglio entra in contatto con le sostanze contaminanti.

I percorsi di esposizione si dicono diretti qualora non vi sia trasporto del contaminante ed i recettori e le vie di esposizione coincidono con le sorgenti; diversamente, i recettori sono esposti per via indiretta quando il contaminante è soggetto a meccanismi di trasporto prima di giungere al bersaglio. Sulla base delle indagini eseguite in fase di MISE sono stati definiti i contaminanti di interesse per la presente tesi, appartenenti alla categoria degli idrocarburi.

Tali composti possono subire lisciviazione e giungere alla falda, nella quale possono diffondersi mediante meccanismi di trasporto orizzontale e verticale. Inoltre la frazione più leggera può essere sottoposta a volatilizzazione e giungere quindi a potenziali bersagli costituiti sia dagli addetti alle attività commerciali e/o industriali presenti nelle vicinanze del sito sia dai residenti localizzati ad una certa distanza dalla sorgente. Nel caso di superfici non pavimentate e con presenza di contaminazione superficiale possono essere attivi anche percorsi diretti quali ingestione e contatto dermico con terreno contaminato da parte di recettori on site. Le specie chimiche contaminanti che vengono trasportate in falda o si depositano nel suolo possono infine raggiungere i canali lagunari.

Lo scenario di contaminazione legato allo sversamento del gasolio da riscaldamento da parte della ferrocisterna è raffigurato in Fig.4.36 e Fig.4.37.

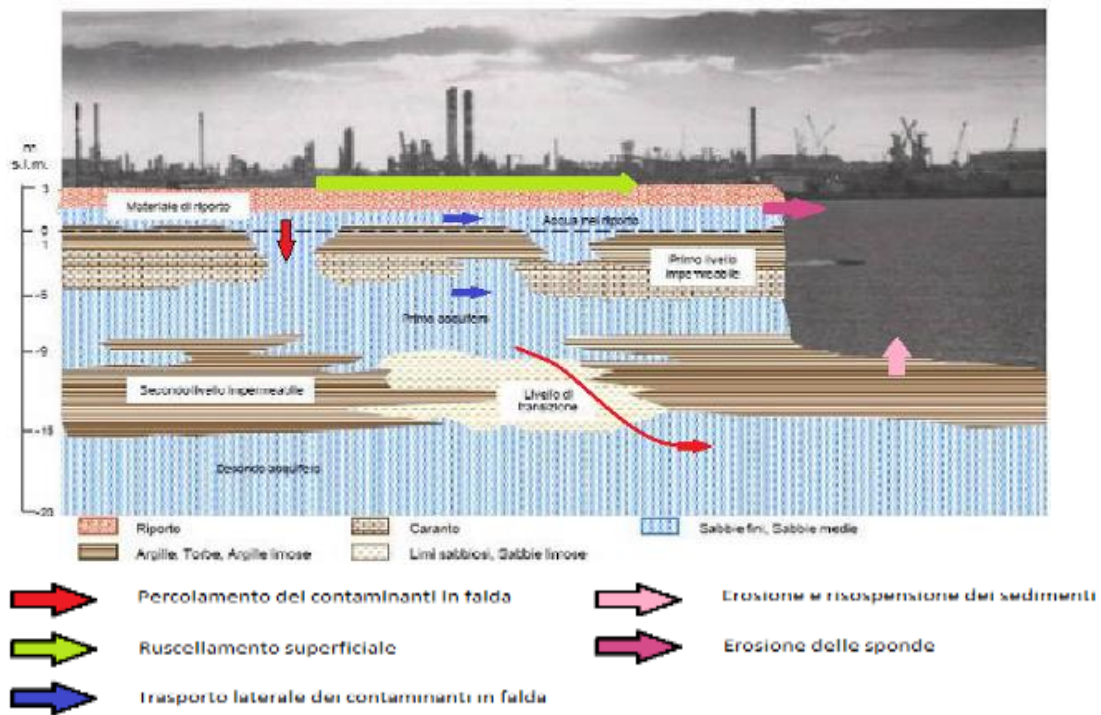


Fig.4.36: Modello di esposizione per recettori ambientali: acquifero e laguna.

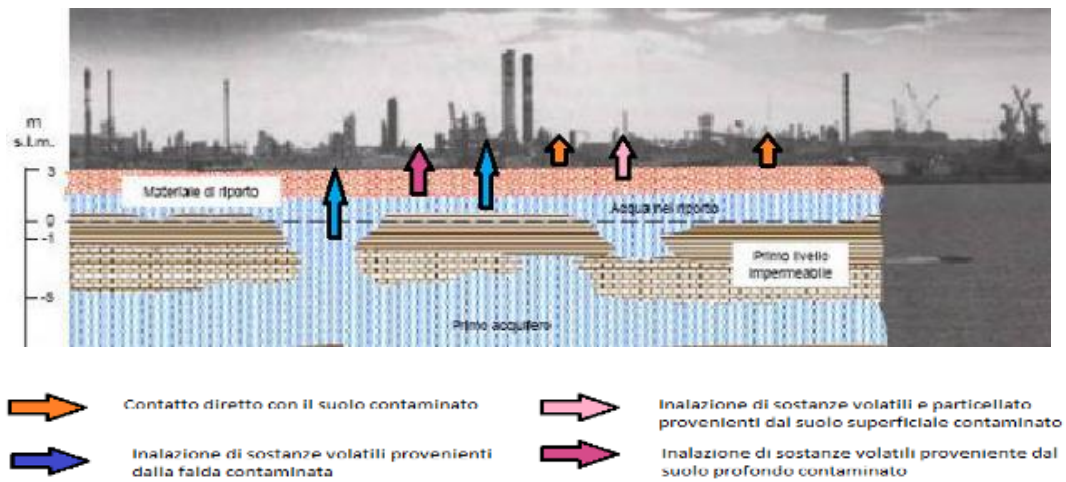


Fig.4.37: Modello di esposizione per recettori umani ed ambientali: off-site e on-site.



## 4.6 Piano di investigazione

La difficoltà nel determinare la distribuzione volumetrica della contaminazione, le possibili vie di migrazione e dispersione delle varie specie inquinanti e i valori dei principali parametri geologici ed idrogeologici sito specifici, a causa dell'eterogeneità geologica ed idrogeologica del sito, impone la stesura di un Piano di indagini atto ad ottenere ulteriori informazioni per poter elaborare il Modello Concettuale definitivo del sito e a circoscrivere la contaminazione derivante dallo sversamento di gasolio dovuto al ribaltamento della ferrocisterna. Le analisi chimiche eseguite sui campioni prelevati durante la Fase 2 nel corso delle operazioni di MISE (Par.3.2.4, Tab.3.9) hanno evidenziato superamenti delle CSC fissate dal D.Lgs. 152/06 per contaminanti quali: BTEX, idrocarburi leggeri e idrocarburi pesanti.

Dal momento che è noto il punto in cui è avvenuto l'incidente che ha originato la contaminazione, e che ad oggi sono disponibili numerosi dati chimici derivanti da analisi eseguite durante le fasi di MISE, le indagini proposte nel seguente capitolo saranno quindi finalizzate a definire il grado e l'estensione della contaminazione oltre la Parete Ovest dello scavo eseguito durante la Fase 2, ed a circoscrivere quindi l'area contaminata a seguito dello sversamento.

Nel pianificare le indagini da eseguire sul sito occorre tenere presente che nelle vicinanze sono presenti, oltre ai binari ferroviari, edifici e attività in esercizio e si dovrà fare riferimento al D.Lgs. 152/06, alla Delibera Regione Veneto n. 2922 del 3/10/2003 e al Protocollo Operativo per la Caratterizzazione dei siti contaminanti ai sensi del D.Lgs. 152/06 e s.m.i. e dell'Accordo di Programma per la Chimica di Porto Marghera.

### **Indagini proposte per la matrice suolo/sottosuolo**

La posizione e il numero dei punti di indagine devono essere tali da rispettare gli obiettivi predisposti dal Piano di caratterizzazione; per ogni matrice investigata si hanno due strategie per scegliere la collocazione dei punti di indagine: l'ubicazione ragionata e l'ubicazione sistematica. La prima è basata sull'esame dei dati storici a disposizione e su tutte le informazioni sintetizzate dal modello concettuale preliminare del sito. Questa scelta è consigliabile qualora si abbia un sito complesso e si abbiano ottime informazioni storiche ed impiantistiche a disposizione, in modo da indagare le zone più vulnerabili e più soggette alla contaminazione. La seconda è basata su un criterio casuale o statistico ed è suggerita quando mancano sufficienti informazioni riguardo l'area inquinata. Dal momento che, come già specificato in precedenza, sono disponibili numerosi dati chimici riguardanti lo stato qualitativo del sito, e sono state reperite informazioni storiche sufficientemente esaustive sull'area si è deciso di seguire il criterio dell'ubicazione ragionata.

In base al modello concettuale preliminare del sito, alla direzione della falda e alla posizione delle zone più vulnerabili alla contaminazione, si è scelto di proporre n.6 sondaggi a carotaggio continuo, denominati S17÷S22, spinti ad una profondità di -5 m dal p.c. e un sondaggio, nominato S23, fino ad una profondità di - 2 m da p.c. La profondità che sarà raggiunta dai sondaggi S17÷S22 è stata suggerita dalla bassa solubilità e peso specifico dei contaminanti coinvolti e dai livelli piezometrici della falda, che impongono agli inquinanti una migrazione nella direzione orizzontale; il carotaggio S23 arriverà ad una profondità minore in quanto verrà utilizzato per il prelievo di campioni di terreno per la sola speciazione idrocarburica.

L'ubicazione dei punti di indagine proposti è riportata nella Tav.4.

La realizzazione dei sondaggi, utili per affinare la ricostruzione litostratigrafica del sottosuolo, avverrà mediante le indicazioni fornite nel Par.3.1.8, in particolare:

- Le pareti del foro saranno rivestite da materiale non alterabile chimicamente, così come tutti gli strumenti e le attrezzature utilizzate;

- La velocità di perforazione adottata sarà molto bassa per evitare il surriscaldamento del materiale e la conseguente perdita di materiali termodegradabili;
- Durante tutte le fasi sarà controllata la perdita di qualsiasi olio lubrificante da macchinari, impianti e/o attrezzature;
- Nel maneggiare le attrezzature verranno utilizzati dei guanti monouso per evitare il diretto contatto con le sostanze potenzialmente tossiche;
- Per la decontaminazione della attrezzature sarà predisposta un'area impermeabilizzata, posta ad una distanza dalla zona contaminata sufficiente ad evitare la diffusione dell'inquinamento della matrici campionate.

Al fine di determinare la successione litostratigrafica sito specifica si propone il prelievo di 27 campioni di terreno conservati in appositi contenitori di vetro sigillati ermeticamente e consegnati ad un laboratorio autorizzato per la parametrizzazione delle fasi chimiche. La frequenza verticale di campionamento e il numero dei prelievi potranno essere modificati in corso d'opera qualora sia necessario definire la profondità dell'inquinamento e la variabilità verticale della contaminazione e, in base alle osservazioni effettuate durante i lavori e all'omogeneità idrogeologica degli strati attraversati. Il prelievo dei campioni avverrà esaminando ogni strato omogeneo dal punto di vista litologico e con uno spessore non superiore al metro sino a raggiungere il primo livello impermeabile. Qualora non avvenga accertata la presenza del Caranto, i carotaggi S17÷S22 raggiungeranno la profondità di -5 m dal p.c.

Le metodologie di campionamento sono descritte nel Par.3.1.5.

### **Parametri da ricercare - terreni**

La selezione dei parametri da analizzare è avvenuta in base ai risultati ottenuti dalle analisi chimiche eseguite sui campioni prelevati durante gli interventi di messa in sicurezza d'emergenza, cioè BTEX, idrocarburi leggeri e idrocarburi pesanti.

Il Piombo e l'Arsenico non verranno considerati in quanto sono legati ad una contaminazione precedente e non pertinenti con lo scopo del presente lavoro. Le concentrazioni ottenute dalle analisi dovranno essere confrontate con le CSC riportate nel D.Lgs. 152/06 e destinate per un suolo ad "uso commerciale ed industriale".

### **Indagini proposte per la matrice acque sotterranee**

Per definire lo stato qualitativo delle acque sotterranee in ingresso ed uscita dall'area in esame ed al fine di circoscrivere il plume di contaminazione si è deciso di proporre l'installazione di n.6 piezometri (P15÷P20) dai quali procedere al prelievo di n.6 campioni di acqua di falda.

Il prelievo delle acque dovrà avvenire dopo l'effettuazione dello spurgo e può avvenire secondo due modalità: attraverso un campionamento dinamico, ossia il campione sarà prelevato per mezzo di una pompa sommersa e sarà utilizzato per ottenere un campione composito con acque provenienti da diverse profondità, al fine di ottenere un campione rappresentativo della composizione media dell'acquifero indagato. Il secondo metodo è il campionamento statico dove il campione sarà prelevato in un pozzo non in emungimento, mediante metodo manuale (bailer), previa spurgo. Questo sarà utilizzato in corrispondenza di pozzi di monitoraggio poco produttivi e per campionare sostanze a densità diversa dall'acqua. Nel caso in esame si propone di utilizzare quest'ultimo metodo per la captazione dell'eventuale fase surnatante presente al di sopra della falda acquifera. Prima di procedere con la formazione del campione sarà utile misurare, attraverso una sonda multiparametrica, i parametri dell'acqua: quali temperatura, pH, ossigeno disciolto, conducibilità idraulica e potenziale di ossidazione.

Le modalità con cui saranno effettuati i campionamenti sono descritti nel Par.3.1.5.

Per la conservazione del campione e la sua etichettatura si prevede:

- Il trasporto in giornata dei campioni in laboratorio per sottoporli ad analisi;
- L'identificazione del campione raccolto nell'apposito contenitore (secondo i metodi IRSA-CNR, volume 64/85), riportando il pozzo di monitoraggio, data e ora del prelievo;
- La conservazione del campione in un frigo durante il trasporto, alla temperatura di +4 °C.

#### **Parametri da ricercare – acque sotterranee**

Anche nel caso della matrice acque sotterranee, la selezione dei parametri da analizzare è avvenuta in base ai risultati ottenuti dalle analisi chimiche eseguite sui campioni prelevati durante gli interventi di messa in sicurezza d'emergenza, cioè BTEX e idrocarburi totali (espressi come n-esano).

Le concentrazioni ottenute dalle analisi dovranno essere confrontate con le CSC riportate dal D.Lgs. 152/06 per le acque sotterranee.

#### **Parametri sito specifici per l'elaborazione dell'analisi di rischio**

Secondo il D.Lgs. 152/06 il fine della caratterizzazione, oltre a comprendere quale sia la distribuzione tridimensionale della contaminazione, è quello di definire tutti i parametri geologici e idrogeologici necessari per avviare un'eventuale Analisi di Rischi sito specifica, la quale dovrà verificare il superamento delle Concentrazioni Soglia di Rischio (CSR).

In base a quello riportato nel Manuale “Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi di rischio ai sensi del D.Lgs. 152/06”, per lo sviluppo di una corretta Analisi di Rischio occorre conoscere:

- Le caratteristiche granulometriche e densità del suolo;
- La frazione di carbonio organico (FOC);
- La conducibilità idraulica e il gradiente idraulico dell'acquifero;

- La profondità del piano di falda rispetto al piano campagna (soggiacenza);
- Il pH;
- La speciazione degli inquinanti idrocarburici.

Come si è visto in precedenza, la determinazione dei parametri sito-specifici sopra riportati, risulta molto complessa a causa delle diverse condizioni particolari (forte eterogeneità geologica del sito, interazione tra regime di marea e regime piezometrico del sito, influenza delle lavorazioni sui livelli piezometrici della falda) in cui si viene a trovare l'area di interesse. Al fine di eseguire delle misure sito specifiche per i parametri necessari si propone l'esecuzione di ulteriori prove speditive sulle matrici coinvolte dalla contaminazione. In primis, si prevede il prelievo di 3 campioni di terreno saturo e 3 campioni per il terreno insaturo, per l'effettuazione di analisi granulometriche. La determinazione della granulometria risulta indispensabile in quanto da questa si ricavano parametri quali: densità secca, porosità totale, contenuto volumetrico d'aria e d'acqua.

Inoltre, per la ricerca dei valori del pH, FOC e densità si eseguiranno 10 analisi chimiche sui campioni prelevati (4 campioni verranno prelevati nei sondaggi S22, 4 campioni nel sondaggio S23 e 2 in S17). La determinazione del contenuto di sostanza organica risulta molto importante in quanto questo valore regola la partizione interfase degli inquinanti organici presenti nel sito, mentre la porosità fornisce il grado di addensamento del terreno e dipende dalla granulometria e dalla forma dei grani. Al diminuire del valore della densità diminuiscono i punti di contatto tra le particelle nel terreno, permettendo la migrazione e la dispersione della contaminazione.

Infine, per la determinazione della conducibilità idraulica si ritiene necessaria l'esecuzione di 6 slug test. Queste prove speditive vengono eseguite in maniera da produrre un'istantanea variazione del livello statico della falda in un pozzo o in un piezometro per poi misurare, in funzione del tempo, il conseguente recupero delle condizioni iniziali. La prova può essere effettuata tramite due modalità operative: la prima prevede l'inserimento di un solido (slug) all'interno del piezometro in

modo tale da aumentare bruscamente il livello statico (test in declino o con carico decrescente); il secondo sistema consiste nel produrre un'istantanea diminuzione del livello statico della falda per sottrazione di uno slug (test di risalita o con carico crescente). La velocità con cui il livello statico della falda ritorna alle condizioni iniziali è direttamente correlabile alla conducibilità idraulica. L'ultimo parametro da determinare è la profondità del piano di falda (soggiacenza). Nel sito oggetto della presente tesi l'identificazione di un unico valore da associare a tale parametro risulta complessa in quanto i livelli piezometrici della falda sono continuamente influenzati dai fenomeni di marea che interessano la Laguna di Venezia. Per valutare l'intensità con cui avviene l'interazione tra il regime di marea e regime piezometrico dell'area, è necessaria l'installazione di specifiche sonde all'interno dei piezometri P15 e P20 per la misura dei parametri chimico-fisici e dei livelli di falda.

Una volta ottenuti gli esiti delle indagini integrative sopra descritte, si avranno le basi per la definizione del modello concettuale definitivo del sito e per la determinazione del grado e l'estensione della contaminazione.

Grazie alle stratigrafie e ai rilievi piezometrici eseguiti nel corso delle operazioni di Messa in Sicurezza d'Emergenza, è comunque possibile perseguire lo scopo della seguente tesi, ossia selezionare una tecnologia di bonifica applicabile nell'area interessata dallo sversamento.

Per raggiungere tale obiettivo si può fare riferimento a due ipotesi di intervento, espresse nell'Allegato 4 del D.Lgs. 152/06 (Par.1.4.2), che descrive le procedure applicabili ai siti di ridotte dimensioni, inferiori ai 1000 mq.

La prima ipotesi di intervento, una volta accertato il superamento delle CSC, prevede l'esecuzione del Piano di Caratterizzazione e l'elaborazione dell'Analisi di Rischio sito specifica, seguendo quanto disposto dalla norma nazionale ed eventualmente dall'Accordo di Programma per il SIN di Porto Marghera. Qualora si accertasse il superamento delle CSR calcolate mediante l'analisi di rischio si dovrebbe procedere alla presentazione di un progetto di bonifica, da sottoporre all'approvazione da parte della Conferenza dei Servizi .

L'applicazione dell'analisi di rischio, comporta senza dubbio un allungamento dei tempi amministrativi (anche di 8 mesi); tuttavia le CSR calcolate, che costituiscono gli obiettivi di bonifica sito specifici, potrebbero essere meno restrittive delle CSC. In questo caso, qualora nessuna concentrazione rilevata in sito superasse le CSR, non sarebbe necessario alcun intervento di bonifica per la matrice terreno. La matrice acque sotterranee dovrà essere, in ogni caso, sottoposta ad un intervento di bonifica.

Si evidenzia comunque che, qualora si faccia riferimento alle CSR e non venissero quindi raggiunte le CSC per la destinazione d'uso prevista dagli strumenti urbanistici, le conclusioni dell'analisi di rischio andrebbero trascritte all'interno del Certificato di Destinazione Urbanistica (CDU) del sito, e ciò andrebbe a costituire un vincolo all'utilizzo futuro dell'area.

La seconda strada percorribile prevede che, grazie alle dimensioni inferiori di 1000 m<sup>2</sup> del sito in esame, sia applicabile la procedura semplificata descritta nell'Allegato 4 del D.Lgs. 152/06 (Par.1.4.2), ossia è possibile procedere alla presentazione di un Progetto di Bonifica senza elaborare l'Analisi di Rischio. Questa ipotesi di intervento comporta una velocizzazione dell'intero iter



amministrativo, in quanto non viene presentata l'analisi di rischio da sottoporre all'approvazione della conferenza dei servizi. Inoltre la scelta di non elaborare l'analisi di rischio comporta che gli obiettivi di bonifica coincidano automaticamente con le CSC e che, terminato l'intervento di bonifica sul sito non permanga alcun vincolo sull'utilizzo futuro.

Per il sito in esame, nel seguente lavoro di tesi si è scelto di procedere alla formulazione di un possibile intervento di bonifica senza procedere all'elaborazione dell'analisi di rischio.

## **5. Ipotesi sulle tecniche di bonifica utilizzabili nel sito**

Nel seguente capitolo verranno dapprima descritte le diverse tecnologie di bonifica in funzione dei meccanismi di azione (chimico, fisico, etc) con cui i vari interventi agiscono sulla contaminazione; successivamente vengono illustrati i criteri geologici e idrogeologici inerenti al sito, che saranno alla base della selezione delle tecniche applicabili al caso di studio. Infine, dopo un primo screening basato sui contaminanti target trattati dalle singole tecnologie, vengono descritte le metodologie di bonifica più idonee al sito oggetto di studio. L'attuale normativa permette di procedere alla bonifica di un sito per fasi (Art. 242, comma 7, così come modificato dal DL 201/11, convertito nella Legge 214/11).

Secondo la normativa vigente, definita dall'Art. 249 "Aree contaminate di ridotte dimensioni e procedure semplificate" (Par.1.4.2), una volta redatto il piano di Caratterizzazione dell'area interessata dallo sversamento, qualora non si proceda all'elaborazione dell'analisi di rischio, occorre presentare alla Regione un Progetto Operativo di Bonifica.

Gli interventi di bonifica, secondo quanto definito all'Art. 240 del D.Lgs. 152/06, sono *"l'insieme di 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 delle concentrazioni soglia di rischio"* o, come nel caso oggetto di studio, ai valori di concentrazione soglia di contaminazione.

Gli interventi di messa in sicurezza permanente sono invece definiti come *"l'insieme di interventi atti ad 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"*.

Nel seguente capitolo verranno discussi gli interventi di bonifica, poiché grazie a

questi si ha la riduzione delle concentrazioni dei contaminanti e non semplicemente il loro isolamento.

Gli interventi di bonifica comunemente sono classificati in base:

- Alle matrici ambientali oggetto del trattamento;
- Alla movimentazione o meno del terreno dal sito;
- Alle finalità che l'intervento di bonifica tende a perseguire;
- Ai meccanismi di azione con cui l'intervento agisce sulla contaminazione.

In base alla matrice ambientale interessata dall'inquinamento, si hanno interventi di bonifica applicabili per ridurre le concentrazioni dei contaminanti nella matrice suolo/sottosuolo e interventi utilizzabili qualora la matrice interessata sia l'acqua sotterranea. Per quanto riguarda gli interventi applicabili nel suolo, questi si suddividono in due categorie: interventi *in situ*, se non si ha la rimozione del terreno contaminato, mentre se l'intervento prevede la mobilitazione di terreno gli interventi sono *ex-situ*. Quest'ultima categoria si divide ulteriormente in interventi *off site*, se la rimozione del terreno è seguita da un trasferimento in un apposito impianto; viceversa qualora il terreno sia rimosso e venga trattato dentro lo stesso sito, gli interventi sono definiti *on site*.

In base alle finalità con cui viene scelto l'intervento da eseguire, si hanno:

- Interventi mirati alla distruzione del contaminante;
- Interventi volti al trasferimento del contaminante da una matrice ad un'altra per poi venire rimosso;
- Interventi finalizzati alla diminuzione delle concentrazioni dei contaminanti, agendo sulla sorgente di inquinamento;
- Interventi mirati al trasferimento del terreno contaminato in appositi impianti di trattamento.

In base alla tipologia di meccanismo con cui si agisce sulla contaminazione possono essere identificati i seguenti trattamenti:

- Trattamenti di tipo chimico: si ha la trasformazione degli inquinanti in composti meno tossici o meno mobili (un esempio di processo chimico molto utilizzato è l'ossidoriduzione);
- Trattamenti di tipo biologico: questi interventi fanno uso di microrganismi per degradare i contaminanti presenti nel suolo;
- Trattamenti termici: si ha il desorbimento, la distruzione o l'immobilizzazione dei contaminanti mediante l'utilizzo di alte temperature;
- Trattamenti di tipo fisico: sfruttando le proprietà chimico-fisiche dell'inquinante, si ha la separazione dei contaminanti per poi destinarli ad un trattamento successivo.

## **5.1 Scelta della tecnologia di bonifica da adottare e criteri utilizzati per la scelta**

Ogni tecnica di bonifica presente in letteratura è caratterizzata da alcuni limiti di applicabilità, ad esempio alcuni interventi sul suolo possono essere utilizzabili solo con certe caratteristiche fisiche del terreno o caratteristiche chimiche dei contaminanti. Inoltre, la realizzabilità dei trattamenti sull'acqua sotterranea dipende dal tipo di acquifero interessato dalla contaminazione, dalla presenza di eventuali basamenti impermeabili e dalle caratteristiche chimiche degli inquinanti. La scelta della definizione dell'intervento da adottare dovrà dipendere anche dalla destinazione d'uso del sito, dagli obiettivi da raggiungere, dalla valutazione dei benefici ambientali, dall'efficacia a breve termine e dovrà seguire il principio BATNEEC (Best Available Technology Not Entailing Excessive Costs), ovvero si dovrà scegliere la Miglior Tecnologia Disponibile che Non Comporti Costi Eccessivi.

Nel caso del sito in esame i criteri e le ipotesi tenute in considerazione per la definizione delle tecnologie di bonifica applicabili nel sito sono:

- La parte di sottosuolo maggiormente interessata dalla contaminazione è caratterizzata da una granulometria prevalentemente media-fine;
- La soggiacenza della falda, ossia la profondità del livello piezometrico rispetto al piano campagna, che nel caso di specie assume valori tra 0,5 m e 1,5 m;
- I contaminanti presenti sono di origine organica e hanno una costante di Henry alta. Questa costante rappresenta il coefficiente di ripartizione tra la concentrazione di un costituente disciolto in acqua e la sua pressione parziale nella fase di vapore in condizioni di equilibrio, ossia descrive la sua tendenza relativa a ripartirsi fra la fase di vapore e la fase disciolta. Sostanze con elevata costante di Henry hanno maggior tendenza alla diffusione.

Nel caso di studio, inoltre, si dovranno scegliere delle tecnologie che non arrechino problematiche e danneggiamenti agli edifici adiacenti e non interferiscano con la normale attività lavorativa di transito delle carrozze ferroviarie sui binari.

Poiché la soggiacenza della falda è molto bassa e la parte di suolo e sottosuolo superficiale è già stata interessata da uno scavo (Par.3.1.1), nelle seguenti pagine verranno trattati soprattutto gli interventi di bonifica che interessano la matrice acque sotterranee.

In All.3 vengono riportate delle schede sintetiche sulle tecnologie di bonifica.

In Tab.5.1 seguente è riportata, in maniera schematica, la valutazione comparativa tra le tecnologie potenzialmente applicabili al caso in esame. In particolare, la valutazione dell'applicabilità della tecnologia da adottare è stata sviluppata sulla base dei seguenti parametri:

1. **efficacia abbattimento inquinanti:** indica la praticabilità tecnica teorica, ovvero la possibilità di effettuare una decontaminazione efficace in considerazione degli inquinanti presenti e in condizioni ideali;
2. **grado di sviluppo:** è correlato alle esperienze positive connesse con l'applicazione della tecnologia in casi simili a quello del sito in esame ed al livello di standardizzazione e sviluppo della tecnica di bonifica;
3. **applicabilità tecnica in sito:** anche se una tecnica di bonifica è praticabile in teoria su determinati inquinanti, tale parametro indica sulla base delle caratteristiche geologiche e idrogeologiche del sito, l'applicabilità tecnica nel sito in oggetto;
4. **applicabilità ad entrambe le matrici interessate:** nel caso specifico, tiene conto in particolare della possibilità di intervenire sia sulla matrice terreni che acque sotterranee;
5. **necessità test preventivi:** il successo dell'applicazione di un processo di risanamento è solitamente soggetto a numerose variabili e, pertanto, può risultare necessaria la conduzione di una serie di test di trattabilità preliminari mirati a valutare l'effettiva fattibilità della tecnologia in rapporto agli obiettivi prefissati;
6. **produzione di residui:** tiene conto della necessità di trattare eventuali correnti gassose e/o liquide prodotte dai sistemi di bonifica esaminati;
7. **tempi:** tale parametro tiene conto dei tempi di bonifica;
8. **costi:** tale parametro è sicuramente una delle voci più impegnative ai fini della valutazione della tecnologia da applicare al sito indagato. La scelta deve infatti tenere conto da una parte dei costi puri delle tecnologie e dall'altra delle necessità oggettive del sito quali ad esempio la garanzia di raggiungimento dei limiti imposti, la rapidità dell'intervento, i costi di gestione dell'intervento di bonifica, ecc...

### **Matrice terreni: rassegna delle principali tecnologie di bonifica adottate**

Le principali tecnologie di bonifica di terreni contaminati da idrocarburi applicabili sono le seguenti:

1. Rimozione del terreno contaminato tramite scavo e trasporto *off-site*;
2. Soil Vapor Extraction (SVE);
3. Solidificazione e stabilizzazione
4. Soil Flushing;
5. Selezione e lavaggio (Soil washing);
6. Biopile;
7. Barriere di contenimento
8. Bioremediation.

Scheda di valutazione tecnologie applicabili sui terreni sulla base degli inquinanti presenti										
Tipologia	Tecnologia	Efficacia abbatt. inquinanti	Grado di sviluppo	Applicabilità tecnica in sito	Compatibilità ad entrambi e le matrici interessate	Necessità a test preventivi	Produzione di residui	Tempi	Costi	Giudizio
In situ	Off site	Rimozione del terreno contaminato e trasporto off-site	Avanzato	NO	NO	NO	SI	Brevi	Medi	<p><b>Giudizio finale: scarso.</b> La tecnologia appare non applicabile al caso in esame a livello di:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. efficacia di abbattimento dei contaminanti presenti,</li> <li>2. compatibilità con la presenza di edifici (capannoni ERF, muro di cinta, capannone area limitrofa), presenza di binari. Lo scavo già effettuato in messa in sicurezza è stato effettuato sino ai margini del sito. In particolare l'effettuazione di scavi in prossimità delle fondazioni potrebbe compromettere la stabilità degli edifici.</li> </ol>
	On site	SVE	Avanzato	NO	NO	SI	SI	Medi	Bassi	<p><b>Giudizio finale: scarso.</b> La tecnologia presenta buona efficacia nel trattamento degli idrocarburi volatili</p> <p>Occorre evidenziare, però, alcuni punti di debolezza:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. le caratteristiche idrogeologiche del sito (presenza in superficie di ghiaia e ballast, litologie eterogenee e soggiacenza bassa) non rappresentano le condizioni ideali per l'applicazione di questa tecnologia; in particolare a causa della bassa soggiacenza si richiederebbe l'impermeabilizzazione superficiale; tale intervento non è compatibile con l'utilizzo del sito;</li> <li>2. l'incompatibilità della presenza dell'impianto SVE con strutture (binari e capannoni).</li> <li>3. l'inefficacia nella bonifica della porzione di suolo saturo se non abbinata con altre tecnologie;</li> <li>4. la necessità di un controllo delle sostanze volatili anche in relazione alla presenza di personale in ambienti di lavoro.</li> </ol>
	Stabilizzazione /solidificazione	Parziale (scarsa efficacia su VOC)	Avanzato	SI	NO	NO	SI	Brevi	Medi	<p><b>Giudizio finale: scarso.</b> La tecnologia presenta scarsa efficacia nell'immobilizzazione dei contaminanti a natura organica presenti nei terreni. L'incompatibilità della tecnologia con gli spazi ristretti.</p>







**Acque di falda: rassegna delle principali tecnologie di bonifica applicabili al caso in esame**

Le principali tecnologie di bonifica delle acque di falda contaminate da idrocarburi applicabili al caso in esame sono le seguenti (Tab.5.2):

1. Pump & treat;
2. Air Sparging;
3. Ossidazione chimica;
4. Iniezione di ossigeno;
5. Barriere reattive permeabili.

Per ognuna di tali tecnologie è stata predisposta una scheda descrittiva riportata in allegato 3.

Scheda di valutazione tecnologie applicabili sulla falda sulla base degli inquinanti presenti									
Tecnologia	Efficacia abbattimento inquinanti	Grado di sviluppo	Applicabilità tecnica in sito	Compatibilità ad entrambi le matrici interessate	Necessità test preventivi	Produzione di residui	Tempi	Costi	Giudizio finale in merito all'applicabilità di ciascuna tecnologia al sito in esame
Pump and treat	Media	Avanzato	SI	SI	SI	NO	Medio alti	medi	<p><b>Giudizio finale: buono.</b> La tecnologia appare applicabile al caso in esame, a livello di:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. efficacia di abbattimento degli inquinanti presenti (dovranno essere effettuate opportune modifiche rispetto al sistema di aspirazione attualmente attivo);</li> <li>2. compatibilità l'utilizzo del sito.</li> </ol> <p>Occorre evidenziare, però, un punto di debolezza relativamente agli elevati tempi di bonifica e quindi elevati costi di gestione in considerazione sia della quantità di prodotto sversato e sia in considerazione del fatto che tale tecnica è già stata utilizzata in fase di messa in sicurezza e sembra aver quasi raggiunto il limite di efficacia. Ulteriore considerazione, non agendo sul suolo deve essere comunque abbinata ad un'altra tecnologia.</p>
Air sparging	Buona	Avanzato	NO	NO	SI	SI	Medi	Medi	<p><b>Giudizio finale: scarso.</b> La tecnologia presenta buona efficacia nel trattamento degli idrocarburi volatili.</p> <p>Occorre evidenziare, però, alcuni punti di debolezza:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. le caratteristiche idrogeologiche del sito (bassa permeabilità superficiale e bassa soggiacenza) non rappresentano le condizioni ideali per l'applicazione di questa tecnologia;</li> <li>2. l'incompatibilità della presenza dell'impianto con strutture ed capannoni adiacenti;</li> <li>3. l'inefficacia nella bonifica della porzione di suolo insaturo se non abbinata con altre tecnologie;</li> <li>4. la necessità di un controllo delle sostanze volatili anche in relazione alla presenza di lavoratori.</li> </ol>
Ossidazione chimica	Buona	Medio	SI	SI	SI (molto importante)	NO	Bassi	Medi	<p><b>Giudizio finale: discreto.</b> La tecnologia appare applicabile al caso in esame, a livello di:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. efficacia di abbattimento degli inquinanti presenti;</li> <li>2. compatibilità con le attività presenti sul sito tenendo in considerazione alcuni particolari accorgimenti.</li> </ol> <p>Dovranno essere effettuati test preventivi legati alla presenza di litologie eterogenee in superficie quindi risulta problematica la distribuzione areale del prodotto.</p> <p>Una limitazione è data dalla presenza superficiale del ballast (molto permeabile) che potrebbe essere una via di fuga verso la superficie per il prodotto iniettato. Ulteriore limitazione che dovrà essere anch'essa verificata con test pilota dovrà essere volta a verificare che l'iniezione del prodotto in pressione non generi dei cedimenti indotti nel terreno che potrebbero causare incidenti ferroviari.</p>



## 5.2 Scelta della migliore tecnologia applicabile nel sito

Viste le caratteristiche geologiche ed idrogeologiche particolari in cui si viene a trovare il sito, la tipologia e la distribuzione del contaminante, la modalità operativa che si va a proporre per la bonifica del sito di interesse è quella di procedere mediante due fasi (ai sensi dell'Art. 242, comma 7, così come modificato dal DL 201/11, convertito nella Legge 214/11). La prima fase consiste in un intervento di bonifica sulla sorgente contaminata, il cui obiettivo è l'eliminazione del prodotto separato dalle matrici interessate dall'inquinamento e l'abbattimento della massa totale di contaminante. Successivamente, quando la distribuzione degli inquinanti avrà le caratteristiche di frazione in partizione delle matrici ambientali, con condizioni di sistema stabili e geometrie delle sorgenti non più variabili, è ipotizzabile agire con un'ulteriore tecnologia di bonifica in situ con l'obiettivo di raggiungere le CSC di legge.

In base alle valutazioni effettuate nei capitoli precedenti, vista la presenza di una sorgente di contaminazione (gasolio surnatante) e considerate le caratteristiche geologiche ed idrogeologiche che caratterizzano l'area in esame, nonché la presenza di numerosi piezometri in aspirazione mediante un sistema di pompaggio automatico già presente nel sito, si ritiene che la migliore tecnologia adatta alle esigenze di bonifica sia in **una prima fase il Pump & Treat**. Tale scelta consentirà di migliorare l'estrazione di prodotto surnatante a fronte di un ridotto investimento economico. In primis, si ipotizza quindi di inserire un impianto di trattamento nel sito in modo da poter scaricare le acque emunte e trattate in pubblica fognatura. Si prevede di inserire una sezione con un disoleatore e successivamente una seconda sezione con filtri a carboni attivi.

I disoleatori sono degli impianti progettati per la separazione di benzine, oli, grassi e altre frazioni leggere dei prodotti petroliferi. Fondamentalmente esistono due tipi di disoleatori: il separatore a gravità o convenzionale e il separatore a coalescenza. Nel primo caso la disoleazione viene ottenuta riducendo la velocità dell'acqua da trattare e predisponendo una zona di calma, in modo tale da favorire

la sedimentazione, sul fondo del disoleatore, delle particelle in sospensione e la separazione delle sostanze oleose dall'acqua.

Il separatore a coalescenza è dotato di un filtro che favorisce la separazione delle sostanze oleose aumentando l'efficienza dell'intero impianto.

Per il caso in esame si prevede di utilizzare il disoleatore a coalescenza.

Il carbone attivo è una sostanza adsorbente che viene prodotta attivando chimicamente o termicamente alcune sostanze presenti in natura. Il carbone attivo viene posto all'interno di un silos, nel quale viene convogliata l'acqua e avviene l'adsorbimento delle fasi contaminanti. Quest'ultimo è un fenomeno superficiale di attrazione molecolare che si verifica al contatto di una fase solida (carbone attivo) e un fluido. Con questo sistema si raggiungono livelli di rimozione del contaminante dall'acqua superiori al 96 %. Le acque in uscita dalle due sezioni dovranno essere analizzate per verificare la conformità con i limiti previsti dal gestore della pubblica fognatura. Verrà allo scopo inserito un pozzetto di campionamento prima del collegamento alla fognatura. L'impianto di trattamento sarà dimensionato per avere una capacità teorica massima di trattamento pari a 5 m<sup>3</sup>/h.

Il sistema FILTRO A CARBONE (Fig.5.1) è basato su un processo depurativo di tipo fisico mirato a ridurre i seguenti parametri:

- Solventi clorurati;
- Oli minerali;
- Oli sintetici;
- Composti idrocarburici.



Fig.5.1: Il sistema filtro a carbone.

Le acque dalla cisterna di equalizzazione primaria verranno convogliate alle colonne a filtri-carbone mediante una pompa centrifuga. Nel caso di intasamento delle colonne, si procederà ad un controlavaggio con acqua trattata, opportunamente accumulata.

Il processo di controlavaggio assicura una costante efficienza del sistema filtrante.



Oltre all'implementazione del sistema Pump & Stock con un impianto di trattamento delle acque, potrebbe essere necessario mettere qualche skimmer nei punti ove c'è più presenza di surnatante. Gli skimmer sono delle speciali pompe pneumatiche galleggianti dotate di rulli, in grado di bonificare l'acqua in maniera meccanica. Queste pompe si suddividono in:

- Skimmer galleggianti: costituite da una membrana idrorepellente che permette la raccolta solo della fase oleosa surnatante. Il funzionamento si basa, pertanto, sulla differenza di tensione superficiale tra acqua e contaminante;
- Skimmer pneumatici: con queste pompe si ha la raccolta simultanea della fase surnatante e dell'acqua di falda, per poi separarle mediante una coppia di valvole comandate in modo pneumatico;
- Skimmer a nastro: queste pompe utilizzano un nastro assorbente per raccogliere la fase oleosa. Il nastro viene introdotto nel piezometro ed immerso nel surnatante, che verrà estratto in superficie.

Nel sito, oltre all'installazione di skimmer di tipo pneumatico, dovranno essere effettuati continui monitoraggi al fine di valutare l'andamento dello spessore del surnatante e la qualità delle acque in falda. A seguito dei monitoraggi, nel momento in cui lo spessore di surnatante sarà inferiore al millimetro, si potrà valutare la necessità di attivare **la fase 2 della bonifica**.

Una volta che la sorgente primaria (gasolio) è stata eliminata si realizzerà la seconda fase con l'obiettivo di raggiungere le CSC di legge. La prima operazione da effettuare sarà un test di fattibilità in laboratorio e in campo, al fine di verificare se le caratteristiche geologiche ed idrogeologiche del sito consentono di realizzare l'intervento in condizioni ottimali e per ottenere tutte le informazioni per una corretta progettazione dell'intervento.

Si ipotizza un intervento poco invasivo e con costi non eccessivi scelto tra quelli potenzialmente applicabili, quale ad esempio l'iniezione di ossigeno e la bioremediation (azione biodegradativa prodotta dai batteri). Oltre all'efficacia

tecnica dell'intervento è opportuno verificare se le continue iniezioni possono indurre dei cedimenti e minare la stabilità dei binari su cui transitano i treni. Durante il test pilota dovranno essere effettuati rilievi topografici sulla staticità dei binari mediante stazione totale con precisione millimetrica.

## 6. Conclusioni

Con la seguente tesi sono state prese in esame le attività condotte da una società di consulenza relative ad un caso reale. Il sito di interesse è situato a Porto Marghera (Venezia) in corrispondenza di un'area adiacente ai binari ferroviari dove nel dicembre 2013, a seguito del deragliamentamento di una ferrocisterna contenente del gasolio, si è verificata la fuoriuscita del combustibile sulla massicciata ferroviaria. Poiché l'area d'interesse si è dimostrata fin da subito complessa dal punto di vista amministrativo tali attività sono state, innanzitutto, inquadrare a livello normativo. Infatti il sito fino all'anno 2013 rientrava all'interno del perimetro del Sito di Interesse Nazionale di Porto Marghera e solamente con il D.M. del 24 Aprile 2013 ne è stato escluso. Ciò comporta che il procedimento di bonifica per il sito sia regolamentato non solo dalla normativa nazionale, costituita dal D.Lgs. 152/06, ma anche da specifici Accordi di Programma.

Per questo motivo una prima parte della tesi è stata rivolta all'analisi della normativa riguardante la bonifica dei siti contaminati, con particolare riferimento al D.Lgs. 152/06, ovvero al decreto che attualmente fornisce le procedure operative e amministrative con cui devono essere eseguiti il risanamento o la messa in sicurezza del sito oggetto di inquinamento; in particolare è stato analizzato l'Art. 249, il quale fornisce la procedura qualora il sito contaminato abbia un'area minore di 1000 mq, come nel caso in esame.

Successivamente, sono state descritte tutte le operazioni eseguite all'interno del sito durante gli interventi di Messa in Sicurezza d'Emergenza (MISE), le quali hanno messo in luce come il sito oggetto della tesi sia particolare anche dal punto di vista geologico ed idrogeologico. Infatti, attraverso l'analisi delle stratigrafie relative ai sondaggi eseguiti nel corso delle attività di MISE si è riscontrata una forte eterogeneità geologica; in particolare, si è notato come il caranto non sia sempre presente al di sotto del riporto, permettendo la diffusione della contaminazione nelle litologie sottostanti. Oltre alla geologia risulta molto complesso anche l'assetto idrogeologico, poiché attraverso i rilievi piezometrici della falda effettuati durante le operazioni di MISE, si è notata la presenza quasi

superficiale dei livelli idrici e un'interazione del regime piezometrico con il regime di marea, rendendo difficile la determinazione della direzione principale di deflusso e del gradiente idraulico.

Nel corso delle attività di MISE, che hanno comportato l'effettuazione di scavi, è stata evidenziata la presenza nel sottosuolo di rifiuti costituiti da ceneri di pirite, calce e legno, non imputabili allo sversamento, confermando l'ipotesi che lo sversamento sia avvenuto in una zona dove è possibile la presenza di contaminazione storiche legate a materiali di riporto utilizzati per l'imbonimento.

Attraverso le analisi chimiche eseguite sui campioni di terreno prelevati, si è accertato inoltre il superamento delle Concentrazioni Soglia di Contaminazione per BTEX, idrocarburi leggeri e idrocarburi pesanti nelle matrici terreno e acque sotterranee. A fronte di tali superamenti, in ottemperanza a quanto previsto dalla normativa vigente, si è reso necessario procedere alla fase di caratterizzazione del sito; è stato pertanto sviluppato dallo scrivente uno specifico Piano di Caratterizzazione (vedasi Cap.4), comprendente la proposta di alcune indagini integrative volte all'acquisizione di ulteriori dati utili alla definizione del modello concettuale del sito, a sua volta necessario ai fini dell'identificazione dell'intervento di bonifica da adottare.

A tal proposito, nella prima parte del Cap. 4 è stata affrontata la caratterizzazione climatica, approfondendo particolarmente i venti e le precipitazioni che interessano l'area in esame, poiché sono alcuni dei parametri ambientali sito-specifici necessari in previsione di un'eventuale Analisi di Rischio. Dopo di che, si è confrontato il modello geologico e idrogeologico dell'area con quello generale di Porto Marghera, al fine di acquisire informazioni sull'assetto geologico ed idrogeologico dell'area di interesse e per ottenere un più esaustivo e raffinato modello concettuale preliminare del sito.

Sulla base dell'inquadramento geologico e idrogeologico sito-specifico, unitamente alle informazioni ricavate dai sondaggi e dalle analisi chimiche eseguite durante le operazioni di MISE è stato sviluppato il modello concettuale preliminare del sito, secondo cui il sottosuolo e le acque sotterranee sono da considerarsi sorgente secondaria di contaminazione, mentre eventuali percorsi di

migrazione sono costituiti principalmente dalla migrazione in falda e dalla volatilizzazione. Queste modalità di migrazione sono dettate dall'alta costante di Henry e dalla bassa densità dei contaminanti rispetto all'acqua.

Dal momento che nonostante le numerose attività realizzate nell'ambito della Messa In Sicurezza d'Emergenza non si è giunti a circoscrivere completamente il plume e quindi a determinare l'estensione tridimensionale della contaminazione, è stato necessario, come anticipato in precedenza, sviluppare un piano di investigazione. Tale piano, elaborato dallo scrivente, contiene la proposta di una serie di indagini integrative ritenute necessarie al fine di confermare o meno quanto ipotizzato dal modello concettuale preliminare del sito, di circoscrivere il plume di contaminazione, di ottenere un quadro esaustivo delle caratteristiche chimico-fisiche delle matrici coinvolte nella contaminazione.

Nonostante il piano di investigazione non sia stato ad oggi ancora realizzato, le numerose informazioni ricavate nel corso delle operazioni di MISE (assetto stratigrafico del sito, misure dei livelli piezometrici, analisi chimiche su terreni e acque sotterranee) hanno consentito comunque di identificare una tecnologia di bonifica applicabile al sito.

In fase di selezione delle tecnologie gli obiettivi di bonifica sono stati posti pari alle Concentrazioni Soglia di Contaminazione (CSC) per i siti ad uso industriale/commerciale, facendo riferimento all'Allegato 4 del D.Lgs. 152/06; esso descrive i criteri generali per l'applicazione delle procedure semplificate ai siti di ridotte dimensioni (superfici inferiori ai 1000 mq, estensione entro cui rientra il sito oggetto della presente tesi), per i quali è possibile eseguire la bonifica riportando i valori di concentrazione dei contaminanti entro i valori di CSC riportati nell'Allegato 5 del D.Lgs. 152/06, senza elaborare l'analisi di rischio per calcolare le Concentrazioni Soglia di Rischio (CSR) come obiettivi di bonifica.

È stata quindi riportata una panoramica delle principali tipologie di trattamento degli inquinanti, a seguito della quale si è proceduto ad una selezione delle tecnologie applicabili sulla base di criteri quali:

- tipologia degli inquinanti presenti e relative caratteristiche chimico-fisiche;
- caratteristiche geologiche ed idrogeologiche del sito;
- contesto nel quale il sito si inserisce (edifici nelle vicinanze, presenza convogli ferroviari in transito).

Per ogni tecnologia, oltre all'efficacia di abbattimento dei contaminanti e all'applicabilità tecnica al sito sono stati considerati anche: grado di sviluppo, eventuale necessità di test preventivi, la produzione di residui, tempi e costi.

In base ai criteri suesposti ad ogni tecnologia è stato assegnato un giudizio finale, in base al quale è stato possibile identificare una tecnica di intervento applicabile al sito, nella fattispecie costituita dalla realizzazione di un sistema di Pump & Treat nel quale il trattamento delle acque viene effettuato mediante utilizzo di una sezione con disoleatore ed una sezione con filtri a carbone attivo. Il disoleatore permette la separazione tra la fase liquida e oleosa in modo meccanico, sfruttando la densità diversa esistente tra le due fasi, mentre i carboni attivi trattano le acque utilizzando fenomeni chimici come l'adsorbimento. Oltre a tale sistema di aspirazione potrebbe essere necessario inserire uno o più skimmer nei punti dove è maggiore la presenza di surnatante. Gli skimmer sono delle speciali pompe pneumatiche galleggianti dotate di rulli, in grado di bonificare l'acqua in maniera meccanica.

A seguito di adeguati monitoraggi, nel momento in cui lo spessore di surnatante sarà inferiore al millimetro, si potrà valutare la necessità di attivare **una fase 2 della bonifica** con l'obiettivo di raggiungere le CSC di legge, per la quale si ipotizza un intervento poco invasivo e con costi non eccessivi scelto tra quelli potenzialmente applicabili, quale ad esempio l'iniezione di ossigeno e la bioremediation (azione biodegradativa prodotta dai batteri). In questo caso, oltre all'efficacia tecnica dell'intervento sarà opportuno verificare se le continue iniezioni possono indurre dei cedimenti e minare la stabilità dei binari su cui transitano i treni.

# **Allegati**





# Allegato 1







## Stratigrafie eseguite durante le operazioni di MISE

### Fase 1






### Parete Nord

Quota (m)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio R.Q.D.	Profilo Test (logici)	Nome Test (MIS)	Composti	Nome campione	Car. Carotaggio (m)	Parametro (P) o Inclometro (I)
1		Terreno di riporto costituito da materiale di sottofondo della sede ferroviaria (Ballast) in matrice sabbioso-limosa color marrone	0.80	100			C1	Parete Nord C1	0.75	
		Terreno di riporto costituito da limi argillosi color nocciola con screziature ocracee	1.30	100						
2		Lim. sabbiosi color nocciola	3.20	100			C2	Parete Nord C2	2.75	
		Sabbie medio-fini color grigio	4.00	100						
4										

## Parete Est A

Cota (m)	Litologia	Descrizione	Quota	%Caricaggio R.Q.D.	Prove Test (kg/cm²)	Vib. Test (N/cm²)	Campioni	Nome campione	Clas. Cofretek	Vib.	Piezometro (P) o Inclometro (I)
1		Terreno di riporto costituito da materiale di sottofondo delle sede Ferroviaria (Ballast) in matrice limo-sabbiose color nocciola	0.50					C1			
		Terreno di riporto costituito da limi argillosi di color nocciola con rara ghiaia media	1.10								
		Lim. argillosi color nocciola con concrezioni calcaree e screziature ocracee	2.00								
2		Lim. sabbiosi color grigio nocciola con rare intercalazioni limo-argillose color grigio chiaro	3.70				C2			P.E. A C2 2.50	
			Sabbie debolmente limose color grigio	4.00							
4											

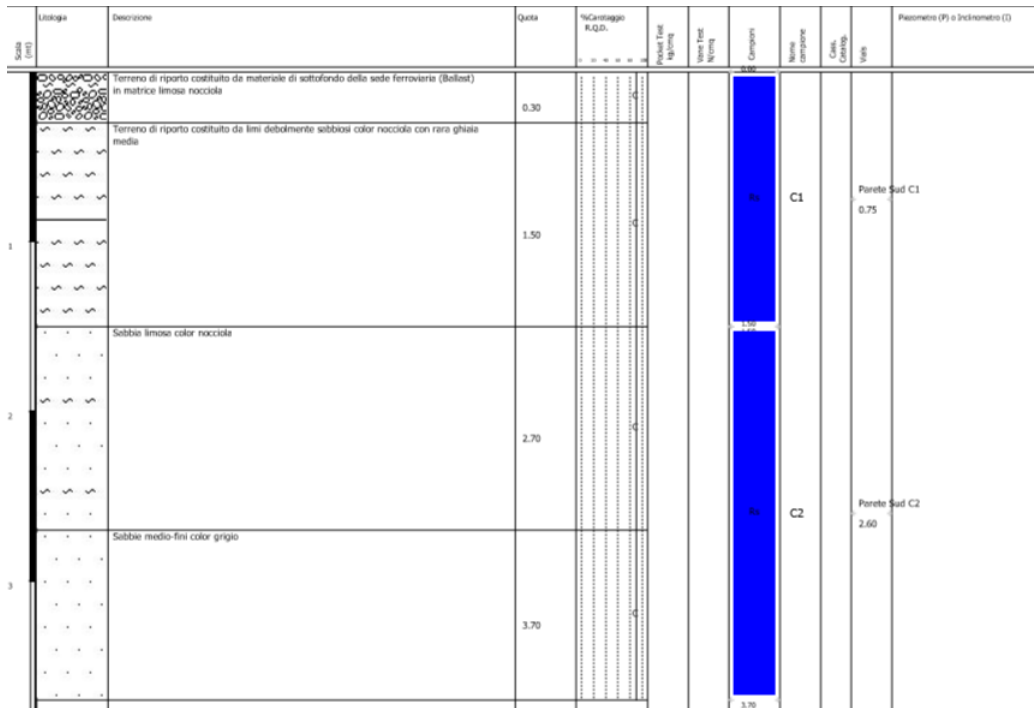
## Parete Est B

Cota (m)	Litologia	Descrizione	Quota	%Caricaggio R.Q.D.	Prove Test (kg/cm²)	Vib. Test (N/cm²)	Campioni	Nome campione	Clas. Cofretek	Vib.	Piezometro (P) o Inclometro (I)
1		Terreno di riporto costituito da materiale di sottofondo delle sede Ferroviaria (Ballast) in matrice limo-sabbiose color nocciola	0.50				C1				
			Terreno di riporto costituito da limi argillosi di color nocciola con screziature ocracee	2.00							
2		Sabbie limose color nocciola-grigio	2.60				C2				
			Sabbie debolmente limose color grigio	4.00							
4											

## Parete Est C

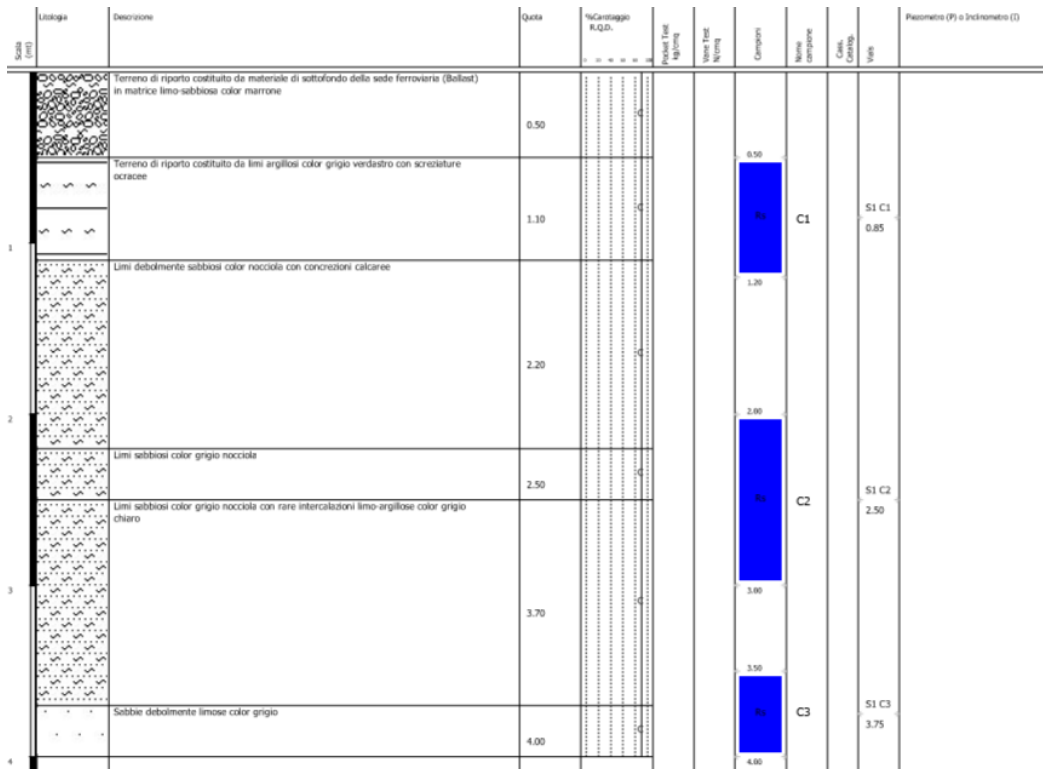


## Parete Sud



## Fase 2

### Sondaggio S1



### Sondaggio S2





## Sondaggio S5

Spazio (cm)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio R.Q.D.		Pesi (Kg)	Vene (cm)	Campioni	Nelle campione	Cali. Carotaggio	Viti	Pneumatico (P) o Idrometrico (I)
				0	1							
1		Terreno di riporto costituito da materiale di sottofondo delle sede ferroviaria (Ballast) in matrice limo-sabbiosa color marrone	0.40									
		Terreno di riporto costituito da limi argillosi color grigio-verdi	1.50									
2		Lim. debolmente sabbiosi color nocciola con concrezioni calcaree	2.00					1.50	C1			S5 C1 2.00
		Sabbie limose color nocciola	3.10					3.50				
3		Sabbie medio-fini color grigio	4.20									
			4.20									
4		Sabbie medio-fini color grigio	4.20					4.80	C2			S5 C2 4.30
			4.20									

## Sondaggio S6

Spazio (cm)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio R.Q.D.		Pesi (Kg)	Vene (cm)	Campioni	Nelle campione	Cali. Carotaggio	Viti	Pneumatico (P) o Idrometrico (I)
				0	1							
1		Terreno di riporto costituito da materiale di sottofondo delle sede ferroviaria (Ballast) in matrice limo-argillosa color grigio scuro	0.40									
		Terreno di riporto costituito da limi argillosi color grigio-verdi con screziature ocracee	1.70									
2		Lim. argillosi color nocciola con rare intercalazioni di sabbie limose fini color nocciola	2.70					2.80	C1			S6 C1 2.50
		Sabbie limose color nocciola	3.90					3.80				
3		Sabbie medio-fini color grigio	4.20									
			4.20									
4		Sabbie medio-fini color grigio	4.20					4.80	C2			S6 C2 4.10
			4.20									

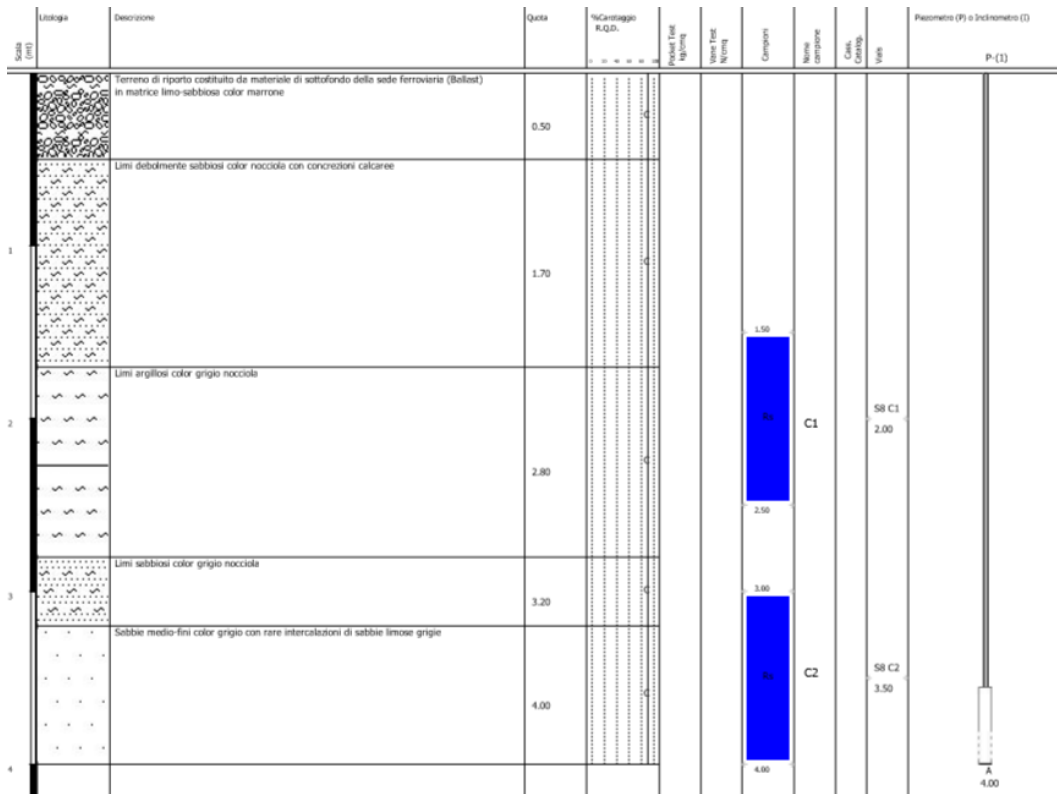
## Sondaggio S7

Prof. (m)	Litologia	Descrizione	Quota	%Caricaggio RQD	Pneumatic loggers	Misure RUMI	Caricanti	Misure empiriche	Ora. Casting	Veloc.	Resonetro (P) - Indicimetro (S)
0		Terreno di riporto costituito da materiale di sottorivolo della sede ferroviaria (ballast)									
0.30		Terreno di riporto costituito da ghiaia media in matrice limo-argillosa color grigio-nera	0.30								
0.90		Terreno di riporto costituito da limo argilloso color nocciola con rare intercazioni di sabbie fine nocciola e concrezioni calcaree	0.90								
1.30		Terreno di riporto costituito da limi argillosi color grigio-verdi con scrostature screece	1.30								
2.40		Limi sabbiosi color nocciola	2.40								
3.10		Limi argillosi color nocciola	3.10								
4.70		Sabbie limose medie color grigio	4.70								
4.90		Sabbie medie color grigio	4.90								
9.00		Sabbie medie color grigio	9.00								

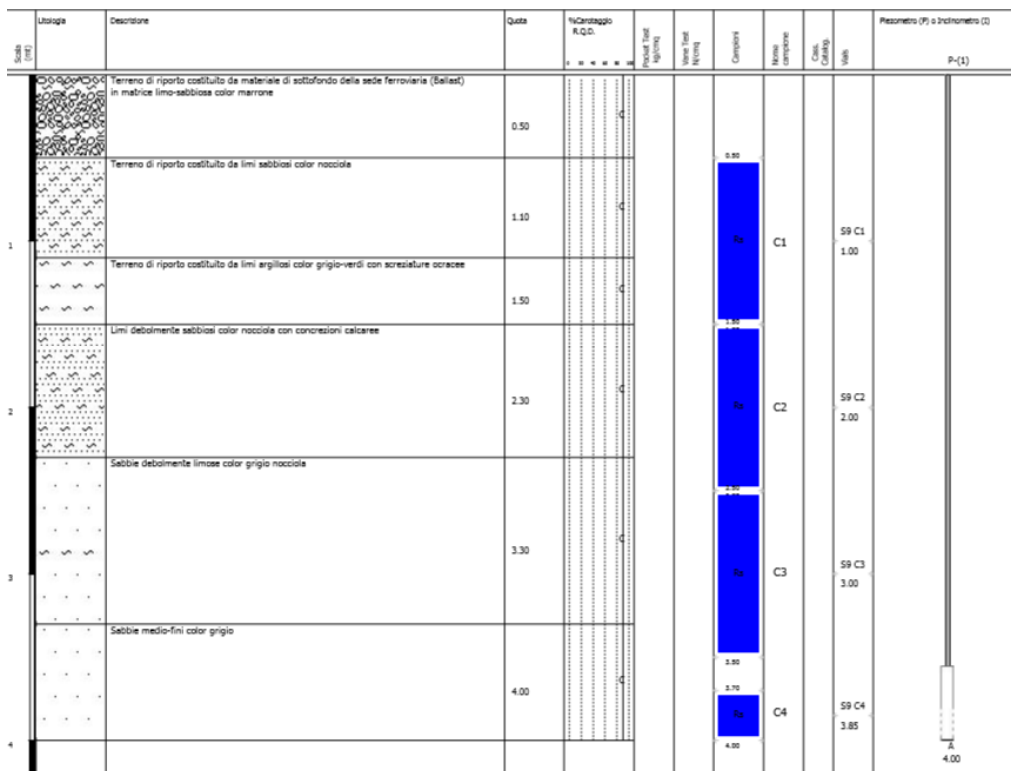
  

Prof. (m)	Caricanti	Misure empiriche	Ora. Casting	Veloc.	Resonetro (P) - Indicimetro (S)
1.30					
2.50		C1			S7 C1
3.50					
4.25		C2			S7 C2
4.00					
4.25					
4.00					

## Sondaggio S8



## Sondaggio S9





## Sondaggio S10

Scale (m)	Uso	Descrizione	Quota	%Caricamento R.Q.D.	Puntata (g/cm³)	Venne (M/cm)	Campioni	Messa campione	Cosa (C/M)	Vols	Pezometro (P) o Indinometro (I)
1		Terreno di riporto costituito da materiale di sottofondo delle sedi ferroviarie (Ballast) in matrice limo-sabbiosa color marrone	0.40								
		Limi sabbiosi color nocciola	0.90				0.90				
		Limi argillosi color nocciola con screziature ocree	1.40				1.40		C1		S10 C1 1.00
		Limi debolmente sabbiosi con concrezioni calcaree	1.80				1.80				
2		Sabbie debolmente limose color nocciola	3.10				2.00		C2		S10 C2 2.00
		Sabbie medio-fini color grigio	4.00				3.50		C3		S10 C3 3.00
3							3.75				
							4.00		C4		S10 C4 3.85
4											4.00

## Sondaggio S11

Scale (m)	Uso	Descrizione	Quota	%Caricamento R.Q.D.	Puntata (g/cm³)	Venne (M/cm)	Campioni	Messa campione	Cosa (C/M)	Vols	Pezometro (P) o Indinometro (I)
1		Terreno di riporto costituito da materiale di sottofondo delle sedi ferroviarie (Ballast) in matrice limo-sabbiosa color marrone	0.50								
		Terreno di riporto costituito da sabbie limose color nocciola	1.20								
		Limi argillosi nocciola con screziature ocree	1.70								
		Limi debolmente sabbiosi color nocciola con concrezioni calcaree	2.00								
2		Sabbie debolmente limose color nocciola	2.80				2.00		C1		S11 C1 2.50
		Sabbie medio-fini color grigio-nocciola	4.00				3.50		C2		S11 C2 3.75
3											
4											4.00



## Allegato 2

### Rilievi piezometrici effettuati durante le operazioni di MISE

Rilievo del 24/01/2014						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-1,280	-1,240	0,040	1,300
P2	2,618	2,438	-1,270	-1,260	0,010	1,168
P3	2,802	2,613	-1,080	0	0	1,533
P4	2,594	2,427	-0,890	-0,870	0,020	1,537
P5	2,573	2,500	-0,470	-0,460	0,010	2,030
P6	2,762	2,643	-0,740	0	0	1,903
P7	2,586	2,519	-0,885	-0,880	0,005	1,634
P8	2,605	2,551	-1,240	0	0	1,311
P9	2,659	2,436	-0,975	0	0	1,461

Rilievo del 29/01/2014						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-1,390	-1,230	0,160	1,190
P2	2,618	2,438	-1,200	-1,180	0,020	1,238
P3	2,802	2,613	-1,075	0	0	1,538
P4	2,594	2,427	-0,885	-0,795	0,090	1,542
P5	2,573	2,500	-0,380	0	0	2,140
P6	2,762	2,643	-0,832	-0,830	0,002	1,811
P7	2,586	2,519	-0,705	-0,700	0,005	1,814
P8	2,605	2,551	-1,150	-1,140	0,010	1,401
P9	2,659	2,436	-1,200	-1,170	0,030	1,236

Rilievo del 14/02/2014						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-0,420	-0,400	0,020	2,160
P2	2,618	2,438	-0,890	-0,820	0,070	1,548
P3	2,802	2,613	-0,870	0	0	1,743
P4	2,594	2,427	-0,450	0	0	1,977
P5	2,573	2,500	-0,480	-0,470	0,010	2,020
P6	2,762	2,643	-0,550	0	0	2,093
P7	2,586	2,519	-0,280	0	0	2,239
P8	2,605	2,551	-0,880	-0,870	0,010	1,671
P9	2,659	2,436	-0,530	-0,520	0,010	1,906

Rilievo del 17/02/2014						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-1,350	-1,330	0,020	1,230
P2	2,618	2,438	-1,330	-1,250	0,080	1,108
P3	2,802	2,613	-1,170	0	0	1,443
P4	2,594	2,427	-0,870	-0,650	0,020	1,757
P5	2,573	2,500	-0,980	-0,970	0,010	1,520
P6	2,762	2,643	-0,690	0	0	1,953
P7	2,586	2,519	/	/	/	/
P8	2,605	2,551	-1,400	0	0	1,151
P9	2,659	2,436	-1,230	-1,220	0,010	1,206

Rilievo del 22/02/2014						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-0,820	-0,810	0,010	1,760
P2	2,618	2,438	-1,330	-1,290	0,040	1,108
P3	2,802	2,613	-0,790	0	0	1,823
P4	2,594	2,427	-1,100	-1,080	0,020	1,327
P5	2,573	2,500	-1,160	0	0	1,340
P6	2,762	2,643	-0,860	0	0	1,783
P7	2,586	2,519	-1,160	0	0	1,359
P8	2,605	2,551	-1,330	-1,320	0,010	1,221
P9	2,659	2,436	-1,080	-1,050	0,010	1,376

Rilievo del 27/02/2014						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-1,530	-1,430	0,100	1,050
P2	2,618	2,438	-1,410	-1,350	0,060	1,028
P3	2,802	2,613	-1,220	0	0	1,393
P4	2,594	2,427	-0,950	-0,900	0,050	1,477
P5	2,573	2,500	-1,292	-1,287	0,005	1,208
P6	2,762	2,643	-1,170	-1,120	0,050	1,473
P7	2,586	2,519	-1,310	0	0	1,209
P8	2,605	2,551	-1,475	-1,425	0,050	1,076
P9	2,659	2,436	-1,380	-1,360	0,020	1,056

Rilievo del 12/03/2014						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-1,860	-1,410	0,450	0,720
P2	2,618	2,438	-1,540	-1,430	0,110	0,898
P3	2,802	2,613	-1,350	0	0	1,263
P4	2,594	2,427	-1,020	-0,980	0,040	1,407
P5	2,573	2,500	-1,320	0	0	1,180
P6	2,762	2,643	-1,300	0	0	1,343
P7	2,586	2,519	-1,330	0	0	1,189
P8	2,605	2,551	-1,490	-1,450	0,040	1,061
P9	2,659	2,436	-1,400	-1,390	0,010	1,036

Rilievo del 17/03/2014						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-2,140	-1,490	0,650	0,440
P2	2,618	2,438	-1,570	-1,480	0,110	0,868
P3	2,802	2,613	-1,480	0	0	1,153
P4	2,594	2,427	-1,360	-1,090	0,270	1,067
P5	2,573	2,500	-1,425	-1,420	0,005	1,075
P6	2,762	2,643	-1,230	0	0	1,413
P7	2,586	2,519	-1,430	0	0	1,089
P8	2,605	2,551	-1,800	-1,560	0,040	0,951
P9	2,659	2,436	-1,485	-1,480	0,005	0,951

Rilievo del 20/03/2014						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-1,890	-1,805	0,285	0,690
P2	2,618	2,438	-1,560	-1,535	0,025	0,878
P3	2,802	2,613	-1,540	0	0	1,073
P4	2,594	2,427	-1,240	-1,210	0,030	1,187
P5	2,573	2,500	-1,560	-1,555	0,005	0,940
P6	2,762	2,643	-1,360	0	0	1,283
P7	2,586	2,519	-1,500	0	0	1,019
P8	2,605	2,551	-1,870	-1,820	0,050	0,881
P9	2,659	2,436	-1,560	0	0	0,876

Rilievo del 24/03/2014						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-1,150	0	0	1,430
P2	2,618	2,438	-1,460	0	0	0,978
P3	2,802	2,613	-1,650	0	0	0,963
P4	2,594	2,427	-1,020	-0,950	0,070	1,407
P5	2,573	2,500	-1,380	-1,375	0,005	1,120
P6	2,762	2,643	-1,440	-1,350	0,090	1,203
P7	2,586	2,519	-1,370	0	0	1,149
P8	2,605	2,551	-1,580	0	0	0,971
P9	2,659	2,436	-1,235	-1,230	0,005	1,201

Rilievo del 26/03/2014						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-1,815	-1,800	0,015	0,770
P2	2,618	2,438	-1,485	-1,480	0,005	0,953
P3	2,802	2,613	-1,540	0	0	1,073
P4	2,594	2,427	-1,020	-0,970	0,050	1,407
P5	2,573	2,500	-1,483	-1,480	0,003	1,017
P6	2,762	2,643	-1,510	-1,470	0,040	1,133
P7	2,586	2,519	-1,440	0	0	1,079
P8	2,605	2,551	-1,710	0	0	0,841
P9	2,659	2,436	-1,520	-1,510	0,010	0,916

Rilievo del 31/03/2014 - Misura eseguita a fine ciclo						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-2,270	0	0	0,310
P2	2,618	2,438	-1,910	0	0	0,528
P3	2,802	2,613	-2,420	0	0	0,193
P4	2,594	2,427	-1,700	-1,630	0,070	0,727
P5	2,573	2,500	-1,580	-1,570	0,010	0,920
P6	2,762	2,643	-1,490	-1,380	0,110	1,153
P7	2,586	2,519	-1,510	0	0	1,009
P8	2,605	2,551	-1,870	-1,850	0,020	0,881
P9	2,659	2,436	-1,590	-1,560	0,030	0,846

Rilievo del 31/03/2014 - Misura eseguita a fine pausa						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-1,750	-1,740	0,010	0,830
P2	2,618	2,438	-1,585	-1,575	0,010	0,853
P3	2,802	2,613	-1,830	0	0	0,783
P4	2,594	2,427	-1,320	-1,290	0,030	1,107
P5	2,573	2,500	-1,580	-1,570	0,010	0,920
P6	2,762	2,643	-1,500	-1,380	0,120	1,143
P7	2,586	2,519	-1,510	0	0	1,009
P8	2,605	2,551	-1,670	-1,650	0,020	0,881
P9	2,659	2,436	-1,590	-1,560	0,030	0,846

Rilievo del 02/04/2014						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-1,870	-1,690	0,180	0,710
P2	2,618	2,438	-1,660	-1,580	0,080	0,778
P3	2,802	2,613	-1,560	0	0	1,053
P4	2,594	2,427	-1,240	-1,180	0,060	1,187
P5	2,573	2,500	-1,605	-1,600	0,005	0,895
P6	2,762	2,643	-1,610	-1,410	0,200	1,033
P7	2,586	2,519	-1,510	0	0	1,009
P8	2,605	2,551	-1,710	-1,690	0,020	0,841
P9	2,659	2,436	-1,630	-1,600	0,030	0,806

Rilievo del 04/04/2014 - Misura eseguita a fine ciclo						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-1,790	-1,75	0,040	0,790
P2	2,618	2,438	-1,680	-1,64	0,040	0,758
P3	2,802	2,613	-1,470	0	0	1,143
P4	2,594	2,427	-1,280	-1,23	0,050	1,147
P5	2,573	2,500	-1,645	-1,64	0,005	0,855
P6	2,762	2,643	-1,680	-1,44	0,240	0,963
P7	2,586	2,519	-1,530	0	0	0,989
P8	2,605	2,551	-1,760	-1,72	0,040	0,791
P9	2,659	2,436	-1,650	-1,64	0,010	0,786

Rilievo del 04/04/2014 - Misura eseguita a metà pausa						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-1,790	-1,750	0,040	0,790
P2	2,618	2,438	-1,690	-1,640	0,050	0,748
P3	2,802	2,613	-1,480	0	0	1,133
P4	2,594	2,427	-1,280	-1,230	0,050	1,147
P5	2,573	2,500	-1,645	-1,640	0,005	0,855
P6	2,762	2,643	-1,680	-1,440	0,240	0,963
P7	2,586	2,519	-1,520	0	0	0,999
P8	2,605	2,551	-1,760	-1,720	0,040	0,791
P9	2,659	2,436	-1,655	-1,645	0,010	0,781

Rilievo del 04/04/2014 - Misura eseguita a fine pausa						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-1,795	-1,750	0,045	0,785
P2	2,618	2,438	-1,695	-1,640	0,055	0,743
P3	2,802	2,613	-1,490	0	0	1,123
P4	2,594	2,427	-1,280	-1,230	0,050	1,147
P5	2,573	2,500	-1,650	-1,645	0,005	0,850
P6	2,762	2,643	-1,690	-1,450	0,240	0,953
P7	2,588	2,519	-1,520	0	0	0,999
P8	2,605	2,551	-1,780	-1,720	0,040	0,791
P9	2,659	2,438	-1,655	-1,645	0,010	0,781

Rilievo del 11/04/2014 - Misura eseguita a fine ciclo						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-2,300	-2,290	0,010	0,280
P2	2,618	2,438	-1,780	-1,770	0,010	0,658
P3	2,802	2,613	-2,060	0	0	0,553
P4	2,594	2,427	-1,660	-1,630	0,030	0,767
P5	2,573	2,500	-1,700	-1,690	0,010	0,800
P6	2,762	2,643	-2,010	-2,000	0,010	0,633
P7	2,588	2,519	-1,530	0	0	0,989
P8	2,605	2,551	-2,020	-2,010	0,010	0,531
P9	2,659	2,438	-1,780	-1,770	0,010	0,658

Rilievo del 11/04/2014 - Misura eseguita a metà pausa						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-1,900	-1,940	0,020	0,620
P2	2,618	2,438	-1,720	-1,710	0,010	0,718
P3	2,802	2,613	-1,920	0	0	0,693
P4	2,594	2,427	-1,540	-1,500	0,040	0,887
P5	2,573	2,500	-1,700	-1,690	0,010	0,800
P6	2,762	2,643	-1,910	-1,890	0,020	0,733
P7	2,588	2,519	-1,580	0	0	0,959
P8	2,605	2,551	-1,850	-1,840	0,010	0,701
P9	2,659	2,438	-1,700	-1,690	0,010	0,736

Rilievo del 11/04/2014 - Misura eseguita a fine pausa						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-1,860	-1,850	0,010	0,720
P2	2,618	2,438	-1,710	-1,700	0,010	0,728
P3	2,802	2,613	-1,870	0	0	0,743
P4	2,594	2,427	-1,490	-1,450	0,040	0,937
P5	2,573	2,500	-1,700	-1,690	0,010	0,800
P6	2,762	2,643	-1,820	-1,810	0,010	0,823
P7	2,588	2,519	-1,570	0	0	0,949
P8	2,605	2,551	-1,810	-1,800	0,010	0,741
P9	2,659	2,438	-1,690	-1,680	0,010	0,746

Rilievo del 17/04/2014 - Misura eseguita a fine pausa						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2.694	2.580	-1,950	-1,840	0,110	0,630
P2	2.618	2.438	-2,040	-1,660	0,380	0,398
P3	2.802	2.613	-1,790	0	0	0,823
P4	2.594	2.427	-1,550	-1,370	0,180	0,877
P5	2.573	2.500	-1,765	-1,760	0,005	0,735
P6	2.762	2.643	-1,750	-1,680	0,070	0,893
P7	2.586	2.519	-1,800	0	0	0,919
P8	2.605	2.551	-1,855	-1,825	0,030	0,696
P9	2.659	2.436	-1,750	-1,730	0,020	0,686

Rilievo del 17/04/2014 - Misura eseguita a fine ciclo						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2.694	2.580	-2,490	0	0	0,090
P2	2.618	2.438	-1,980	-1,830	0,150	0,458
P3	2.802	2.613	-1,790	0	0	0,823
P4	2.594	2.427	-1,860	-1,830	0,030	0,567
P5	2.573	2.500	-1,765	-1,760	0,005	0,735
P6	2.762	2.643	-2,340	0	0	0,303
P7	2.586	2.519	-1,800	0	0	0,919
P8	2.605	2.551	-2,110	-2,095	0,015	0,441
P9	2.659	2.436	-1,910	-1,900	0,010	0,526

Rilievo del 24/04/2014 - Misura eseguita a fine ciclo						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2.694	2.580	-2,380	0	0	0,200
P2	2.618	2.438	-1,930	-1,920	0,010	0,508
P3	2.802	2.613	-1,800	0	0	0,813
P4	2.594	2.427	-1,650	-1,620	0,030	0,777
P5	2.573	2.500	-1,780	-1,775	0,005	0,720
P6	2.762	2.643	-2,150	0	0	0,493
P7	2.586	2.519	-1,550	0	0	0,969
P8	2.605	2.551	-2,130	-2,118	0,012	0,421
P9	2.659	2.436	-1,884	-1,873	0,011	0,552

Rilievo del 24/04/2014 - Misura eseguita a fine pausa						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2.694	2.580	-1,920	-1,830	0,090	0,660
P2	2.618	2.438	-1,880	-1,700	0,180	0,558
P3	2.802	2.613	-1,800	0	0	0,813
P4	2.594	2.427	-1,540	-1,430	0,110	0,887
P5	2.573	2.500	-1,760	-1,755	0,005	0,740
P6	2.762	2.643	-1,720	-1,710	0,010	0,923
P7	2.586	2.519	-1,550	0	0	0,969
P8	2.605	2.551	-1,850	-1,810	0,040	0,701
P9	2.659	2.436	-1,760	-1,730	0,030	0,676



Rilievo del 29/04/2014 - Misura eseguita a fine ciclo						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-2,350	0	0	0,230
P2	2,618	2,438	-1,890	-1,885	0,005	0,548
P3	2,802	2,613	-1,770	0	0	0,843
P4	2,594	2,427	-1,600	-1,575	0,025	0,827
P5	2,573	2,500	-1,770	0	0	0,730
P6	2,762	2,643	-2,000	0	0	0,643
P7	2,586	2,519	-1,510	0	0	1,009
P8	2,605	2,551	-2,050	-2,035	0,015	0,501
P9	2,659	2,438	-1,780	-1,770	0,010	0,656

Rilievo del 29/04/2014 - Misura eseguita a fine pausa						
Piezometro	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota bocca pozzo (m s.l.m.)	Livello falda bocca pozzo (m)	Livello surnatante (m da b.p.)	Spessore surnatante (metri)	Quota falda (m s.l.m.)
P1	2,694	2,580	-1,990	-1,910	0,080	0,590
P2	2,618	2,438	-1,820	-1,670	0,150	0,618
P3	2,802	2,613	-1,770	0	0	0,843
P4	2,594	2,427	-1,575	-1,450	0,125	0,852
P5	2,573	2,500	-1,730	-1,720	0,010	0,770
P6	2,762	2,643	-1,755	-1,745	0,010	0,888
P7	2,586	2,519	-1,505	0	0	1,014
P8	2,605	2,551	-1,810	-1,780	0,030	0,741
P9	2,659	2,438	-1,690	-1,680	0,010	0,746



## Allegato 3

### Descrizione delle tecnologie applicabili per la bonifica dei terreni

#### Scavo e smaltimento/trattamento

N	Caratteristiche	Descrizione
1	Descrizione	<p>Il conferimento in discarica è una alternativa di bonifica che consiste nella rimozione dei materiali contaminati dal sito (scavo), dal loro trasporto e collocazione in apposite aree progettate per contenere in sicurezza tali materiali (impianti di smaltimento).</p> <p>Il conferimento in discarica è sempre associato alla preventiva qualificazione del materiale mediante test analitici di laboratorio tendenti a classificarlo e contestualmente a verificare l' idoneità al conferimento presso impianti di smaltimento. Preliminarmente all' operazione di conferimento il materiale viene sottoposto ad omologa e controllato anche durante i conferimenti. Esistono varie tipologie di discariche in funzione della tipologia di materiali contaminati che possono raccogliere (discariche per pericolosi, per non pericolosi).</p>
2	Contaminazione per la quale il metodo è applicabile	La soluzione del collocamento in discarica è una alternativa applicabile a qualunque tipo di contaminazione del suolo. La tipologia di discarica utilizzabile risulta tuttavia legata alle caratteristiche della contaminazione presente.
3	Grado di sviluppo della tecnologia	La tecnologia è ampiamente collaudata.
4	Necessità di test preliminari	Sono necessari test analitici specifici (test di cessione, ecc.) per poter classificare il materiale e contestualmente per verificare l' idoneità al conferimento presso le diverse tipologie di discariche.
5	Durata di trattamento	La durata dell' intervento è estremamente breve (legata ai tempi di scavo e trasporto dei materiali contaminati presso la discarica).
6	Costi di trattamento	I costi, incluso il trasporto, variano in funzione della tipologia di discarica necessaria per la specifica contaminazione dei materiali del sito. Nel caso di materiale classificabile come non pericoloso possono variare da 90 a 110 €/ton, mentre nel caso in cui il materiale risultasse pericoloso i costi possono essere sicuramente maggiori (fino a 500 €/t).
7	Svantaggi e/o limitazioni	<p>Capacità non illimitata ed in esaurimento delle discariche.</p> <p>Richiedono la movimentazione scavo e trasporto delle matrici contaminate (impatto ambientale).</p> <p>Profondità elevate di scavo richiedono opere di sostegno e/o pendenze tali che la tecnologia può risultare inapplicabile qualora vi siano edifici limitrofi o aree di non elevata superficie.</p>

## Soil vapor extraction

N	Caratteristiche	Descrizione
1	Descrizione	<p>Il principio fisico del SVE è costituito dalla volatilità della maggior parte dei composti idrocarburici.</p> <p>Questa tipologia di sostanze è rappresentata in larga parte da molti idrocarburi clorurati (tricloroetilene, tetracloroetilene, cloroformio, metilcloroformio, etc..), da idrocarburi aromatici (benzene, toluene, xilene, etc..), da oli minerali leggeri e metano.</p> <p>Non è possibile applicare il SVE su contaminanti inorganici e su organici dotati di pressione di vapore bassa.</p> <p>La pressione di vapore delle sostanze fornisce, infatti, un'indicazione fondamentale sull'applicabilità e la fattibilità di rimozione dei composti presenti nel terreno: il SVE è applicabile a composti che hanno una pressione di vapore maggiore di 0,1 kPa o 0,5 mmHg (a 20°C) ed una solubilità in acqua relativamente bassa.</p> <p>In seguito alla ventilazione del suolo, indotta da uno o più pozzi di estrazione di vapori, s'instaurano condizioni dinamiche che portano da un lato allo strippaggio dei composti presenti in fase gassosa e dall'altro ad un'ulteriore volatilizzazione dei composti volatili. Le sostanze volatili, che evaporano fino a quando non si esauriscono la fase liquida e solida, sono convogliate verso il punto di estrazione dal sottosuolo.</p> <p>Operativamente il SVE si colloca tra le tecnologie di trattamento in situ e consiste nella realizzazione di pozzi o dreni di estrazione vapori, finestrati a differenti profondità e tenuti in depressione per mezzo di idonei sistemi di aspirazione; i gas estratti vengono avviati a sistemi di abbattimento degli idrocarburi quali Ossidazione termica, Ossidazione Catalitica od Adsorbimento con carboni attivi.</p> <p>L'estrazione di gas dal sottosuolo, da una parte consente di controllare ed intercettare la migrazione di composti volatili presenti (es. metano, idrocarburi leggeri ed organo alogenati), dall'altra favorisce lo spostamento dell'equilibrio di ripartizione liquido-gas degli idrocarburi verso la fase vapore, determina il prelievo forzato di gas interstiziale dal suolo, liberando il terreno dalle frazioni di idrocarburi ad elevata volatilità.</p>
2	Contaminazione per la quale il metodo è applicabile	<p>Sostanze volatili: idrocarburi clorurati (tricloroetilene, tetracloroetilene, cloroformio, metilcloroformio, etc..), idrocarburi aromatici (benzene, toluene, xilene, etc..), oli minerali leggeri e metano.</p>
3	Grado di sviluppo della tecnologia	<p>La tecnologia viene ampiamente utilizzata per il risanamento del sottosuolo insaturo soprattutto nei siti in cui non risulta realizzabile l'escavazione dei materiali contaminati (es. presenza di edifici abitati, ecc.).</p>
4	Necessità di test preliminari	<p>La ventilazione in suolo risulta una tecnica relativamente facile e poco costosa per rimuovere sostanze organiche volatili dalla zona insatura di terreno contaminato.</p> <p>L'efficacia del processo è funzione di alcuni fattori, dai quali dipendono sia la mobilità dei contaminanti e sia la permeabilità del suolo all'aria:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>umidità</b>, l'incremento del contenuto d'acqua riduce il flusso d'aria e, quindi, la diffusione;</li> <li>• <b>contenuto organico</b>, un incremento nell'adsorbimento (che solitamente avviene su matrice organica) riduce la concentrazione delle sostanze volatili nell'aria interstiziale e, quindi, riduce la loro diffusione;</li> </ul>

N	Caratteristiche	Descrizione
4	Necessità di test preliminari	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>granulometria</b>, in particolare il sistema risulta applicabile in terreni con conducibilità idraulica elevata.</li> </ul> <p>Ed i fattori che possono contribuire all'efficacia dell'intervento sono rappresentati da:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>temperatura</b>, un incremento della temperatura comporta una maggiore concentrazione in saturazione nell'aria interstiziale e, quindi, un incremento di diffusione;</li> <li>• <b>costante di Henry</b>, parametro che indica il grado di partizione tra fase disciolta (o libera) e fase gassosa. Sostanze con elevata costante di Henry, presentano maggiore tendenza alla diffusione.</li> </ul> <p>È necessario pertanto condurre test di fattibilità in campo sia per verificare direttamente se le caratteristiche sito specifiche consentono di realizzare le condizioni ottimali alla ventilazione, sia per ottenere le informazioni necessarie alla corretta progettazione dell'intervento.</p> <p>Per predisporre un sistema di SVE efficace relativamente alle caratteristiche specifiche del sito, al tipo di contaminazione ed alla sua distribuzione nel sottosuolo vengono infatti realizzati test pilota su campi prova che prevedono:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• punti di estrazione vapori (tubazioni in PVC da 2" a 12", generalmente con fessurazione da 2 mm) finestrati a differenti profondità;</li> <li>• punti di monitoraggio attrezzati con sonde per il rilevamento dei gas interstiziali a differenti profondità;</li> <li>• unità di estrazione vapori (es. ventilatori, etc.);</li> <li>• unità di trattamento dei vapori mediante bruciatore catalitico o carboni attivi.</li> </ul>
5	Durata di trattamento	<p>La durata effettiva del SVE è funzione della necessità di liberare tutti i pori del terreno dai gas interstiziali contaminati da idrocarburi volatili e di spostare l'equilibrio liquido-gas il più possibile verso la fase gassosa. In funzione dell'area contaminata di interesse, dello spessore di terreno da trattare, della porosità efficace del suolo, si valuta il volume di gas interstiziale da coinvolgere e si dimensionano gli impianti, prestando attenzione a garantire la copertura totale dell'area.</p> <p>La durata dell'intervento è mediamente a lungo termine (mesi o anni di intervento).</p>
6	Costi di trattamento	I costi di intervento risultano competitivi (20-140 €/ton).
7	Svantaggi e/o limitazioni	<p>Non applicabile per certe condizioni del sito (es. bassa permeabilità all'aria dei suoli, alto contenuto di argilla, suoli altamente eterogenei, presenza di sostanze poco volatili).</p> <p>Non sempre si possono raggiungere gli standard normativi di concentrazione ritenuti accettabili (soprattutto nei casi di suoli ad uso residenziale con grado di contaminazione iniziale medio-alto).</p> <p>Consente il trattamento del solo suolo insaturo (nel caso in cui la contaminazione interessi parzialmente anche il suolo saturo e le acque di falda sono necessarie altre tecnologie).</p>

## Solidificazione e stabilizzazione

N	Caratteristiche	Descrizione
1	Descrizione	<p>La tecnologia di solidificazione e stabilizzazione consiste nel <b>miscelare (trattamento ex-situ) oppure iniettare (trattamento in-situ) una miscela di leganti al terreno contaminato.</b></p> <p>L'applicazione ex situ, rispetto a quella in situ garantisce la massima omogeneizzazione con i leganti, soprattutto nel caso di terreni addensati ed a granulometria fine. La tecnologia per la solidificazione e stabilizzazione del terreno contaminato può essere, di norma, facilmente applicata anche in condizioni on-site in quanto non sono richiesti impianti complessi e possono, almeno in parte, essere utilizzate attrezzature mobili già disponibili commercialmente quali quelle idonee a realizzare gli impasti di calcestruzzo (autobetoniere o impianti di miscelazione continui).</p> <p>La tecnologia è molto efficace per il trattamento di materiali contaminati da metalli, ciò è dovuto alla contemporanea presenza di due processi di immobilizzazione. Il processo di solidificazione comporta l'immobilizzazione fisica dei metalli i quali rimangono contenuti all'interno di una matrice solida a bassissima permeabilità. Il processo di stabilizzazione invece comporta l'immobilizzazione chimica dei metalli i quali assumono una forma poco solubile in dipendenza sia di una variazione di pH (generalmente alcalino il quale consente la precipitazione di idrossidi di diversi metalli) sia di altre reazioni con i leganti addizionati (silicati, ecc.). Tuttavia, quest'ultimo aspetto può, in alcuni casi, avere un effetto relativo sul complessivo grado di immobilizzazione di alcuni metalli (Hg non forma idrossidi a bassa solubilità, alcuni metalli formano anioni come CrVI o As). In questi casi risulta maggiormente importante effettuare una corretta formulazione e miscelazione dei leganti inorganici utilizzati (cemento, pozzolana, ceneri, sabbie di fonderia, ecc.) od organici (bitumi, ecc.) al fine di formare una adeguata struttura cristallina, vetrosa o polimerica attorno ai contaminanti.</p>
2	Contaminazione e per la quale il metodo è applicabile	<p>È una tecnica comunemente applicata nel caso di contaminazione da metalli pesanti. Tuttavia, grazie alla corretta formulazione dei leganti ed all'aggiunta di particolari additivi, questa tecnica può essere utilizzata anche nel caso di contaminazione mista, tra metalli pesanti e sostanze organiche come ad esempio gli IPA.</p>
3	Grado di sviluppo della tecnologia	<p>La tecnologia risulta ampiamente sviluppata. Esistono numerosi brevetti commerciali (processi e miscele di additivi leganti) studiati per il trattamento di casi particolarmente complicati.</p>
4	Necessità di test preliminari	<p>Gli studi di trattabilità sono sempre necessari al fine di stabilire anticipatamente l'efficienza del trattamento e la necessità di eventuali aggiunte di additivi o pretrattamento del suolo. L'efficacia della tecnologia dipende da vari fattori tra cui la litologia del suolo contaminato e la tipologia della contaminazione presente. Soprattutto nel caso in cui la contaminazione sia costituita da una miscela complessa di contaminanti (sia di natura inorganica che organica), è necessario effettuare preliminarmente alcuni test mirati a valutare l'efficacia di diverse formulazioni di leganti. Le valutazioni sull'efficacia del processo vengono effettuate attraverso l'esecuzione di test di cessione. Inoltre devono essere valutate le caratteristiche di solidità e di durata del manufatto inertizzato (friabilità, ecc).</p>
5	Durata di trattamento	<p>La durata del trattamento è tipicamente a medio-breve termine.</p>
6	Costi di trattamento	<p>Il costo del trattamento è competitivo e generalmente varia tra 20 e 60 €/ton, escludendo i costi di escavazione e movimentazione del terreno.</p>

N	Caratteristiche	Descrizione
7	Svantaggi e/o limitazioni	<p>Questa tecnologia non è idonea per l'applicazione a terreni che contengono elevate concentrazioni di sostanze organiche o da sostanze volatili.</p> <p>Nel caso di presenza di contaminanti volatili (Hg, VOC) il riscaldamento dovuto alla reazione di idratazione del cemento può generare emissioni di vapori contaminanti in atmosfera che necessitano di un impianto di abbattimento.</p> <p>Alcuni metalli anfoteri (As, CrVI) possono divenire più mobili nell'ambiente fortemente alcalino che si genera dalla miscelazione con alcuni leganti (es. cemento, calce).</p> <p>La presenza di terreni particolarmente fini (argille) ostacola notevolmente la miscelazione con i leganti e rende inefficace l'applicazione in situ.</p> <p>Possono essere necessari trattamenti preliminari al fine di separare materiale di pezzatura grossolana (ciottoli e sassi maggiori di 60 mm di diametro), essiccare la matrice contaminata, eliminare contaminanti volatili, omogeneizzare il materiale e miscelare particolari additivi leganti alla matrice contaminata.</p> <p>Se il materiale inertizzato può essere riutilizzato come materiale di riempimento o sottofondo stradale (previa verifica con test di cessione in acqua deionizzata) deve essere smaltito come inerte.</p>

## Selezione e lavaggio (soil washing)

N	Caratteristiche	Descrizione
1	Descrizione	La tecnologia di Soil washing è una <b>tecnologia ex-situ</b> e si basa sulla selezione del terreno in due o più frazioni di differente granulometria e sul lavaggio di tali frazioni. La selezione viene condotta effettuando, dopo una vagliatura grossolana, la dispersione del terreno in acqua (contenente eventualmente additivi) in appositi miscelatori-disgregatori e vagliando con setacci di diverse dimensioni la sospensione ottenuta. Successivamente le frazioni a granulometria maggiore (ghiaie e sabbie) possono subire un ulteriore lavaggio. La frazione più fine, sulla quale tendono a concentrarsi i contaminanti, non è sempre semplice da recuperare e in alcuni processi questa viene inviata a discarica, in altri anche questa viene trattata o con soluzioni acquose estraenti o con solventi organici. Per questi motivi tale tecnologia è efficace per il recupero del terreno quando non è presente una elevata frazione argillosa o limo argillosa.
2	Contaminazione per la quale il metodo è applicabile	Usando gli additivi opportuni nella soluzione di lavaggio la tecnologia può essere applicata sia per contaminazioni da metalli sia per contaminazioni organiche come composti organici volatili (alogenati e non), prodotti petroliferi (gasoli, oli, JP-5), pesticidi, oli pesanti anche contenenti PCB. La tecnologia si applica anche con terreni ad elevate concentrazioni di ingresso e, dalla frazione del suolo a granulometria grossolana (sabbie e ghiaie o terreni sabbiosi con contenuto di limi e argille < 30%), si ottengono elevate rese di rimozione dei contaminanti.
3	Grado di sviluppo della tecnologia	Allo stato attuale, la tecnologia risulta maggiormente sviluppata in Europa rispetto agli Stati Uniti. Durante il periodo 1986-1989, la tecnologia è comunque stata selezionata per il risanamento di 8 siti del programma Superfund.
4	Necessità di test preliminari	Prima di selezionare questa tecnologia per la bonifica di un sito è sempre necessario condurre uno studio di trattabilità in scala pilota. Sono infatti numerosi i parametri che possono influenzare l'efficacia del trattamento: distribuzione granulometrica del suolo (range ottimale tra 0,24 e 2 mm o più), la tipologia e concentrazione dei contaminanti presenti, il contenuto di sostanza organica, la capacità di scambio cationico, il pH e la capacità tampone del suolo.
5	Durata di trattamento	La durata del trattamento di Soil washing è tipicamente a medio-breve termine. Questa dipende dalla capacità di trattamento dell'impianto e dal volume di suolo da trattare. Tipicamente la capacità di trattamento di un impianto mobile on site è dell'ordine di 20 - 200 cubic yards per day.
6	Costi di trattamento	Il costo medio, incluso lo scavo, è compreso tra 170-330 €/ton. Varia in funzione delle condizioni sito specifiche, e degli obiettivi quantitativi e qualitativi della bonifica.
7	Svantaggi e/o limitazioni	Contaminazioni complesse del suolo (es. dovute alla contemporanea presenza di metalli e contaminanti organici) rende più complessa la corretta formulazione del fluido di lavaggio. Un alto contenuto di sostanza organica nel suolo (es. acidi umici) può richiedere un pretrattamento. Le acque di lavaggio devono essere depurate. Possono essere necessari stadi di trattamento finale volti ad eliminare completamente la presenza delle acque di lavaggio contaminate dal suolo trattato. Risulta in genere complicata la rimozione dei contaminanti organici dalle particelle fini del terreno (limi e argille). Ciottoli e sassi maggiori di 60 mm di diametro generalmente devono essere rimossi prima del trattamento. Il trattamento on site necessita della disponibilità di aree per la collocazione dell'impianto di lavaggio e per lo stoccaggio di terreno necessario al processo.



## Soil Flushing

N	Caratteristiche	Descrizione
1	Descrizione	Si tratta di una tecnologia applicabile <b>in-situ</b> che si basa sulla lisciviazione dei contaminanti presenti nel terreno mediante ricircolo di una soluzione acquosa. Può essere applicata con efficacia per la rimozione di tutti i contaminanti che non siano fortemente adsorbiti al terreno. Nella soluzione acquosa vengono aggiunti additivi in grado di spostare gli equilibri di partizione a favore della soluzione acquosa o solubilizzare forme insolubili dei contaminanti. Può essere applicata sia a contaminazioni dovute a metalli sia a quelle da sostanze organiche. Nel caso in cui gli equilibri di partizione, nonostante gli additivi aggiunti, siano a favore del terreno, possono essere necessari molti ricambi del volume delle porosità (nelle quali circola la soluzione estraente) prima di ottenere la rimozione dei contaminanti dal terreno. La soluzione acquosa estraente può essere distribuita sulla superficie del suolo, iniettata alle profondità più opportune mediante pozzi di iniezione o somministrata mediante trincee di infiltrazione. Gli additivi aggiunti alla soluzione iniettata (es. EDTA, acidi, reattivi redox, tensioattivi, ecc.) sono gli stessi utilizzabili per il soil washing che rappresenta un trattamento in linea di principio uguale ma condotto sul terreno scavato. L'applicazione della tecnologia richiede di poter mettere in atto un efficace sistema di captazione e recupero delle acque di drenaggio ( <i>pump and treat</i> ) che dovranno essere opportunamente trattate e possibilmente riutilizzate.
2	Contaminazioni e per la quale il metodo è applicabile	La tecnologia risulta applicabile per numerose tipologie di contaminanti del suolo sia di tipo organico (NAPLs, VOCs, SVOCs, PCBs, pesticidi alogenati, diossine e furani, cianuri e acidi organici) sia di tipo inorganico (sostanze corrosive, metalli volatili e non, cianuri e materiali radioattivi).
3	Grado di sviluppo della tecnologia	La tecnologia si è dimostrata idonea per il risanamento di numerosi siti contaminati ed è stata utilizzata in almeno 16 siti nel progetto Superfund (Stati Uniti). L'applicazione in Italia non è ancora diffusa (verificata su impianti a scala pilota).
4	Necessità di test preliminari	L'applicabilità della tecnologia risulta fortemente dipendente dalle caratteristiche geologiche ed idrogeologiche del sito contaminato e pertanto risulta indispensabile condurre uno studio di fattibilità approfondito anche con test in campo.
5	Durata di trattamento	La durata dell'applicazione della tecnologia è a lungo termine (mesi o anni) in quanto legata agli equilibri di ripartizione tra i contaminanti ed il fluido di ricircolo (sebbene questo possa essere additivato con appositi agenti chimici per accelerarne il processo). La durata del trattamento aumenta nel caso in cui siano presenti contaminanti in fase libera (NAPLs).
6	Costi di trattamento	I costi di applicazione della tecnologia possono essere compresi tra 75-250 €/ton di suolo contaminato e risultano dipendenti dalle quantità e tipologie di additivi utilizzati.
7	Svantaggi e/o limitazioni	Questa tecnologia non risulta applicabile nei casi in cui: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. il suolo presenti caratteristiche di bassa permeabilità (deve essere generalmente maggiore di <math>10^{-5}</math> m/s) e quando i terreni da trattare presentino condizioni di eterogeneità;</li> <li>2. non sia possibile installare un efficace sistema di captazione della soluzione di drenaggio.</li> </ol>

N	Caratteristiche	Descrizione
7	Svantaggi e/o limitazioni	<p>Risulta molto complesso poter prevedere la durata del trattamento. La presenza di manufatti interrati nell'area di intervento (basamenti, tubazioni, ecc.) o la possibile presenza di altre cause di ostacolo o di cammini preferenziali può compromettere l'efficienza del trattamento.</p> <p>L'utilizzo di determinati additivi può causare fenomeni di precipitazione che causano la diminuzione delle caratteristiche di permeabilità del sottosuolo.</p> <p>L'impossibilità di recuperare gli additivi dalle acque emunte può causare un aumento dei costi di trattamento. L'introduzione di sostanze chimiche nel sottosuolo (additivi) e che possano rimanervi tracce a fine trattamento può non risultare accettabile (a tal fine è utile valutare la facilità di biodegradazione dei co-solventi che si intende utilizzare).</p>

## Biocumulo (Biopile)

N	Caratteristiche	Descrizione
1	Descrizione	Questa tecnologia consiste nella realizzazione di un sistema reagente confinato dove i processi di degradazione ad opera dei microrganismi (naturalmente presenti o aggiunti) possano avvenire in condizioni opportune. Il sistema viene allestito con il terreno che è stato sottoposto a trattamenti preliminari di condizionamento e il confinamento può essere ottenuto mediante copertura con telo impermeabile o mediante apposite strutture. Nel biocumulo sono installate tubazioni per l'apporto di ossigeno e all'occorrenza di acqua e nutrienti.
2	Contaminazione per la quale il metodo è applicabile	Applicabile per la decontaminazione di terreni contenenti idrocarburi del petrolio (benzine, gasoli, JP-5, kerosene, oli combustibili, oli lubrificanti, BTEX). Poiché, rispetto ad un trattamento biologico di tipo in situ, si hanno maggiori possibilità di ottenere e mantenere le condizioni ottimali per l'attività biologica di degradazione tale sistema risulta efficace anche su composti organici con basse velocità di biodegradazione. Non è efficace per i metalli pesanti ed è scarsamente efficace per i composti organici recalcitranti PCB, diossine e IPA ad alto numero di anelli. Può non essere efficace con suoli ad elevate concentrazioni di contaminanti organici (es. maggiori di 50.000 ppm TPH).
3	Grado di sviluppo della tecnologia	La tecnologia è attualmente ben collaudata per casi di contaminazione da idrocarburi del petrolio, non recalcitranti, a medio baso peso molecolare. L'applicazione su altre tipologie di contaminanti è possibile sebbene ancora in fase di ricerca o applicata su test pilota.
4	Necessità di test preliminari	I fattori che influenzano l'applicabilità del biorisanamento sono molteplici, pertanto è sempre necessario procedere con accurati test di biotrattabilità in scala laboratorio e spesso anche in scala maggiore.
5	Durata di trattamento	Sebbene inferiori rispetto ad un trattamento biologico in situ, sono necessari tempi lunghi di trattamento (dell'ordine di diversi mesi o anni).
6	Costi di trattamento	Per contro i costi sono estremamente competitivi: 30-90 €/ton di suolo contaminato.
7	Svantaggi e/o limitazioni	Sono molto difficili da ottenere rese di abbattimento superiori al 95% e concentrazioni residue dei contaminanti minori di 0,1 ppm. Possono essere necessari trattamenti preliminari al fine di omogeneizzare il materiale, separare materiale di pezzatura grossolana, creare condizione di umidità ottimale (essiccazione o umidificazione), aggiungere nutrienti, ammendanti o inoculi di biomassa specializzata. La presenza di una significativa concentrazione di metalli pesanti (generalmente maggiore di 2.500 ppm) può inibire la crescita dei microrganismi. I composti organici molto volatili tendono ad evaporare piuttosto che ad essere biodegradati. I vapori generati durante l'aerazione devono essere trattati prima di essere immessi in atmosfera. Richiede elevate aree di trattamento, sebbene minori del landfarming. Può richiedere un sistema di raccolta delle acque di percolazione ed il loro successivo trattamento e/o smaltimento.

## Barriere di contenimento

N.	Tecnica applicabile	Descrizione di sintesi	Euro/m <sup>2</sup> (verticale)
1	Diaframma in suolo-bentonite o cemento-bentonite	La forma più semplice di barriera ed escavazione è la barriera argillosa, realizzata mediante una trincea riempita di materiale argilloso, si sostituisce al terreno originario un materiale a bassa permeabilità (suolo-bentonite o cemento-bentonite).	100-200
2	Diaframma in calcestruzzo plastico	La miscela impermeabilizzante utilizzata per riempire la trincea, in questo caso è costituita da acqua, bentonite, cemento ed inerti. Si utilizza quando sono richieste elevate caratteristiche di resistenza meccanica.	200-400
3	Palizzata in pannelli di acciaio	Il tipo di palizzata tradizionale viene realizzato per infissione di palancole accostate, dello spessore di 0,01 - 0,02 m e dagli svariati profili tipo. Le palancole vengono assemblate fuori terra in numero opportuno e vengono installate nel terreno con battitura tramite martello a pressione o con vibrazioni raggiungendo la profondità massima di 20 m.	100-200
4	<i>Jet grouting</i> (Cementazione per iniezione di malta fluida ad elevata pressione)	Nella versione comune a colonne secanti, in un primo momento si realizza un foro in genere di 100 mm di diametro quindi, dopo aver raggiunto la profondità di progetto (anche 20-30 m), si inserisce nel foro un dispositivo rotante con annesso alla base un sistema di ugelli diretti orizzontalmente. Un getto fluido viscoso (cemento, bentonite, acqua) viene spinto fuori dagli ugelli ad una velocità molto alta dovuta alla pressione di 200-600 bar indotta nel condotto di perforazione. Il getto scioglie il terreno circostante al foro, portando in superficie il materiale asportato e creando di conseguenza un sottile disco circolare che viene simultaneamente riempito con la sospensione indurente. Il contemporaneo movimento verticale verso l'alto dello strumento fa sì che si formi una colonna cilindrica cementata. Ripetendo tale procedura operativa ad una distanza opportuna tale da avere una compenetrazione nella prima colonna e un numero di volte necessario, si perviene alla barriera di colonne secanti impermeabili realizzate per gettiniezione.	150-300
5	<i>Deep soil mixing</i> Miscelazione di suolo in profondità	Questa tecnica consiste nell'inserimento nel terreno di un sistema multiplo di alberi rotanti (almeno tre) con calettate delle eliche miscelatrici le quali determinano un rimescolamento del suolo. Gli alberi sono cavi all'estremità inferiore, ciò consente l'iniezione nel sottosuolo di una miscela fangosa a base di bentonite. Ripetendo la procedura ora descritta si ottiene una barriera continua formata da una serie di colonne dello spessore di 50-90 cm.	100-200
6	Geomembrane	La tenuta idraulica dei muri delle barriere laterali realizzate con lo scavo di una trincea può essere migliorata utilizzando in aggiunta ad una delle tecniche descritte una geomembrana. Si utilizzano pannelli in materiale sintetico come HDPE e PVC che vengono inseriti nel terreno e saldati tra loro. L'inserimento avviene tramite moduli speciali che poi vengono sfilati oppure tramite escavazione di strette trincee dove vengono inseriti i fogli.	100-300
7	Iniezione per permeazione di miscele liquide autoindurenti	Si procede all'iniezione di un fluido viscoso in fori di sondaggio ad una pressione inferiore a quelle di rottura del terreno, al fine di saturare i vuoti intergranulari esistenti. Tale tecnica è applicabile i suoli molto permeabili, a granulometria sabbiosa e/o ghiaiosa e con scarsa frazione fine.	100-200

## Bioremediation

N	Caratteristiche	Descrizione
1	Descrizione	La bioremediation è una tecnologia <b>in-situ</b> utile nel bonificare il terreno saturo ed insaturo. Questa tecnica consente la riduzione delle concentrazioni dei composti organici, nel suolo/ sottosuolo e nelle acque sotterranee, favorendo l'incremento dell'attività biodegradativa prodotta dai batteri naturalmente presenti nel terreno inquinato, o da batteri appositamente selezionati in laboratorio ed inseriti nel suolo da trattare. L'attività microbica viene stimolata mediante la circolazione di soluzione acquose, contenenti nutrienti, ossigeno e altri ammendanti, nei terreni contaminanti. I microrganismi utilizzano le sostanze inquinate come nutrimento per la propria sintesi e come fonte di energia.
2	Contaminazione per la quale il metodo è applicabile	Questa tecnologia è utilizzata per bonificare suolo, fanghi e acque sotterranee contaminate da derivati del petrolio, solventi, pesticidi, conservanti del legno e altri prodotti chimici organici. In particolare, gli inquinanti più trattati sono: IPA, SVOCs non alogenati e BTEX.
3	Grado di sviluppo della tecnologia	Medio.
4	Necessità di test preliminari	<p>Per la selezione di questa tecnologia si devono valutare:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>densità delle popolazioni microbiche:</b> molto importante è la presenza del terreno di microbi capaci di biodegradare i contaminanti;</li> <li>• <b>pH:</b> la biodegradazione è più rapida quando il pH è prossimo alla neutralità;</li> <li>• <b>umidità:</b> condiziona la biodisponibilità dei contaminanti, il trasferimento dei gas e dell'ossigeno e il trasporto dei nutrienti;</li> <li>• <b>temperatura:</b> condiziona la crescita microbica. La degradazione è massima a temperature comprese tra +10°C e +45°C;</li> <li>• <b>concentrazione dei nutrienti:</b> i microrganismi hanno bisogno di azoto, fosforo e carbonio, quindi risulta molto importante il rapporto C/N/P;</li> <li>• <b>permeabilità e granulometria del terreno:</b> influenzano il grado di diffusione dell'ossigeno e dei nutrienti nel sottosuolo.</li> </ul> <p>Le caratteristiche dei contaminanti da valutare sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>struttura chimica:</b> influenza la durata del trattamento;</li> <li>• <b>concentrazione e tossicità:</b> concentrazioni troppo elevate nel terreno influenzano la crescita degli organismi, mentre concentrazioni troppo basse inibiscono la crescita dei ceppi batterici;</li> <li>• <b>volatilità:</b> i contaminanti volatili in presenza di aria tendono a volatilizzare anziché biodegradarsi.</li> </ul>
5	Durata di trattamento	La durata può risultare lunga in base alla temperatura del sottosuolo.
6	Costi di trattamento	Il costo di questa tecnica varia da 30 €/m <sup>3</sup> a 100 €/m <sup>3</sup> , in funzione alle caratteristiche geologiche del sito, alle caratteristiche del contaminante, al tipo e all'entità della contaminazione.
7	Svantaggi e/o limitazioni	Gli obiettivi di bonifica prefissati possono non essere raggiunti se la matrice del terreno impedisce il contatto fra i contaminanti e i microrganismi, Lo

N	Caratteristiche	Descrizione
		<p>sviluppo di colonie batteriche può creare fenomeni di intasamento, impedendo il flusso dei fluidi iniettati. Non può essere usato in terreni dove lo scambio di ossigeno è limitato e dove esistono percorsi preferenziali, i quali diminuiscono il contatto tra le soluzioni iniettate e i contaminanti. Alte concentrazioni di metalli pesanti, composti clorurati e idrocarburi a catena lunga o sali inorganici, possono essere tossici per i ceppi batterici. Il tempo necessario alla biodegradazione degli inquinanti può risultare lungo, quindi spesso deve essere affiancata ad un'altra tecnologia di bonifica.</p>

## Descrizione delle tecnologie applicabili per la bonifica delle acque sotterranee

### Pump & Treat

N	Caratteristiche	Descrizione
1	Descrizione	Vengono prelevate acque sotterranee contaminate impedendone la migrazione verso valle e producendo il risanamento dell'acquifero. Le acque devono essere trattate prima dello scarico o del riutilizzo. Ad esempio, in caso di acque di falda contaminate da composti volatili organici alogenati, tali acque una volta estratte, sono trattate tramite strippaggio e l'adsorbimento con carboni attivi. Tale tecnologia viene spesso adottata con lo scopo principale di contenere la contaminazione creando una barriera idraulica che interrompe il diffondersi degli inquinanti. In caso di presenza di LNAPL (combustibili, BTEX) occorre progettare il sistema in modo tale da recuperare la fase libera usando i sistemi a una (pompa tipo skimmer) o due pompe.
2	Contaminazione per la quale il metodo è applicabile	Viene largamente applicato alla fase solubile dei contaminanti presenti nelle acque sotterranee. La tecnologia risulta applicabile per numerose tipologie di contaminanti del suolo di tipo organico e non (Idrocarburi in generale, Organo clorurati, metalli).
3	Grado di sviluppo della tecnologia	Ampiamente collaudata e utilizzata.
4	Necessità di test preliminari	E' necessario pertanto condurre delle prove di pompaggio (al fine di ottimizzare il prelievo e raggiungere la massima efficacia) soprattutto nel caso di realizzazione di una barriera idraulica.
5	Durata di trattamento	La durata dell'intervento è mediamente a lungo termine (mesi o anni di intervento) soprattutto in caso di assenza di interventi sulla sorgente di contaminazione primaria (ad es. terreni contaminati).
6	Costi di trattamento	I costi del trattamento sono variabili (10-100 €/m <sup>3</sup> di acqua trattata) e dipendono da diversi fattori:  <ol style="list-style-type: none"> <li>1. la portata emunta da trattare;</li> <li>2. la concentrazione dell'inquinante nelle acque estratte;</li> <li>3. il tempo di trattamento;</li> <li>4. il luogo di trattamento (in situ-ex situ).</li> </ol>
7	Svantaggi e/o limitazioni	I principali svantaggi e/o limitazioni sono i seguenti: in caso di presenza di contaminanti poco solubili:  <ol style="list-style-type: none"> <li>1. si hanno lunghi tempi di intervento,</li> <li>2. possono verificarsi anche fenomeni di rimbalzo e di decrescita asintotica delle concentrazioni.</li> <li>2. tempi lunghi in assenza di interventi sulla sorgente di contaminazione primaria.</li> <li>3. produzione di possibili interferenze con prelievi di acque sotterranee limitrofi;</li> <li>4. necessità di un impianto di trattamento delle acque (in situ o ex-situ);</li> <li>5. bassa permeabilità (&lt;10<sup>-5</sup> cm/s) e/o elevata eterogeneità dell'acquifero.</li> </ol>

## Air Sparging

N	Caratteristiche	Descrizione
1	Descrizione	<p>La tecnica IAS (<i>In Situ Air Sparging</i>) prevede l'immissione di aria atmosferica in pressione nella zona satura del sottosuolo. L'aria iniettata sposta l'acqua e riempie le porosità della formazione, volatilizzando e rimuovendo la fase disciolta ed adsorbita.</p> <p>Si ottiene così la rimozione fisica per volatilizzazione dei composti volatili e la stimolazione delle attività di biodegradazione aerobica, sia dei composti disciolti che di quelli adsorbiti. Molto spesso questa tecnica viene utilizzata in accoppiamento con la SVE che, prevedendo l'installazione di pozzi di aspirazione capaci di creare una depressione nella zona insatura e che recuperano i vapori migrati nel mezzo insaturo, migliora l'efficienza complessiva del processo.</p>
2	Contaminazione per la quale il metodo è applicabile	Questa tecnologia è stata sviluppata per la bonifica delle falde inquinate principalmente da Idrocarburi da petrolio, BTEX, benzine e COV in generale.
3	Grado di sviluppo della tecnologia	Ben collaudata.
4	Necessità di test preliminari	E' necessario pertanto condurre test di fattibilità in campo sia per verificare direttamente se le caratteristiche sito specifiche consentono di realizzare le condizioni ottimali, sia per ottenere le informazioni necessarie alla corretta progettazione dell'intervento.
5	Durata di trattamento	In dipendenza dal terreno, mediamente da 2 a 24 mesi.
6	Costi di trattamento	<p>In generale i costi variano tra 20-200 €/m<sup>3</sup> di terreno trattato. In particolare, si evidenzia che l'IAS risulta essere:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. il sistema più economico in suoli che presentano meno del 30% di limi e argille;</li> <li>2. competitivo in situazioni che richiedono il trattamento di 20.000 ton. e oltre.</li> </ol> <p>Sui costi incidono prevalentemente:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. la preparazione del sito,</li> <li>2. le caratteristiche dei suoli,</li> <li>3. il limite di concentrazione degli inquinanti da ottenere,</li> <li>4. il costo di pre – trattamento,</li> <li>5. la concentrazione iniziale dei contaminanti,</li> <li>6. la profondità della contaminazione.</li> </ol>
7	Svantaggi e/o limitazioni	<p>Ridotta permeabilità dell'acquifero.</p> <p>Presenza di prodotto in fase libera con spessore &gt; 15 cm.</p> <p>Inoltre, il flusso di aria può essere non uniforme e si possono creare percorsi preferenziali che limitano la zona di influenza del trattamento e ne diminuiscono l'efficacia.</p>



## Ossidazione chimica

N	Caratteristiche	Descrizione
1	Descrizione	<p>La realizzazione dell'intervento prevede l'iniezione nella matrice contaminata (suolo insaturo od acqua) di una miscela reagente contenente un opportuno agente ossidante che consente la completa trasformazione del contaminante in anidride carbonica ed acqua o, quantomeno, la sua trasformazione parziale in sostanze o strutture molecolari più semplici e quindi più facilmente degradabili.</p> <p>Gli ossidanti applicati a questo processo generalmente sono: ozono, perossido di idrogeno, permanganato di potassio, persolfato di sodio, ossigeno puro.</p> <p>Un agente ossidante comunemente applicato per questo tipo di interventi è il reattivo di fenton, ovvero perossido di idrogeno addizionato di ferro che funge da catalizzatore, in tal maniera si ha la formazione di radicali idrossidi altamente ossidanti per le specie chimiche organiche.</p>
2	Contaminazione per la quale il metodo è applicabile	Gli interventi di ossidazione chimica in-situ possono essere applicati nella bonifica di siti contaminati da composti organici, quali idrocarburi, solventi clorurati, policlorofenoli, esplosivi.
3	Grado di sviluppo della tecnologia	Medio.
4	Necessità di test preliminari	È necessario pertanto condurre test di fattibilità prima in laboratorio e poi campo sia per verificare direttamente se le caratteristiche sito specifiche consentono di realizzare le condizioni ottimali, sia per ottenere le informazioni necessarie alla corretta progettazione dell'intervento.
5	Durata di trattamento	In dipendenza dal terreno, mediamente da 6 a 24 mesi.
6	Costi di trattamento	Questa metodologia risulta solitamente vantaggiosa da un punto di vista economico, evitando costi relativi alla mobilitazione del suolo contaminato. In generale i costi variano tra 65-130 €/t di terreno trattato.
7	Svantaggi e/o limitazioni	<p>I principali punti di debolezza, invece, sono:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. mancanza di dati di letteratura sulla efficienza nel trattamento dei DNAPL;</li> <li>2. la potenziale mobilitazione di metalli pesanti (comunque da verificare con il test di laboratorio);</li> <li>3. l'introduzione in falda di livelli elevati di solfati e l'abbassamento del pH;</li> <li>4. l'eventualità di dovere effettuare ulteriori iniezioni in falda;</li> <li>5. possibili costi elevati in presenza di terreni con elevata presenza di materia organica (comunque da verificare con il test di laboratorio).</li> </ol> <p>Infine, la sua applicazione può risultare problematica in presenza di formazioni litologiche a bassa permeabilità o di marcata eterogeneità.</p>

## Iniezione di ossigeno

N	Caratteristiche	Descrizione
1	Descrizione	Iniezione di ossigeno puro in falda per stimolare l'attività batterica aerobica autoctona (incremento delle cinetiche di degradazione biologica).
2	Contaminazione per la quale il metodo è applicabile	Contaminazione di origine idrocarburica (Idrocarburi, BTEX, MTBE) nella matrice acque di falda.
3	Grado di sviluppo della tecnologia	Medio.
4	Necessità di test preliminari	Lo studio delle componenti biologiche (indagini microbiologiche, al microscopio, test di tossicità) consentono di realizzare le condizioni ottimali e ricercare la presenza di ceppi batterici specifici alla rimozione della contaminazione presente. Può essere valutato il raggio di influenza della tecnologia tramite l'iniezione di gas inerti (es. neon, Kripron) che non essendo soggetti al consumo per attività biologica o per reazioni chimiche consentono di identificare la velocità di avanzamento del fronte del gas.
5	Durata di trattamento	Trattasi si una tecnologia con tempi di risanamento medio-lunghi.
6	Costi di trattamento	Questa metodologia risulta vantaggiosa da un punto di vista economico, evitando costi relativi alla mobilitazione del suolo contaminato.
7	Svantaggi e/o limitazioni	I principali punti di debolezza, invece, sono: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. condizioni idonee ad una biotecnologia;</li> <li>2. tempo medio-lunghi;</li> <li>3. monitoraggi fenomeni di rebounding.</li> </ol>

## Barriere reattive permeabili

N	Caratteristiche	Descrizione
1	Descrizione	<p>Le barriere reattive permeabili (<i>Permeable Reactive Barrier</i> – PRB) consistono in un trattamento di tipo passivo di una contaminazione a carico della falda. Il principio su cui si basano è relativamente semplice: del materiale reattivo viene posto all'interno del sistema acquifero, in modo da essere attraversato dall'acqua contaminata che si muove per effetto del gradiente naturale. I processi chimico-fisici che avvengono all'interno della barriera consentono di degradare, immobilizzare o adsorbire il contaminante nella fase di attraversamento.</p> <p>Gli studi più promettenti si rivolgono all'utilizzo di ferro zerovalente (Fe<sup>0</sup>) quale mezzo reattivo per convertire alcuni contaminanti a specie non tossiche. Le configurazioni più diffuse di barriera reattiva sono:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Funnel and Gate</i></li> <li>2. trincea continua</li> </ol> <p>La configurazione <i>Funnel and Gate</i> prevede l'utilizzo di una barriera a bassa permeabilità a forma di imbuto (funnel) per indirizzare il flusso di acqua, dalla regione contaminata, ad una zona di trattamento permeabile (gate). Il gate viene scavato, normalmente, mediante l'utilizzo di benne o di escavatori a braccio rovescio e poi riempito del materiale reagente. Il funnel impermeabile viene, invece, realizzato mediante diaframmi plastici o palancole in acciaio. Nella configurazione a trincea continua, il plume viene intercettato per intero dal materiale reagente. Questa soluzione, non sempre più economica, consente di non alterare in maniera significativa le originarie condizioni di deflusso sotterraneo oltre ad essere più semplice dal punto di vista progettuale</p>
2	Contaminazione per la quale il metodo è applicabile	Le barriere reattive permeabili sono indicate per l'intercettazione ed il trattamento della frazione solubile di una contaminazione a carico del sistema acquifero. I contaminanti che è possibile rimuovere con una barriera reattiva a Fe <sup>0</sup> sono: composti organici alogenati, composti organici aromatici (BTEX), metalli, oltre a solfati, nitrati, fosfati.
3	Grado di sviluppo della tecnologia	Le barriere reattive permeabili con ferro granulare sono state installate efficacemente in più di cinquanta siti, una quarantina delle quali in Nord America, principalmente per la degradazione di VOC e di solventi clorurati. Molto numerosi sono inoltre gli studi a scala di laboratorio e pilota.
4	Necessità di test preliminari	E' necessario condurre test di fattibilità in laboratorio, sulla base dei dati sitospecifici, al fine di ottenere le informazioni necessarie alla corretta progettazione della barriera reattiva (ad es. quale tipo di ferro zerovalente presente in commercio occorre utilizzare).
5	Durata di trattamento	In linea generale, se non avvengono fenomeni di malfunzionamento (v. riga n. 7), la barriera, una volta installata, funziona, per una decina di anni prima di essere soggetta a manutenzione (in alcuni casi si arriva fino a 15 anni).
6	Costi di trattamento	I costi del trattamento dipendono sostanzialmente dalla superficie della barriera reattiva che deve essere posizionata nel sito e quindi dalla quantità di reagente che deve essere utilizzata. Il quantitativo di reagente è, a sua volta, principalmente funzione delle concentrazioni di contaminanti presenti nella falda e del grado di abbattimento che si desidera ottenere. Essendo una tecnologia innovativa non sono presenti dati generali ed attendibili sui costi di realizzazione e gestione delle barriere in oggetto. In generale, una stima di massima dei costi (che dipendono molto dalla tipologia di reagente commerciale scelto) è attorno ai 250-350 €/m <sup>2</sup> di barriera.

N	Caratteristiche	Descrizione
7	Svantaggi e/o limitazioni	<p>La barriera perde nel tempo la sua reattività e quindi deve essere sostituita se non sono ancora stati raggiunti i limiti di bonifica.</p> <p>Inoltre, all'interno della barriera possono verificarsi fenomeni di precipitazione che possono portare alla diminuzione della permeabilità della barriera stessa. Nel caso in cui la barriera venga utilizzata per la precipitazione di metalli, non si hanno dati sufficienti a garantire l'efficienza del trattamento nel tempo a seguito della possibilità di rimobilizzazione.</p> <p>In aree dove sono presenti percorsi preferenziali per il flusso della falda risulta difficile assicurare la cattura dell'intero plume di inquinante nonostante l'impiego di configurazioni <i>Funnel and Gate</i>.</p> <p>È evidente pertanto l'importanza della presenza di una rete di monitoraggio delle acque sotterranee a valle della barriera che consenta di monitorare in continuo l'efficacia del trattamento.</p> <p>Ulteriori limitazioni e/o svantaggi sono:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. la profondità raggiungibile con la barriera reattiva è limitata;</li> <li>2. il costo del mezzo di trattamento.</li> </ol>

# **Tavole**



## Bibliografia

D.Lgs. 5 Febbraio 1997, n. 22, in materia di “Gestione dei rifiuti”;

L. 9 Dicembre 1998, n. 426, in materia di “Nuovi interventi in campo ambientale”;

D.P.C.M. 12 Febbraio 1999, in materia di “Accordo per la Chimica di Porto Marghera”;

D.M. 25 Ottobre 1999, n. 471, in materia di “Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica ed il ripristino ambientale dei siti contaminanti”;

D.M. 23 Febbraio 2000, in materia di “Perimetrazione del sito di interesse nazionale di Venezia”;

D.P.C.M. 15 Novembre 2001, in materia di “Atto integrativo dell’Accordo per la Chimica di Porto Marghera”;

D.Lgs. 3 Aprile 2006, n. 152, in materia di “Norme in materia ambientale”;

Ing. Mauro Gallo, *Accordo di programma per la bonifica e il ripristino ambientale di Porto Marghera- Aprile 2012.*

<<http://www.ingmaurogallo.com/Accordo%20di%20programma%202012%20bonifica%20porto%20marghera.html>>, agg. 2014;

D.M. 24 Aprile 2013, in materia di “riperimetrazione del SIN di Porto Marghera”;

D.G.R. 3 Ottobre 2013, n. 1732, in materia di “ Salvaguardia di Venezia”;

*Relazione descrittiva delle operazioni di Messa in Sicurezza d’Emergenza*, relativa al sito in esame, redatta dalla società S.G.M. Geologia e Ambiente S.r.l., in data Maggio 2014;

Dispense ed appunti dell’esame di Bonifica dei siti contaminati;

Bassan V., Zangheri P. “ Indagine idrogeologica sull'area di Porto Marghera” (2009);

Bondesan A., Primon S., Bassan V., Vitturi A. “ Le unità geologiche della provincia di Venezia” (2008);

Tesi di Laurea “*Caratterizzazione e analisi di rischio di un ex punto di vendita carburante nell’area costiera ferrarese: APPLICAZIONE DEL SOFTWARE RIDSK-NET*”, di Stefano Legnaro dell’Università di Bologna;

Tesi di Laurea “*Analisi di rischio e messa in sicurezza operativa di un sito contaminato da idrocarburi*” di Alice Arcangeli dell’ Università di Bologna;

Di Molfetta A., Sethi R., *Ingegneria degli acquiferi*, Milano, Springer, 2002;

*Pump-and-Treat Ground-Water Remediation, a guide for decision makers and practitioners*, EPA, 1996;

*Linee guida per la verifica del trattamento chimico in situ dei terreni e delle acque sotterranee*, a cura della Provincia di Milano;

*Multi-phase-extraction: State-of-the-Practice*, EPA, 1999;

*In-situ Chemical Oxidation*, EPA, 2006;

US-FRTR, (2014). Disponibile a: <[www.frtr.gov](http://www.frtr.gov)> [ultimo accesso 08 Febbraio 2015];

Provincia di Milano, Servizio Bonifiche Siti Contaminati. Disponibile a: <<http://ambiente.provincia.milano.it/bonificheonline/>> [ultimo accesso 08 Febbraio 2015];

US-EPA (Environmental Protection Agency). Disponibili a: <<http://www.epa.gov/>> [ultimo accesso 08 Febbraio 2015];

Bonomo et al, “*Bonifica si siti contaminanti – caratterizzazione e tecnologie di risanamento*”, 2005, Graw-Hill;

Provincia di Milano, “*Linee guida per la verifica ed il collaudo delle barriere impermeabili per la messa in sicurezza di siti contaminati*”, 2003.