PER:

Consorzio Industriale Provinciale di Sassari

ANALISI DI RISCHIO SANITARIO AMBIENTALE DELLE AREE LIBERE CONSORTILI

MARZO 2020

ORDINE INGEGNERI
PROVINCIA CAGLIARI
N. 2634 Dott. Ing. BATTISTA GROSSO

(documento informatico firmato digitalmente
ai sensi dell'art. 24 D.Lgs. 82/2005 e ss.mm.ii)

Prof. Ing. Battista Grosso
Dott. Ing. Marco Cigagna
Dott. Ing. Cristina Levanti

INDICE

1 PREMESSA 7
2 AREA DI INTERVENTO 7
3 CARATTERIZZAZIONE DEL SITO 10
3.1 ATTIVITÀ SVOLTE 10
3.2 RISULTATI DELLA CARATTERIZZAZIONE 13
3.2.1 Assetto geologico ed idrogeologico 13
3.2.2 Matrice terreno 19
3.2.3 Matrice acque di falda 22
4 MODELLO CONCETTUALE 27
4.1 Introduzione 27
4.2 Sorgenti secondarie di contaminazione 27
4.2.1 Terreno insaturo profondo 27
4.2.2 Acqua di falda 29
4.3 Bersagli della contaminazione 31
4.4 Percorsi o vie di esposizione 32
4.5 Sintesi del modello concettuale 33
5 APPLICAZIONE DELL'ANALISI DI RISCHIO 35
5.1 Generalità 35
5.2 Definizione di rischio e criteri di accettabilità 35
5.2.1 Rischio Sanitario 35
5.2.2 Rischio per la Risorsa Idrica Sotterranea 37
5.3 Dati di Ingresso 37
5.3.1 Parametri caratteristici del sito determinati in fase di caratterizzazione 37
5.3.2 Parametri geometrici delle sorgenti secondarie 43
5.3.3 Concentrazioni rappresentative 49

5.3.4 Parametri della zona insatura 51
5.3.5 Parametri della zona satura 54
5.3.6 Parametri dell'ambiente outdoor 55
5.3.7 Parametri dell'ambiente indoor 56
5.4 Calcolo del rischio individuale e cumulato 59
5.4.1 SCENARIO 1 59
5.4.2 SCENARIO 2 63
6 CONCLUSIONI 65

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Inquadramento delle Aree libere consortili 8

Figura 2. Stralcio del Piano Regolatore del CIP Sassari nell'area di Porto Torres 9

Figura 3. Suddivisione delle aree libere consortili in sub aree 9

Figura 4. Localizzazione sondaggi realizzati nell'ambito del Piano di indagine CIP Sassari 11

Figura 5. Carta geologica dell'area di interesse 14

Figura 6. Acquiferi affioranti 15

Figura 7. Carta delle isofreatiche dell'area consortile 18

Figura 8. Localizzazione delle prove per la determinazione della conducibilità idraulica 18

Figura 9. Superamenti delle CSC nella matrice terreno 20

Figura 10. Distribuzione statistica dell'arsenico 21

Figura 11. Superamenti CSC nelle acque di falda – Metalli e inquinanti inorganici 23

Figura 12. Superamenti CSC nelle acque di falda – Composti organici aromatici e Idrocarburi totali 24

Figura 13. Superamenti CSC nelle acque di falda – Solventi aromatici, Alifatici clorurati cancerogeni e Clorobenzeni 25

Figura 14. Superamenti CSC nelle acque di falda – Triclorometano 26

Figura 15. Poligoni di Thiessen – suolo profondo 28

Figura 16. Delimitazione sorgenti di contaminazione del suolo profondo 29

Figura 17. Poligoni di Thiessen - Acqua di falda 30

Figura 18. Sorgenti secondarie acqua di falda dei contaminati indice ad eccezione del triclorometano 31

Figura 19. Modello concettuale del sito – SCENARIO 1 34

Figura 20. Modello concettuale del sito – Scenario 2 35

Figura 21. Classificazione dei campioni di terreno secondo l'USDA: S – Sand, LS - Loamy Sand, SL - Sandy Loam, SCL - Sandy Clay Loam, L – Loam, SiL - Silt Loam, CL - Clay Loam, SiCL - Silty Clay Loam, SiC - Silty Clay, Si – Silt, SC - Sandy Clay, C – Clay 41

Figura 22. Curve granulometriche dei campioni prelevati 41

Figura 23. Frequenza percentuale della direzione dei venti 2009-2019 42

Figura 24.Dimensioni delle sorgenti secondarie di contaminazione nel suolo profondo lungo la direzione della falda – Subarea 1 e 2 43

Figura 25. Dimensioni delle sorgenti secondarie di contaminazione nel suolo profondo lungo la direzione della falda – Subarea 3 e 4 44

Figura 26. Dimensione della sorgente di contaminazione nella direzione prevalente del vento – Subarea 1 45

Figura 27. Dimensione della sorgente di contaminazione nella direzione prevalente del vento – Subarea 2 46

Figura 28. Dimensione della sorgente di contaminazione nella direzione prevalente del vento – Subarea 4 46

Figura 29. Dimensioni delle sorgenti secondarie in falda rispetto alla direzione della stessa 48

Figura 30. Dimensioni delle sorgenti secondarie in falda rispetto alla direzione prevalente del vento 48

Figura 31. Precipitazioni annuali della stazione pluviometrica Porto Torres – periodo 1922 – 2011. La linea tratteggiata riporta il valore medio delle precipitazioni annuali (fonte dati: RAS – periodo 1922-2011) 53

Figura 32. Individuazione degli edifici potenzialmente coinvolti nella volatizzazione in ambienti indoor. Sorgenti F_S1, F_S3 e F_S6 57

Figura 33. Individuazione degli edifici potenzialmente coinvolti nella volatizzazione in ambienti indoor. Sorgenti F_S4, F_S5 e F_S2 58

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Analisi integrative effettuate nella matrice suolo 12

Tabella 2. Analisi integrative effettuate nella matrice acque di falda 12

Tabella 3. Superamenti rilevati nella matrice terreno profondo 19

Tabella 4. Superamenti CSC nelle acque di falda – Metalli e inquinanti inorganici 22

Tabella 5. Superamenti CSC nelle acque di falda – Composti organici aromatici e Idrocarburi totali 23

Tabella 6. Superamenti CSC nelle acque di falda – Solventi aromatici, Alifatici clorurati cancerogeni e clorobenzeni 24

Tabella 7. Contaminanti indice della matrice acqua di falda 29

Tabella 8. Determinazione dei parametri sito specifici nel terreno insaturo 38

Tabella 9. Determinazione dei parametri sito specifici nel terreno saturo 38

Tabella 10. Riepilogo della caratterizzazione granulometrica 39

Tabella 11. Caratteristiche geometriche delle sorgenti suolo profondo rispetto alla direzione del flusso di falda 44

Tabella 12. Caratteristiche geometriche delle sorgenti del suolo superficiale rispetto alla direzione principale del vento 45

Tabella 13. Caratteristiche geometriche delle sorgenti secondarie nella falda 47

Tabella 14. Concentrazione rappresentativa delle sorgenti nel suolo profondo 49

Tabella 15. Concentrazioni rappresentative - Sorgenti acqua di falda 50

Tabella 16. sintesi della speciazione MADEP del piezometro PTPz60 50

Tabella 17. Concentrazioni superiori alla CSC del triclorometano misurate in fase di caratterizzazione e parametri statistici del dataset 50

Tabella 18. Parametri della zona insatura utilizzati per l'analisi 51

Tabella 19. Parametri statici della serie storica delle precipitazioni medie annue 53

Tabella 20. Parametri della zona satura utilizzati per l'analisi 54

Tabella 21. Parametri dell'ambiente outdoor 55

Tabella 22. Velocità media annua del vento a 10 m dal suolo (SCIA - Sistema nazionale per l'elaborazione e diffusione di dati climatici – ISPRA) 55

Tabella 23. Parametri dell'ambiente indoor 56

Tabella 24. Caratteristiche degli edifici in prossimità delle sorgenti in falda (in grassetto le caratteristiche degli edifici utilizzate) 58

Tabella 25. Scenario 1 - Rischio e CSR per il suolo profondo - Arsenico 59

Tabella 26. Calcolo del rischio per la sorgente F_S1 (PTPz29) 60

Tabella 27. Calcolo del rischio per la sorgente F_S2 (PTPz60) 61

Tabella 28. Calcolo del rischio per la sorgente F_S3 (PTPzN04) 61

Tabella 29. Calcolo del rischio per la sorgente F_S4 (PTPzN11) 62

Tabella 30. Calcolo del rischio per la sorgente F_S5 (PTPzN12) 62
Tabella 31. Calcolo del rischio per la sorgente F_S6 (S_S_B2/1) 62
Tabella 32. Calcolo del rischio per la sorgente F_S7 62
Tabella 33. Calcolo del rischio - sorgenti suolo superficiale - SCENARIO 2 63
Tabella 34. Calcolo del rischio - sorgenti in falda - SCENARIO 2 64

INDICE DEGLI ALLEGATI

Allegato 0: figure fuori testo
Allegato 1: rapporti di prova e relazione di validazione ARPAS delle indagini integrative 2019
Allegato 2: report risknet

1 PREMESSA

Il presente documento descrive l'analisi del rischio sanitario ambientale sito specifica ai sensi del D. Lgs 152/06 e s.m.i. per le Aree Libere di proprietà del Consorzio Industriale Provinciale di Sassari.

Tali Aree, unitamente alla discarica consortile, al depuratore consortile e al Centro Intermodale Regionale, costituiscono le aree di competenza pubblica ubicate all'interno del Sito di Interesse Nazionale (SIN) "Aree industriali di Porto Torres".

Le Aree Libere sono state caratterizzate nell'ambito del *Piano di indagine per la caratterizzazione delle aree di competenza pubblica all'interno del Sito di bonifica di Interesse Nazionale "Aree industriali di Porto Torres"* previsto dall'Accordo di Programma, sottoscritto in data 22/09/2009, tra il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, la Regione Autonoma della Sardegna, la Provincia di Sassari, il Comune di Sassari ed il Comune di Porto Torres.

L'Analisi di Rischio è stata eseguita applicando i criteri riportati nell'Allegato 1 al Titolo V della Parte Quarta del D.lgs. 152/06 e nel documento dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale e per i Servizi Tecnici "Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati", revisione 2 di marzo 2008 (nel seguito Linee Guida ISPRA).

Ai fini della valutazione del rischio sono stati utilizzati i parametri geologici, idrogeologici ed ambientali raccolti durante le attività di caratterizzazione e delle successive indagini ambientali integrative.

Il documento è così articolato:

- descrizione dell'area (Capitolo 2);
- sintesi delle attività e dei risultati della caratterizzazione (Capitolo 3);
- descrizione del Modello Concettuale del Sito (MCS),con particolare riferimento alle componenti (sorgenti, percorsi di migrazione e bersagli) che concorrono alla determinazione del rischio sanitario-ambientale (Capitolo 4);
- applicazione dell'Analisi di Rischio (Capitolo 5), contenente i criteri di scelta dei parametri di input e i risultati delle elaborazioni.

2 AREA DI INTERVENTO

Le Aree Libere consortili (Figura 1) occupano la fascia orientale del SIN di Porto Torres e sono comprese fra l'area industriale Syndial a Ovest e la SS 131 ad Est. A Nord confinano con il mare ed a Sud con le aree agricole esterne al SIN. La dimensione di tali aree è di circa 2.5 km in direzione N-S,

ed è variabile fra 1.5 km nella parte meridionale e 1 km circa nella parte settentrionale in direzione E-O; la sua estensione complessiva è pari a circa 280 ettari.



Figura 1. Inquadramento delle Aree libere consortili

La destinazione d'uso, attuale e futura, di tali aree è di tipo commerciale/industriale, come risulta dallo stralcio del Piano Regolatore del Consorzio Industriale riportato in Figura 2.

Tali aree, collocandosi tra il polo petrolchimico e l'area urbanizzata di Porto Torres, rivestono un'importanza cruciale nell'ambito dei processi di diffusione della contaminazione dal sito industriale alle aree abitate. Ai fini della caratterizzazione, le aree libere sono state suddivise in 5 sub aree, secondo una logica che rispecchia la tipologia delle aziende insediate (Figura 3), a cui se ne aggiunge una sesta, denominata "aree limitrofe" costituita da piccole superfici localizzate ai margini dell'agglomerato industriale di Porto Torres.

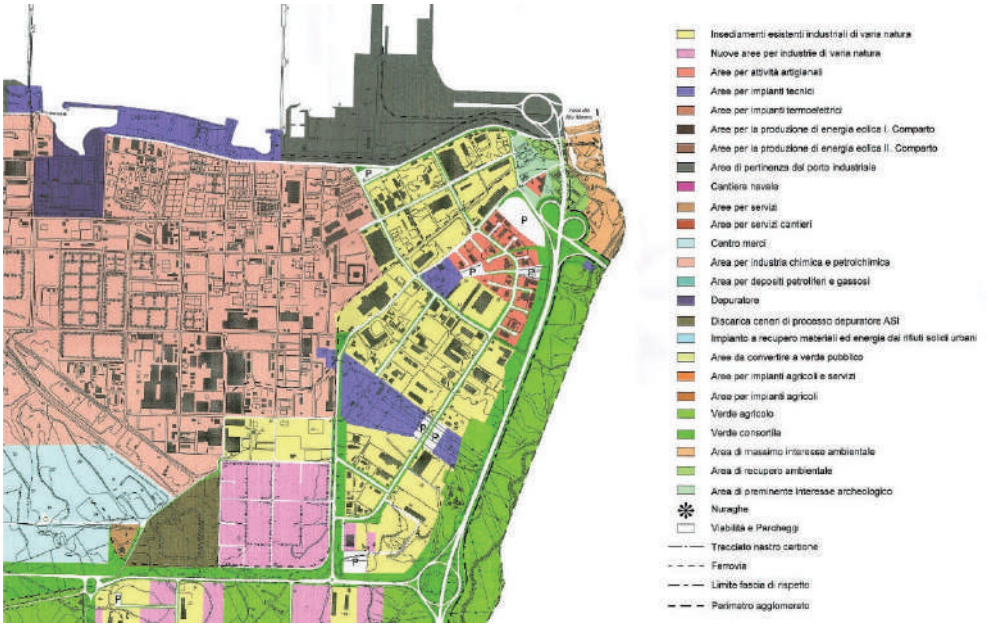


Figura 2. Stralcio del Piano Regolatore del CIP Sassari nell'area di Porto Torres

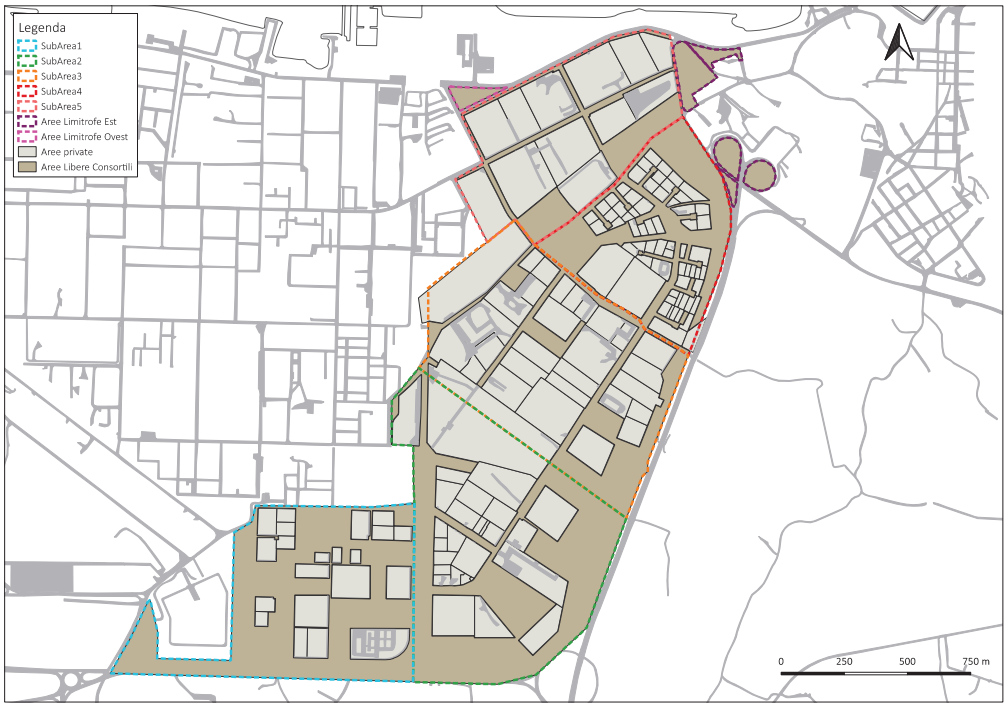


Figura 3. Suddivisione delle aree libere consortili in sub aree

3 CARATTERIZZAZIONE DEL SITO

3.1 ATTIVITÀ SVOLTE

Il quadro ambientale descritto in questo paragrafo è stato composto sulla base dei risultati del piano di caratterizzazione e delle indagini integrative.

La caratterizzazione delle Aree Libere è stata effettuata nell'ambito di due distinti piani di indagine:

- il piano di indagine relativo al progetto "*Aggiornamento della rete di monitoraggio siti inquinati: area industriale di Porto Torres*" realizzato nel 2013 dalla RAS allo scopo di caratterizzare le acque sotterranee;
- il "Piano di indagine per la caratterizzazione delle aree di competenza pubblica all'interno del Sito di bonifica di Interesse Nazionale "Aree Industriali di Porto Torres" – Aree libere consortili" realizzato nel 2016 dal Consorzio allo scopo di caratterizzare principalmente i terreni.

I risultati di tali piani sono presentati nel documento "Piano della caratterizzazione delle Aree Libere Consortili – Modello concettuale definitivo" del novembre 2017.

Al fine di verificare alcune risultanze analitiche della caratterizzazione e sviluppare l'analisi di rischio, nel 2019 è stata effettuata una campagna di indagini integrative le cui modalità sono state preliminarmente definite con ARPAS.

La caratterizzazione della matrice acque sotterranee delle Aree Libere, effettuata dalla RAS nel 2013 nell'ambito del Progetto PO FESR Sardegna 2007-2013, ha compreso la realizzazione di:

- n. 33 sondaggi attrezzati a piezometro;
- prelievi di campioni di terreno dai sondaggi e di acque sotterranee;
- misure freatimetriche;
- n. 4 prelievi manuali superficiali (top soil);
- analisi chimica di terreni e acque sotterranee;
- analisi geotecnica dei terreni;
- prove in situ per definire il comportamento idraulico degli acquiferi (prove Lefranc e prove di portata).

Le attività di campo e di laboratorio eseguite sono descritte in dettaglio nel documento Piano d'Indagine (PT - RT - PI.02) del 17/03/2014.

I risultati delle attività svolte sono riportati nella Relazione di Sintesi Parte A - Presentazione dei risultati dell'indagine (PT-TR_RSA.04), mentre nel documento Relazione di Sintesi Parte B – Analisi

ed interpretazione dei risultati dell'indagine (PT - RT – RSB.05) è descritto il quadro emerso dall'analisi dei dati e il modello concettuale definitivo.

La caratterizzazione della matrice terreni è stata effettuata dal Consorzio Industriale Provinciale di Sassari nell'ambito di una più ampia attività che, oltre alle aree libere, ha interessato:

- Discarica consortile;
- Depuratore consortile;
- Centro Intermodale Regionale.

Nell'ambito di tale Piano sono stati effettuati:

- n. 179 sondaggi (Figura 4);
- n. 2 sondaggi attrezzati a piezometro;
- analisi chimiche del top soil, dei terreni e delle acque sotterranee;
- analisi geotecniche sui terreni.

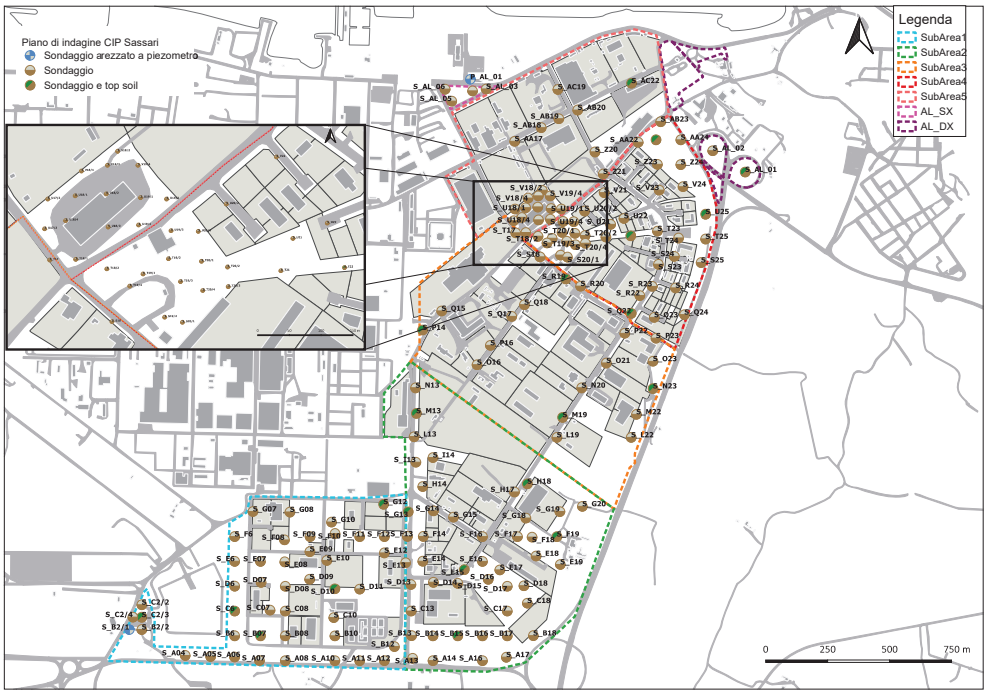


Figura 4. Localizzazione sondaggi realizzati nell'ambito del Piano di indagine CIP Sassari

Le modalità di esecuzione di tali attività sono riportate nella *Relazione Tecnica del Piano di indagine per la caratterizzazione delle aree di competenza pubblica all'interno del Sito di bonifica di Interesse Nazionale "Aree Industriali di Porto Torres" – Aree Libere consortili, revisione 2 del gennaio 2017*.

I risultati delle attività sono descritti nel documento "Piano della caratterizzazione delle Aree Libere Consortili – Modello concettuale definitivo" del novembre 2017.

Le indagini integrative sono state realizzate nel corso del 2019 con l'obiettivo di verificare:

- il superamento anomalo delle CSC del parametro Rame nel suolo superficiale, in corrispondenza del punto di campionamento PTPzN07. A tal fine è stato effettuato un nuovo campionamento del suolo superficiale. Sul campione è stata effettuata l'analisi chimica con la determinazione del solo parametro Rame;
- il superamento delle CSC del parametro Arsenico nel suolo profondo, in corrispondenza del punto di campionamento S_A11 (profondità 2-3m). A tal fine è stato effettuato un nuovo sondaggio in prossimità del punto S_A11 e sul campione è stata effettuata l'analisi chimica con la determinazione del solo parametro Arsenico;
- alcuni superamenti delle CSC nelle acque di falda in corrispondenza dei piezometri: PTPz60, PTPzN04, PZPzN04B, PTPzN01 e PTPzN24. In tali piezometri è stato effettuato un nuovo campionamento seguito dall'analisi chimica delle acque prelevate per la determinazione dei parametri che hanno determinato superamenti delle CSC inclusa la speciazione MADEP degli idrocarburi.

Le analisi sono state validate in contradditorio da ARPAS e i risultati sono riportati in Tabella 1 in riferimento al suolo superficiale e profondo ed in Tabella 2 in riferimento alle acque di falda.

Tabella 1. Analisi integrative effettuate nella matrice suolo

Suolo superficiale			
Campione	Certificato	Profondità [m da pc]	Rame
			CSC: 600 mg/kg
PTPzN07 BIS	GEOAS19/196	0.0 - 1.0	277.0
Suolo profondo			
Campione	Certificato	Profondità [m da pc]	Arsenico
			CSC: 50 mg/kg
S_A11 BIS	GEOAS19/195	2.0-3.0	23.8

Tabella 2. Analisi integrative effettuate nella matrice acque di falda

			PTPz60	PTPzN04	PZPzN04B	PTPzN01	PTPzN24
		Certificato	GEOAS19/213	GEOAS19/229	GEOAS19/230	GEOAS19/231	GEOAS19/228
Parametro	UM	CSC					
Arsenico	µg/l	10	58.6				
Ferro	µg/l	200	2011				
Manganese	µg/l	50	408.7				
Piombo	µg/l	10				1.15	

			PTPz60	PTPzN04	PZPzN04B	PTPzN01	PTPzN24
Benzene	µg/l	1	1500			<0.1	
Etilbenzene	µg/l	50	6000				
Stirene	µg/l	25	93				
Toluene	µg/l	15	200				
Para-xilene	µg/l	10	4400			<1	
1,2 dicloroetilene	µg/l	60			<6		
1,2 Dicloropropano	µg/l	0.15		0.11	0.019		
1,2,4 Trimetilbenzene	µg/l		112				
Isopropilbenzene	µg/l		9800				
Diclorometano	µg/l			1.6			
Triclorometano	µg/l	0.15		8.3	0.08		
Cloruro di vinile	µg/l	0.5			<0.01		
1,1 Dicloroetilene	µg/l	0.05	<0.01	0.84	0.02		
Tricloroetilene	µg/l	1.5		1.2	0.14		
Tetracloroetilene	µg/l	1.1		2.41	0.31		
Idrocarburi totali (come n-esano)	µg/l	350	17000			<35	158
MADEP			x			X	X

Dall'analisi delle Tabelle emerge che:

- i superamenti della CSC rispettivamente per suolo superficiale e suolo profondo non sono confermati dalle nuove indagini;
- i superamenti delle CSC per le acque sotterranee sono confermati solo in riferimento al PTPz60 per gli idrocarburi totali e al PTPzN04 per triclorometano, 1,1-Dicloroetilene e tetracloroetilene.

Le risultanze analitiche delle indagini integrative sono state considerate sostitutive di quelle del piano di indagine del 2016.

3.2 RISULTATI DELLA CARATTERIZZAZIONE

Nel seguito vengono sintetizzati gli aspetti geologici, idrogeologici ed ambientali del sito derivanti dalle informazioni raccolte durante le attività di caratterizzazione.

3.2.1 Assetto geologico ed idrogeologico

La geologia dell'area consortile è costituita prevalentemente dalle formazioni appartenenti alla Successione Sedimentaria Oligo-Miocenica del Logudoro-Sassarese (Figura 5):

- ***RESb*** - Litofacies nella FORMAZIONE DI MORES. Arenarie e conglomerati a cemento carbonatico, fossiliferi e bioturbati. Intercalazioni di depositi sabbioso-arenacei quarzoso-feldspatici a grana medio - grossa, localmente ricchi in ossidi di ferro (Ardara-Mores). Ambiente litorale. BURDIGALIANO SUP.
- ***RESa*** - Litofacies nella FORMAZIONE DI MORES. Calcareniti, calcari bioclastici fossiliferi. Calcari nodulari a componente terrigena, variabile, con faune a gasteropodi (Turritellidi), ostreidi ed echinidi (Scutella, Amphiope) ("Calcari inferiori" Auct.). Ambiente litorale. BURDIGALIANO SUP.

Limitatamente alla sub area 1 sono presenti anche le formazioni (Figura 5):

- **h1i**-Depositi antropici. Discariche industriali. OLOCENE;
- **b**-Depositi alluvionali. OLOCENE;
- **CZS** - UNITÀ DI CANDELAZZOS: Depositi di flusso piroclastico in facies ignimbritica, pomico-cineritici, prevalentemente non saldati, di colore grigio-violaceo. BURDIGALIANO. Appartenenti al Distretto Vulcanico di Capo Marargiu.

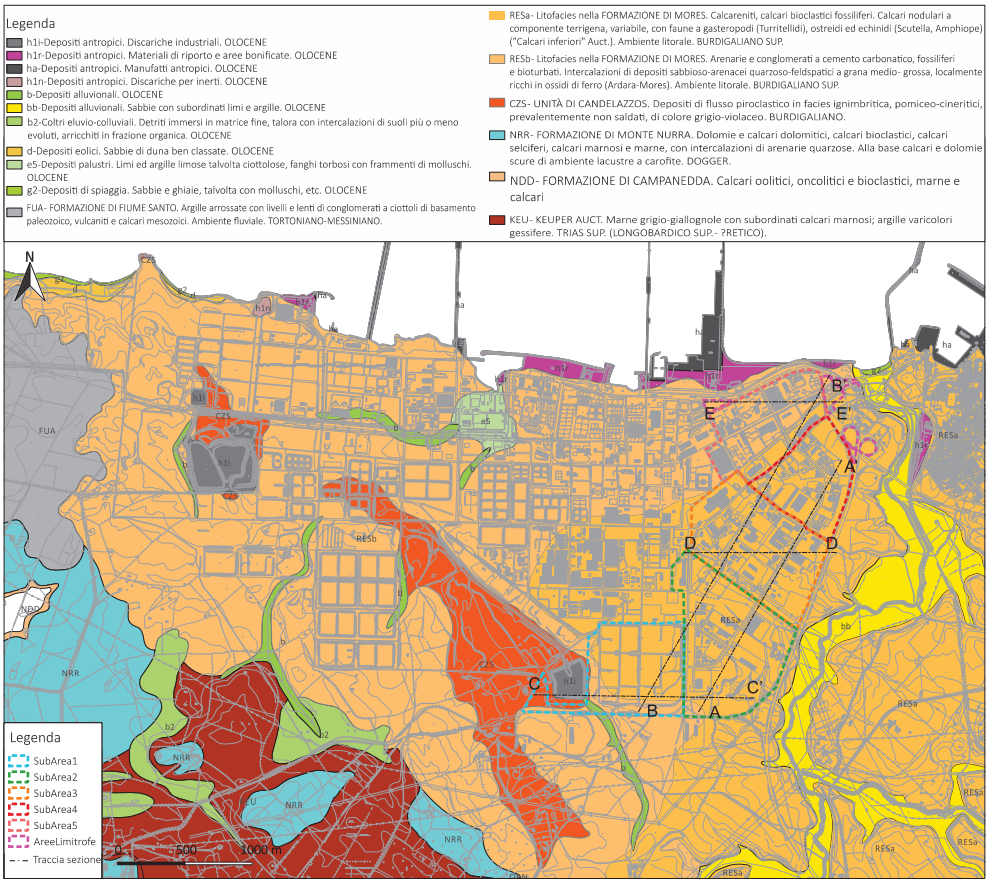


Figura 5. Carta geologica dell'area di interesse

La circolazione idrica sotterranea è fortemente condizionata dalla struttura tettonica: le faglie fungono, in taluni casi, da via preferenziale di comunicazione tra gli acquiferi ed in altri ne determinano l'isolamento per effetto dei riempimenti argillosi anche molto potenti (fino a 40 m).

Il quadro conoscitivo attuale dell'area individua cinque unità idrogeologiche (Figura 6) che corrispondono a 5 differenti litotipi:

- l'acquifero alluvionale miocenico;
- l'acquifero delle vulcaniti oligo-mioceniche;
- l'acquifero carbonatico mesozoico;
- l'acquifero detritico-carbonatico oligo-miocenico;
- l'acquifero Detritico-Alluvionale Plio-Quaternario della Nurra.

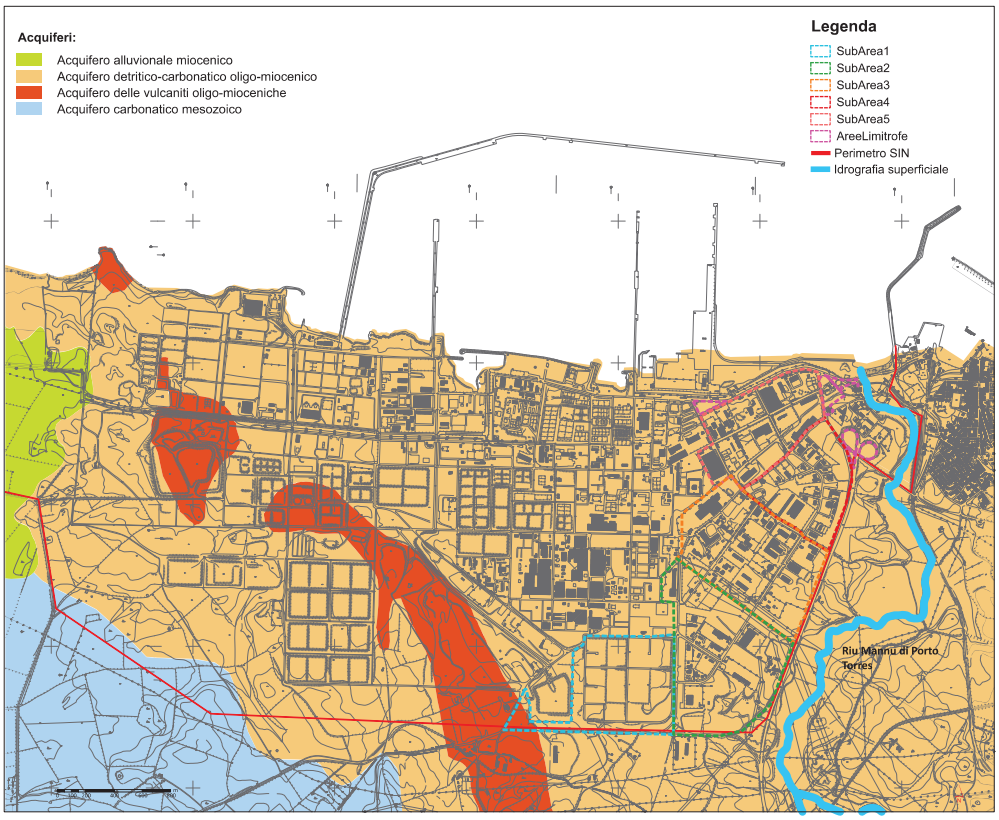


Figura 6. Acquiferi affioranti

I primi acquiferi due hanno caratteristiche idrogeologiche di acquitardo/acquiclude, a cui si associano valori di permeabilità bassa e molto bassa e una circolazione idrica assente o comunque non apprezzabile.

L'acquifero carbonatico mesozoico è il più profondo e ha sede nella successione carbonatica mesozoica; esso affiora nella zona sud occidentale nel bacino idrografico del Fiume Santo. Tale acquifero ha una potenza di circa cento di metri e una permeabilità secondaria per fratturazione e carsismo.

L'acquifero detritico-carbonatico oligo-miocenico è impostato in parte su materiale sciolto detritico, presente in prevalenza in superficie, e in parte su roccia, arenaria o calcarenite presente più in profondità. La base del complesso è presumibilmente costituita da un livello conglomeratico di spessore approssimativo di 8-12 metri, che poggia sulle vulcaniti terziarie dotate di scarsissima permeabilità. L'acquifero ha una potenza variabile tra i 10 ed i 70 metri e presenta una permeabilità primaria per porosità ed una secondaria per fessurazione e carsismo con conducibilità idraulica compresa tra $1 \cdot 10^{-4}$ e $1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

La direzione del deflusso idrico è verso il mare con una direttrice generale NNE, fortemente influenzata dalla distribuzione stratigrafica e areale dei terreni meno impermeabili.

Al centro sud dell'area industriale, si riscontra un contatto tettonico tra l'insieme di terreni sedimentari miocenici ed il sistema vulcanitico oligo-miocenico. La linea di contatto si sviluppa in direzione NO-SE e costituisce uno spartiacque idrogeologico che limita l'alimentazione sotterranea diretta della falda calcarenitica.

L'acquifero Detritico-Alluvionale Plio-Quaternario della Nurra è un acquifero freatico, impostato sui depositi alluvionali lungo i corsi d'acqua, di spessore variabile fino a 20 metri, dove la falda si attesta in media pochi metri al di sotto del piano campagna. L'acquifero è sede di circolazione idrica variabile nel tempo e nello spazio ed il suo grado di permeabilità si attesta su valori, molto disuniformi, attorno a $1 \cdot 10^{-4}$-$1 \cdot 10^{-6}$ m/s. La variabilità della circolazione idrica in questo acquifero è legata alla sua alimentazione, di tipo diretto tramite infiltrazione superficiale e sversamenti provenienti del sistema idrografico.

Le indagini effettuate nell'ambito dei piani di indagine PO FESR Sardegna 2007-2013 e CIP Sassari hanno confermato che il sottosuolo delle aree libere è costituito dalla Formazione di Mores (unità sedimentaria oligo-miocenica del Logudoro Sassarese) costituita da calcareniti variamente alterate, alternate a limi, limi argillosi, argille e sabbie argillose. In tale formazione si sviluppa l'acquifero detritico-carbonatico oligo-miocenico la cui base è costituita dalle vulcaniti terziarie impermeabili.

L'andamento del deflusso idrico sotterraneo in corrispondenze dell'area consortile è stato ricostruito mediante quattro campagne di misura dei livelli di falda, eseguite sull'intera rete di piezometri RAS nel periodo maggio-settembre 2013.

Le carte delle isofreatiche relative alle quattro campagne sono riportate in Figura 7. L'andamento della piezometria mette evidenza un deflusso diretto verso il mare, avente direzione prevalente da Sud-Ovest verso Nord-Est. Più in dettaglio:

- nella sub area 1 la quota piezometrica varia tra 7.5 m slm in corrispondenza del lato Ovest dell'area e 4.5 m slm in corrispondenza dello spigolo NE. Le linee di flusso sono disposte secondo la direzione OSO-ENE con un gradiente idraulico medio di 0.003; la quota del piano campagna è variabile tra 20.0 e 28.0 m slm per cui la soggiacenza media della falda è 16.4 m.
- nella sub area 2 la quota piezometrica varia tra 5.0 m slm in corrispondenza dello spigolo SO e 3.5 m slm in corrispondenza dello spigolo N. Le linee di flusso hanno direzione OSO-ENE e gradiente idraulico medio 0.0027; la quota del piano campagna è variabile tra 15.0 e 26.0 m slm e la soggiacenza media della falda è 17.2 m.
- nella sub area 3 la quota piezometrica varia tra 3.5 m slm in corrispondenza dello spigolo SO e 1.5 m slm in corrispondenza dello spigolo E. Le linee di flusso sono dirette SO-NE con un gradiente idraulico medio di 0.0020; la quota del piano campagna è variabile tra 18.0 e 25.0 m slm e la soggiacenza media della falda è 19.1 m.
- nella sub area 4 la quota piezometrica varia tra 3.0 m slm in corrispondenza del lato SO dell'area e 1.0 m slm in corrispondenza dello spigolo N. Le linee di flusso hanno direzione SO-NE e gradiente idraulico medio 0.003; la quota del piano campagna è variabile tra 19.0 e 23.0 m slm e la soggiacenza media della falda è 19.2 m.
- nella sub area 5 la quota del piano campagna è variabile tra 5.0 e 24.0 m slm mentre la quota piezometrica varia tra 2.5 m slm in corrispondenza del lato S dell'area e 0.5 m slm in corrispondenza dello spigolo N. Le linee di flusso hanno direzione S-N con un gradiente idraulico medio di 0.0027. La soggiacenza media è 11 m.

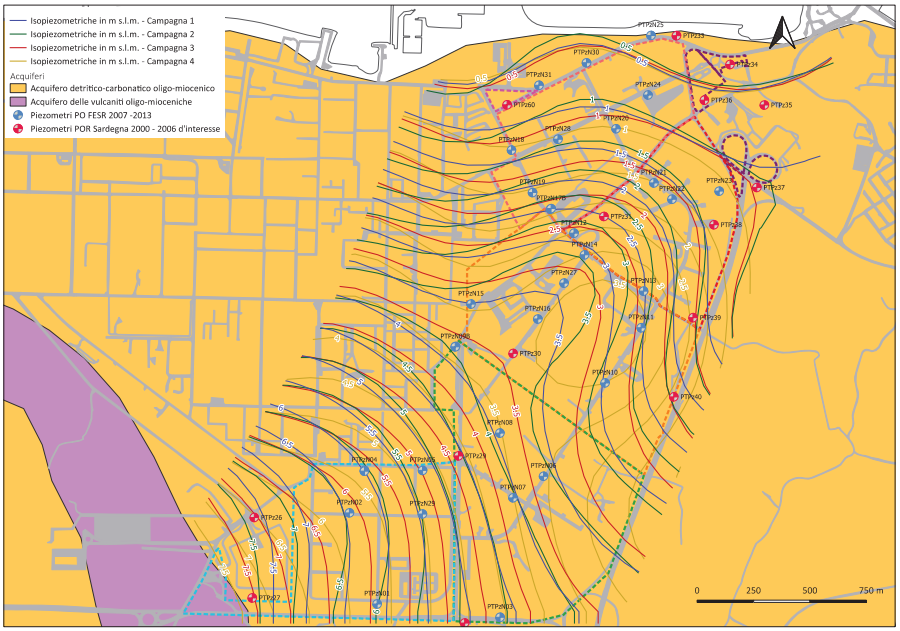


Figura 7. Carta delle isofreatiche dell'area consortile

Le misure di conducibilità idraulica effettuate nell'acquifero (Figura 8) mettono in evidenza una forte variabilità della conducibilità idraulica (da $3.79 \cdot 10^{-5}$ a $4.18 \cdot 10^{-8}$ m/s), imputabile all'eterogeneità delle calcareniti caratterizzate da differenti gradi di fessurazione ed alterazione. Il valore medio delle misure effettuate è $9.83 \cdot 10^{-6}$ m/s.

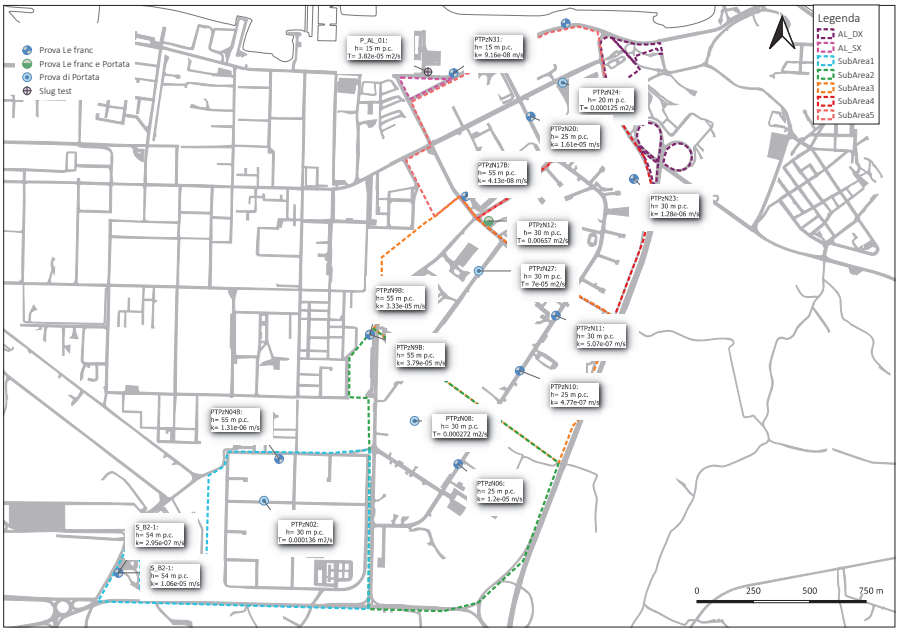


Figura 8. Localizzazione delle prove per la determinazione della conducibilità idraulica

3.2.2 Matrice terreno

I risultati delle analisi effettuate sui campioni di terreno prelevati in fase caratterizzazione mettono in evidenza che:

- nel top soil non sono presenti superamenti dei limiti normativi;
- nella matrice terreno superficiale (fino a 1 m di profondità) non sono presenti superamenti dei limiti normativi;
- nella matrice terreno profondo (profondità > 1 m) sono presenti 14 punti di non conformità per l'arsenico.

La localizzazione di questi ultimi e la profondità a cui sono stati registrati sono riportati in Tabella 3 e in Figura 9.

Tabella 3. Superamenti rilevati nella matrice terreno profondo

Campione	Profondità	Arsenico	
		CSC: 50 mg/kg	
PTPzN09/5	9.0 - 10.0	85	Limo argilloso debolmente sabbioso con clasti calcarei. Presenza di livelli limo sabbiosi di colore marrone ocraceo
PTPzN09B/3	4.0 - 5.0	62	Sabbia limosa con clasti di colore marrone chiaro localmente cementati. Presenza di livelli centimetrici limo argillosi
PTPzN09B/4	9.3 - 9.9	112	Limo argilloso debolmente sabbioso con clasti calcarei
PTPzN12/2	2.0 - 2.6	53	Limo sabbioso di colore marroncino con locale presenza di frammenti di calcarenite
PTPzN16/3	4.0 - 5.0	60	Argilla di colore marrone
PTPzN29/2	2.0 - 3.0	51	Argilla limosa di colore marrone con livelli di colore rosso, presenza di rari clasti e rari livelli sabbiosi
S_E12/C3	3.0 - 3.6	160	Sabbie con resti di sostanze organiche combuste - colore nero
S_B17/C4	6.0 - 6.8	60	Limo argilloso e sabbioso molto consistente di colore dal marrone all'ocra
S_G19/C2	2.0 - 3.0	58	Limo argilloso, con livelli ghiaiosi, moderatamente consistente
S_H17/C4	6.0 - 7.0	82	Limo argilloso a tratti debolmente sabbiosi da moderatamente consistenti a consistenti di colore ocra verdastro
S_G15/C2	2.2 - 3.0	51	Limo argilloso e sabbioso, a letto anche ghiaioso, di colore marrone
S_M13/C3	4.0 - 5.0	75	Argilla moderatamente consistente di colore nocciola-marrone
S_P22/C3	4.0 - 5.0	61	Sabbia fine limosa con livelli sub-decimetrici arenacei e livelli decimetrici schiettamente limosi, colore ocra
S_L19/C3	4.2 - 5.0	76	Limo argilloso e sabbioso moderatamente consistente di colore ocra-verdastro

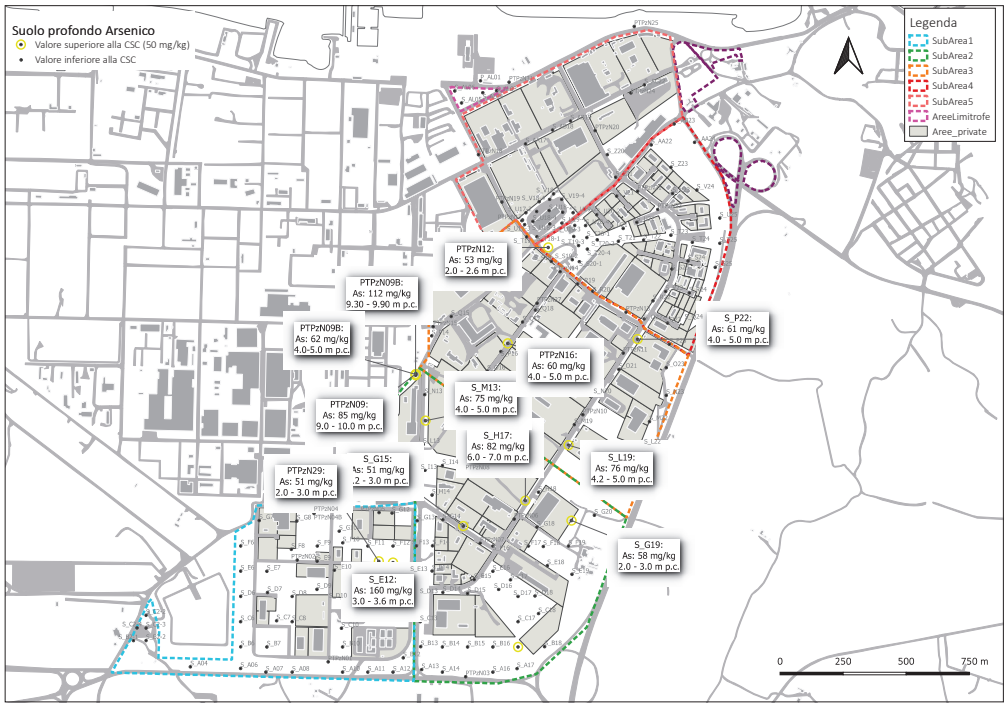


Figura 9. Superamenti delle CSC nella matrice terreno

Relativamente a tali superamenti si osserva che:

- la posizione planimetrica dei campioni non è correlabile ad alcun centro di pericolo primario o evento isolato di contaminazione;
- i campioni provengono da strati del medesimo tipo litologico (argille e limi con frammenti di calcarenite) la cui profondità è compresa fra 2 e 10 m dal piano di campagna;
- in tutta la zona anche nelle porzioni esterne all'area SIN e lontane dai centri di pericolo, si riscontano superamenti delle CSC dell'arsenico[1].
- non si osservano correlazioni spaziali fra i punti di superamento nel terreno profondo e quelli nelle acque di falda. Si osservi che i superamenti delle CSC nel terreno profondo sono stati rinvenuti all'interno delle sub aree 1, 2, 3 e 4, mentre i superamenti delle CSC dell'arsenico rilevati nella falda sono invece individuati esclusivamente nella parte a nord della sub area 5.

[1] PO FESR 2007-2013. RELAZIONE DI SINTESI PARTE B – Analisi ed interpretazione dei risultati dell'indagine

Vi è dunque la ragionevole certezza che i valori apparentemente anomali della concentrazione dell'arsenico (superamenti delle CSC) siano legati alla composizione mineralogica delle calcareniti e che abbiano, dunque, origine naturale.

A supporto di tale conclusione si fa infatti presente che l'arsenico è il costituente principale di oltre 200 fasi minerali tra cui arsenati (60%), solfuri e solfosali (20%), arseniuri, arseniti, ossidi, etc e si trova usualmente in quantità apprezzabili nei giacimenti minerari a solfuri, nella forma di arsenopirite ed è presente e abbondante nei reticoli di pirite, galena, calcopirite e blenda.

La calcarenite oligo-miocenica costituente il sottosuolo delle aree libere consortili si è formata in ambiente marino litoraneo a seguito della cementazione carbonatica di clasti di origine continentale. Considerato che nel territorio di provenienza della frazione continentale sono ubicate mineralizzazioni ad arsenopirite, è ragionevole ipotizzare che la presenza di tale elemento nella matrice terreno sia di origine naturale legata, appunto, alla genesi delle calcareniti. Si noti a tal riguardo che i superamenti delle CSC per l'As sono stati rilevati all'interno di un "materiale argilloso limoso alcune volte sabbioso con presenza di frammenti di calcarenite", originato con ogni probabilità dall'alterazione della calcarenite.

Infine, sempre a supporto della tesi esposta, si osserva che la frequenza della concentrazione di arsenico nei campioni di terreno ha una distribuzione lognormale con marcata asimmetria positiva (Figura 10) che è tipica delle formazioni naturali.

Relativamente alla possibilità di migrazione dell'arsenico dalla matrice solida alle acque sotterranee, le seguenti osservazioni:

- nelle acque non sono state misurate concentrazioni significative,
- non sono state rilevate correlazioni spaziali fra i punti di superamento nei suoli e quelli nelle acque;
- l'arsenico è presente in orizzonti a permeabilità molto bassa;

dimostrano che la potenziale migrazione di fatto non si verifica.

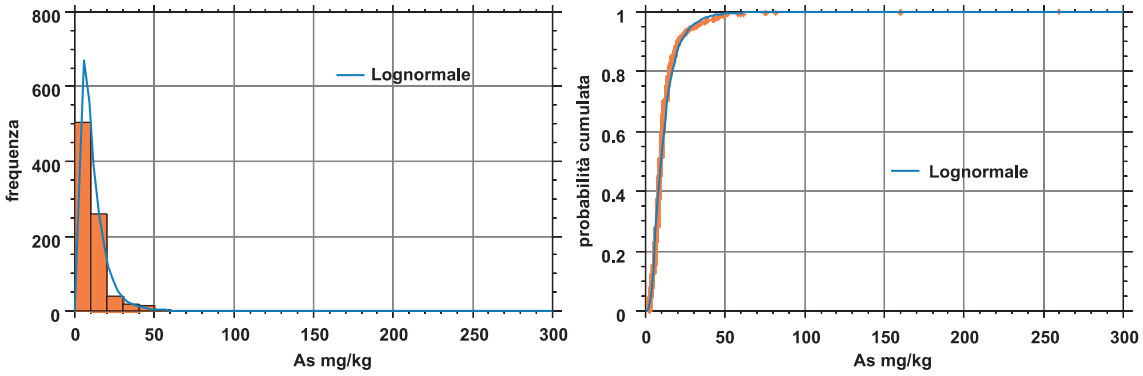


Figura 10. Distribuzione statistica dell'arsenico

I superamenti delle CSC, nonostante siano attribuibili a cause naturali, vengono comunque considerati ai fini dell'Analisi di Rischio.

3.2.3 Matrice acque di falda

L'acqua di falda è stata caratterizzata mediante l'analisi di campioni prelevati nei 50 piezometri distribuiti uniformemente e con sufficiente densità sull'intera area (1 piezometro ogni 5.6 ettari).

I risultati delle analisi chimiche, aggiornati con le risultanze del piano integrativo di indagine 2019, mettono in evidenza superamenti delle CSC[2] (Tabella 2 dell'Allegato 5 al Titolo V della Parte IV del D. Lgs. 152/2006) in 33 campioni su 50, in 12 di quali si registra unicamente il superamento della CSC del triclorometano.

Nelle seguenti Tabelle e Figure sono riportati i superamenti suddivisi in:

- metalli e composti inorganici: Tabella 4 e Figura 11;
- composti organici aromatici e idrocarburi totali: Tabella 5 e Figura 12;
- solventi aromatici, composti alifatici clorurati cancerogeni e clorobenzeni: Tabella 6, Figura 13 e Figura 14.

Tabella 4. Superamenti CSC nelle acque di falda – Metalli e inquinanti inorganici

Piezometro	Certificato	Alluminio	Arsenico	CromoVI	Ferro	Selenio	Manganese	Nitriti	Solfati
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l
Limiti D. Lgs 152/2016 parte IV, titolo V, allegato 5, Tabella 2		200	10	5	200	10	50	500	250
P_AL_01	16LA04530	**430**	**41**	0.5	**340**	5.9	**210**	50	53
PTPz27	13-LA14236	6	1	**5.1**	5	1	5	20	181
PTPz29	13-LA09876	5	1	1.7	5	1	5	20	**254**
PTPz33	13-LA10059	5	**22**	0.5	48	1	31	34	133
PTPz36	13-LA14254	10	1	3.8	**437**	1	9	**1026**	65
PTPz60	13-LA09746/GEOAS19/213	10	**58.6**	0.5	**2011**	1	**408.7**	5	2
PTPzN04B	13-LA14409	5	1	1.5	6	1	5	20	**286**
PTPzN08	13-LA13440	5	1	1.1	12	2	5	20	**351**
PTPzN09B	13-LA13444	8	1	2.7	5	1	**88**	20	192
PTPzN11	13-LA14228	5	1	**5.1**	5	1	5	57	136
PTPzN16	13-LA13456	6	1	3.5	**282**	1	6	20	148
PTPzN18	13-LA14234	7	3	**8**	5	1	5	20	44
PTPzN23	13-LA14214	5	1	**5.3**	6	1	5	20	64
PTPzN25	13-LA13154	6	1	0.5	5	1	**90**	29	**387**

[2] Per gli analiti non ricompresi nell'Allegato 5, i limiti normativi stabiliti dal D. Lgs. 152/2006 sono stati integrati con le concentrazioni presenti nella banca dati bonifiche dell'ISS.

PTPzN27	13-LA14224	8	1	**5.2**	71	1	5	39	92
PTPzN31	13-LA13274	9	1	0.5	41	1	**162**	20	**319**
S_B2/1	16LA04192	36	2.8	1.8	10	**14**	5	50	**360**

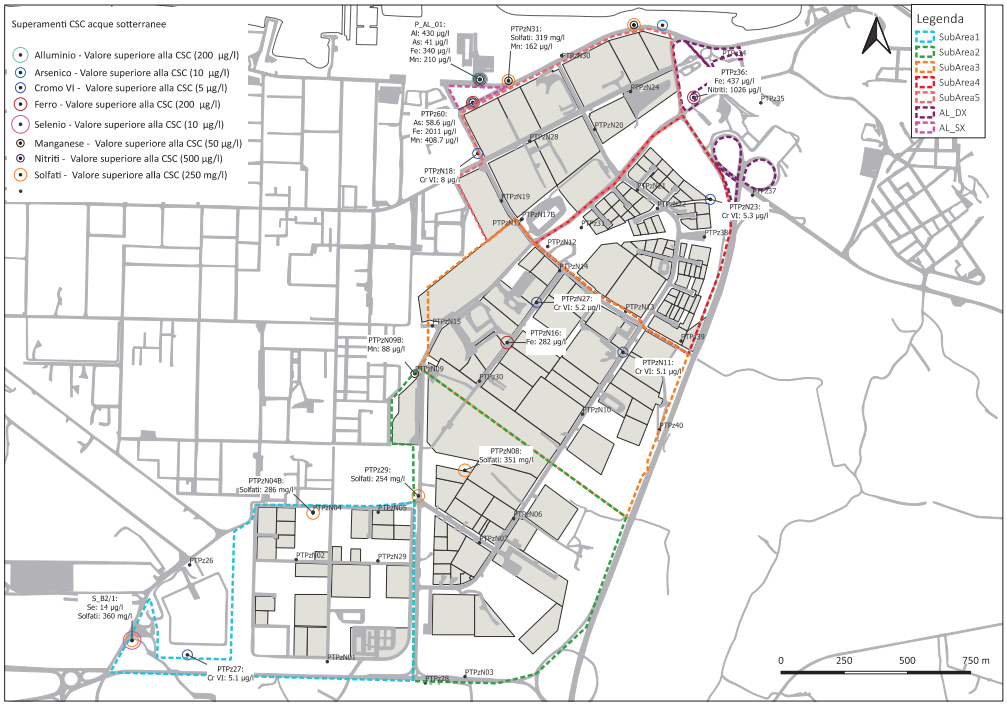


Figura 11. Superamenti CSC nelle acque di falda – Metalli e inquinanti inorganici

Tabella 5. Superamenti CSC nelle acque di falda – Composti organici aromatici e Idrocarburi totali

Piezometro	Certificato	Benzene	Etilbenzene	Stirene	Toluene	para-Xilene	Idrocarburitotali (n-esano)	1,2,4 trimetilbenzene	Isopropilbenzene	Diclorometano
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Limiti D. Lgs 152/2016 parte IV, titolo V, allegato 5, tabella 2		1	50	25	15	10	350	10*	50*	0.15*
PTPz29	13-LA09876	**3**	13.92	3.3	0.63	**26.24**	35	0.08	3.87	0.1
PTPz60	13-LA09746/GEOAS19/213	**1500**	**6000**	**93**	**200**	**4400**	**17000**	**15.38**	**3536.6**	0.1
PTPzN04	13-LA14415/GEOAS19/229	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	35	0.05	0.05	**0.2**
PTPzN12	13-LA14248	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	35	0.05	0.05	0.1
PTPzN19	13-LA13295	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	35	0.05	0.05	**0.6**
PTPzN23	13-LA14214	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	35	0.05	0.05	**0.2**
S_B2/1	16LA04192	0.1	1	1	1	1	**960**			
* limiti banca dati bonifiche ISS per le sostanze non comprese nel D.Lgs. 152/06										

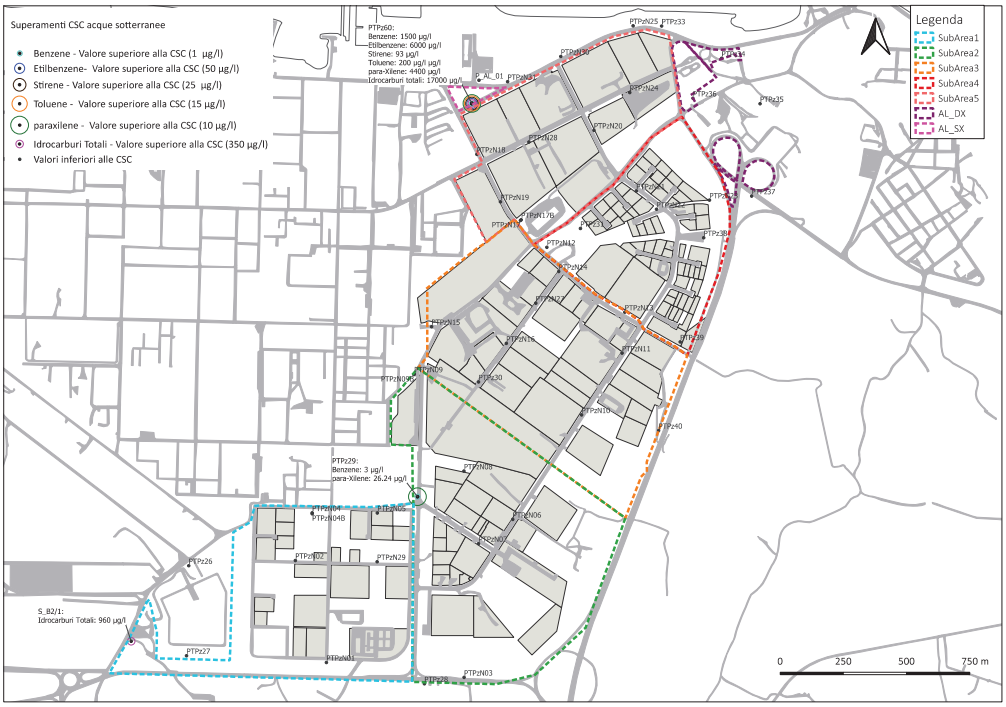


Figura 12. Superamenti CSC nelle acque di falda – Composti organici aromatici e Idrocarburi totali

Tabella 6. Superamenti CSC nelle acque di falda – Solventi aromatici, Alifatici clorurati cancerogeni e clorobenzeni

Piezometro	Certificato	Triclorometano	1,1-Dicloroetilene	Tricloroetilene	Tetracloroetilene	Sommatoria organoalogenati	1,2-Dicloropropano	Esaclorobenzene
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Limiti D. Lgs 152/2016 parte IV, titolo V, allegato 5, tabella 2		0.15	0.05	1.5	1.1	10	0.15	0.01
PTPz29	13-LA09876	**1.02**	**0.25**	0.84	**1.92**	4.1	**1.24**	0.01
PTPz30	13-LA09878	**0.33**	0.005	0.9	0.05	1.33	0.015	0.01
PTPz34	13-LA14417	**0.3**	0.005	0.37	0.16	0.895	0.015	0.01
PTPz38	13-LA14496	**0.65**	0.005	0.25	0.05	0.995	0.015	0.01
PTPz39	13-LA12821	**0.181**	0.005	0.39	0.05	0.666	0.02	0.01
PTPzN02	13-LA13438	**6.6**	0.005	0.03	0.47	7.36	0.015	0.01
PTPzN04	13-LA14415/GEOAS19/229	**8.3**	**0.84**	1.2	**2.41**	**22.2**	**1.64**	0.01
PTPzN04B	13-LA14409	0.08	0.02	0.14	0.31	**95.5**	0.019	0.01
PTPzN06	13-LA14429	**1.32**	0.005	0.03	0.05	1.43	0.015	0.01
PTPzN07	13-LA14431	**10.8**	0.005	0.03	0.05	**10.9**	0.015	0.01
PTPzN08	13-LA13440	**0.6**	0.005	0.03	0.23	0.915	0.015	0.01
PTPzN10	13-LA14427	**0.175**	0.005	0.5	0.26	1.01	0.015	0.01
PTPzN11	13-LA14228	**0.29**	0.005	**1.64**	0.08	2.08	0.015	0.01

Piezometro	Certificato	Triclorometano	1,1-Dicloroetilene	Tricloroetilene	Tetracloroetilene	Sommatoria organoalogenati	1,2-Dicloropropano	Esaclorobenzene
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
PTPzN12	13-LA14248	0.015	0.005	0.03	0.05	0.118	0.015	**3.3**
PTPzN13	13-LA13448	**0.61**	0.005	0.35	0.23	1.26	0.015	0.01
PTPzN14	13-LA13436	**1.39**	0.005	0.3	0.27	2.03	0.015	0.01
PTPzN15	13-LA14232	**1.77**	0.005	0.03	0.05	1.88	0.015	0.01
PTPzN18	13-LA14234	**0.172**	0.005	0.03	0.05	0.282	0.015	0.01
PTPzN19	13-LA13295	**0.25**	0.005	0.09	0.48	1.38	0.015	0.01
PTPzN22	13-LA14425	**0.98**	0.005	0.37	0.24	1.66	0.015	0.01
PTPzN23	13-LA14214	**0.49**	0.005	0.16	0.05	0.746	0.015	0.01
PTPzN27	13-LA14224	**3.1**	0.005	0.7	0.05	3.9	0.015	0.01
PTPzN28	13-LA14222	**0.184**	0.005	0.03	0.13	0.446	0.015	0.01

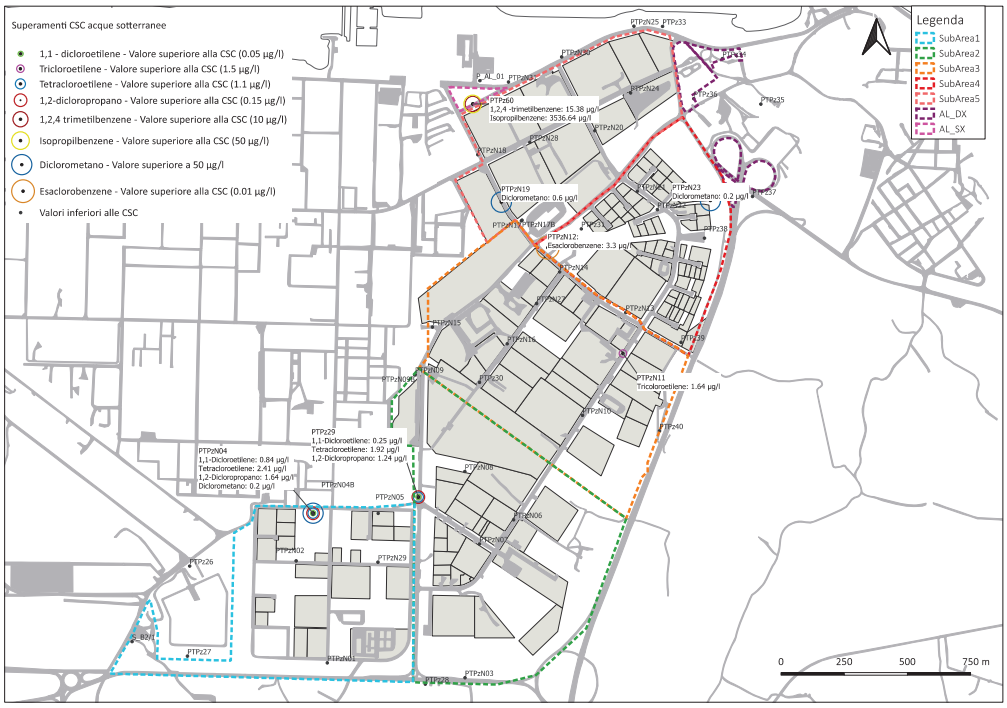


Figura 13. Superamenti CSC nelle acque di falda – Solventi aromatici, Alifatici clorurati cancerogeni e Clorobenzeni

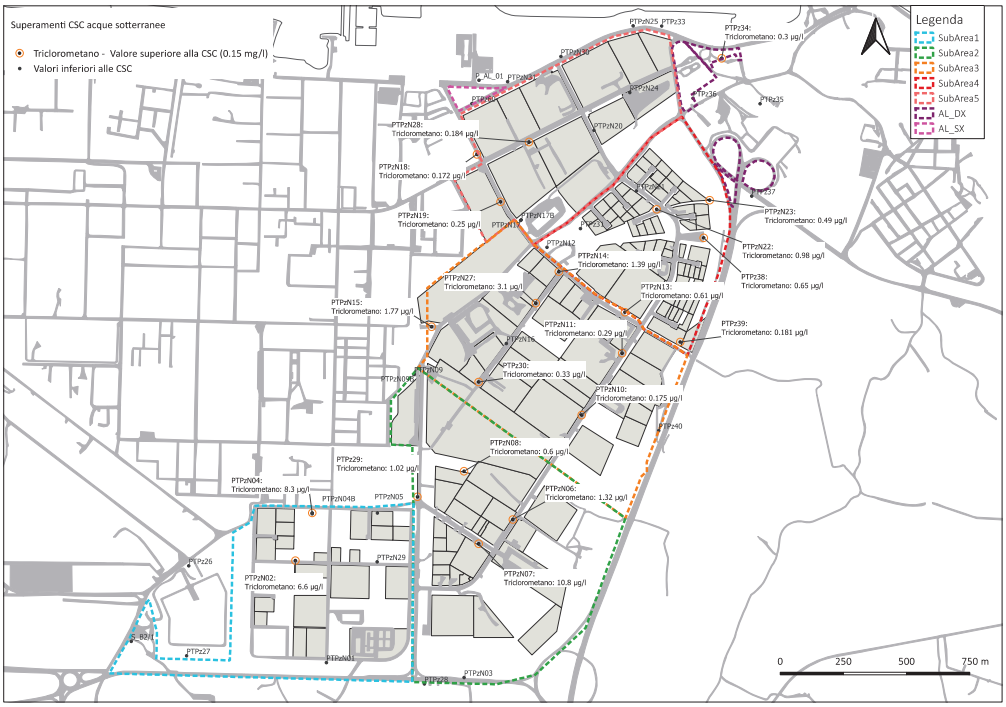


Figura 14. Superamenti CSC nelle acque di falda – Triclorometano

La caratterizzazione mette dunque in luce una contaminazione diffusa, in particolare da composti alifatici clorurati cancerogeni (triclorometano) ed in misura minore da composti inorganici, composti organici aromatici, idrocarburi e solventi aromatici.

Si fa presente che le eccedenze delle CSC rilevate in falda non sono correlabili ai centri di pericolo localizzati all'interno delle aree libere consortili ma a centri di pericolo presumibilmente esterni, per la cui identificazione appare opportuna l'attivazione della procedura di individuazione del responsabile della contaminazione da parte dell'amministrazione competente ai sensi dell'art.244 del D.Lgs. 152/2006.

Tutti i contaminanti rinvenuti in falda sono stati comunque inclusi nell'elaborazione dell'Analisi di Rischio al fine di verificarne i rischi sanitari associati, ad eccezione dei contaminanti metallici ed inorganici ai quali, non essendo volatili, non sono associate vie attive di esposizione.

4 MODELLO CONCETTUALE

4.1 INTRODUZIONE

Preliminarmente all'elaborazione dell'analisi di rischio sanitario (AdR) è individuato il Modello Concettuale del Sito (MCS) che definisce:

- le sorgenti di contaminazione distinte in sorgenti primarie, rappresentate dell'elemento che è causa di inquinamento, e sorgenti secondarie identificate invece con il comparto ambientale contaminato (suolo, acqua, aria). In accordo agli standard di riferimento la procedura di analisi di rischio viene applicata esclusivamente alle sorgenti secondarie di contaminazione;
- le vie di migrazione: vengono distinte in base alla sorgente di contaminazione. Per il suolo superficiale si considerano l'ingestione di suolo, il contatto dermico, la volatilizzazione, l'inalazione di polveri e la lisciviazione verso la risorsa idrica sotterranea; nel caso di un suolo profondo si considerano i percorsi di volatilizzazione e di lisciviazione in falda; per la zona satura, la migrazione verso il punto di conformità, cioè il punto "teorico" o "reale" di valle idrogeologico, in corrispondenza del quale devono essere rispettati gli obiettivi di qualità delle acque sotterranee;
- i bersagli della contaminazione: recettori umani, caratterizzati in base alla destinazione d'uso del sito contaminato (per le aree industriali/commerciali sono adulti lavoratori).

4.2 SORGENTI SECONDARIE DI CONTAMINAZIONE

Sulla base dei risultati della caratterizzazione, nel sito d'interesse costituiscono sorgenti secondarie di contaminazione i seguenti due comparti ambientali:

- il terreno insaturo profondo (profondità superiore a 1 m);
- l'acqua di falda.

4.2.1 Terreno insaturo profondo

Le indagini di caratterizzazione del sito hanno messo in evidenza il superamento della CSC del parametro arsenico in 14 punti della matrice terreno profondo (profondità >1 m); tale elemento costituisce il contaminante indice per la sorgente di contaminazione suolo profondo.

4.2.1.1 Delimitazione dell'area sorgente

La delimitazione areale della sorgente secondaria suolo profondo è stata effettuata seguendo la procedura indicata nelle Linee Guida ISPRA:

- suddivisione dell'area (Figura 15) in poligoni di influenza o di Thiessen e individuazione dei poligoni in cui si verifica il superamento della CSC del contaminante indice;
- eventuale aggregazione dei poligoni nei casi di:
  - poligoni contaminati contigui (continuità spaziale);
  - poligoni che pur non presentando superamento della CSC concorrono alla delimitazione della sorgente secondo l'analisi del vicinato.

Le sorgenti così determinate sono illustrate in Figura 16.

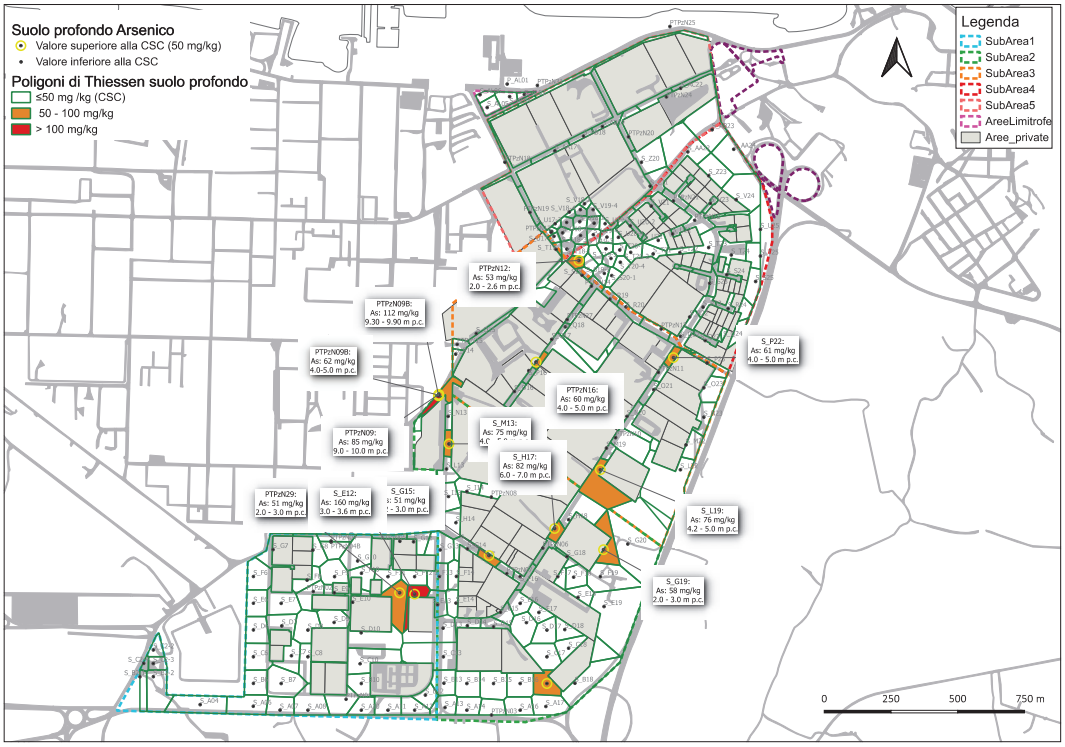


Figura 15. Poligoni di Thiessen – suolo profondo

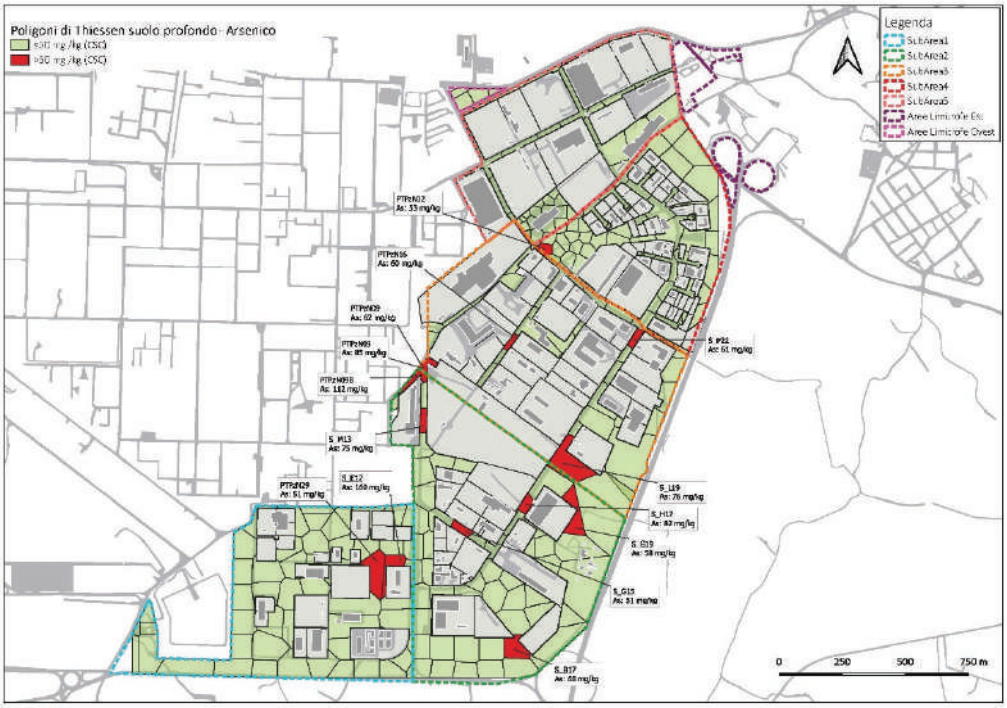


Figura 16. Delimitazione sorgenti di contaminazione del suolo profondo

4.2.2 Acqua di falda

Le indagini effettuate sull'acqua di falda (acquifero Detritico-Carbonatico Oligo-Miocenico) hanno evidenziato una contaminazione diffusa di triclorometano e una contaminazione localizzata relativa ad altri inquinanti quali composti alifatici clorurati cancerogeni, composti inorganici, composti organici aromatici, idrocarburi e solventi aromatici.

Quali contaminanti indice della sorgente acqua di falda sono stati considerati solo i contaminanti volatili che hanno concentrazioni superiori alle CSC (Tabella 7), i soli per i quali sono attive le vie di trasmissione ai recettori umani.

Tabella 7. Contaminanti indice della matrice acqua di falda

Contaminate	Limiti D. Lgs 152/2016 parte IV, titolo V, allegato 5, Tabella 2	Contaminate	Limiti D. Lgs 152/2016 parte IV, titolo V, allegato 5, Tabella 2
Benzene	1	1,1-Dicloroetilene	0.05
para-Xilene	10	Tricloroetilene	1.5
1,2-Dicloropropano	0.15	Tetracloroetilene	1.1
Esaclorobenzene	0.01	Idrocarburi totali (n-esano)	350
Triclorometano	0.15		

4.2.2.1 Delimitazione dell'area sorgente

Per la delimitazione della sorgente *Acqua Sotterranea* è stata applicato il medesimo procedimento descritto per la sorgente suolo sotterraneo ovvero mediante i poligoni di Thiessen derivanti dalle indagini ambientali svolte; in Figura 17 si riportano i poligoni in cui si sono registrate concentrazioni superiori alle CSC dei contaminanti indice, con indicazione del loro valore.

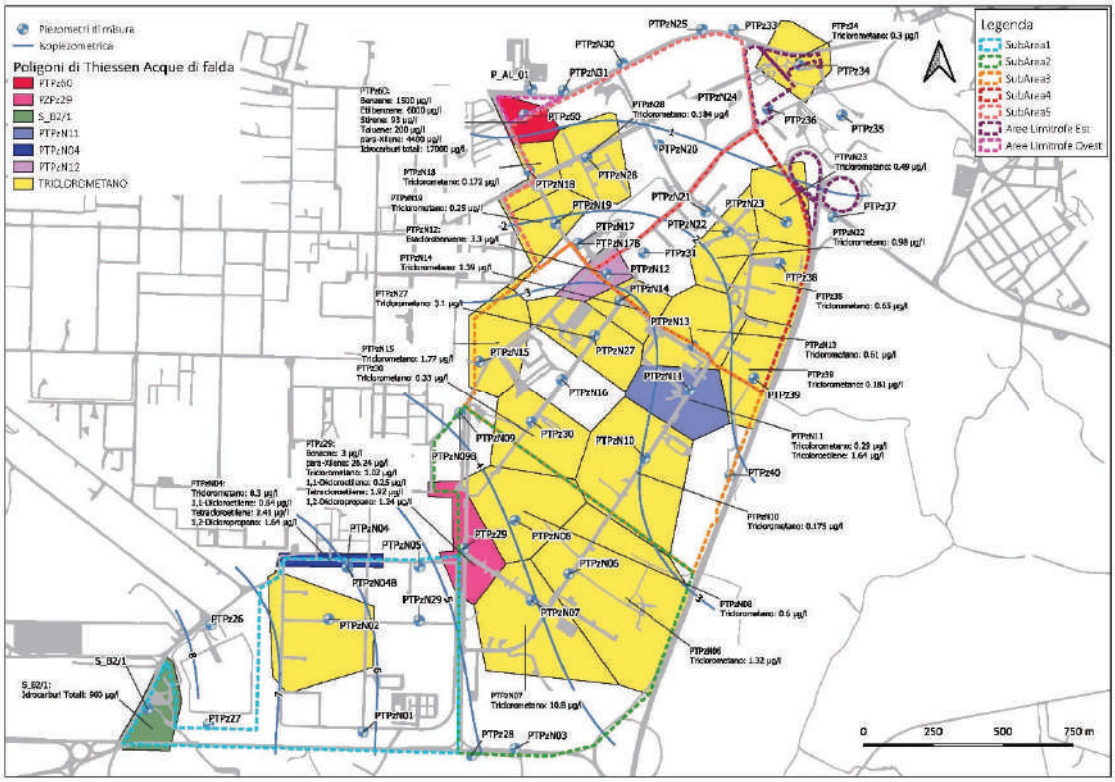


Figura 17. Poligoni di Thiessen - Acqua di falda

La distribuzione spaziale dei poligoni ha portato all'individuazione di 7 sorgenti secondarie di contaminazione nell'acqua di falda. Di queste, 6 sono costituite dall'area di influenza (poligono di Thiessen) dei piezometri PTPz29, PTPz60, PTPzN04, PTPzN11, PTPzN12 e S_B2/1 (superamenti in Figura 18). Relativamente alla contaminazione da triclorometano, data la presenza diffusa di tale inquinate nella falda, quale estensione della sorgente è stata assunta l'intera area del sito.

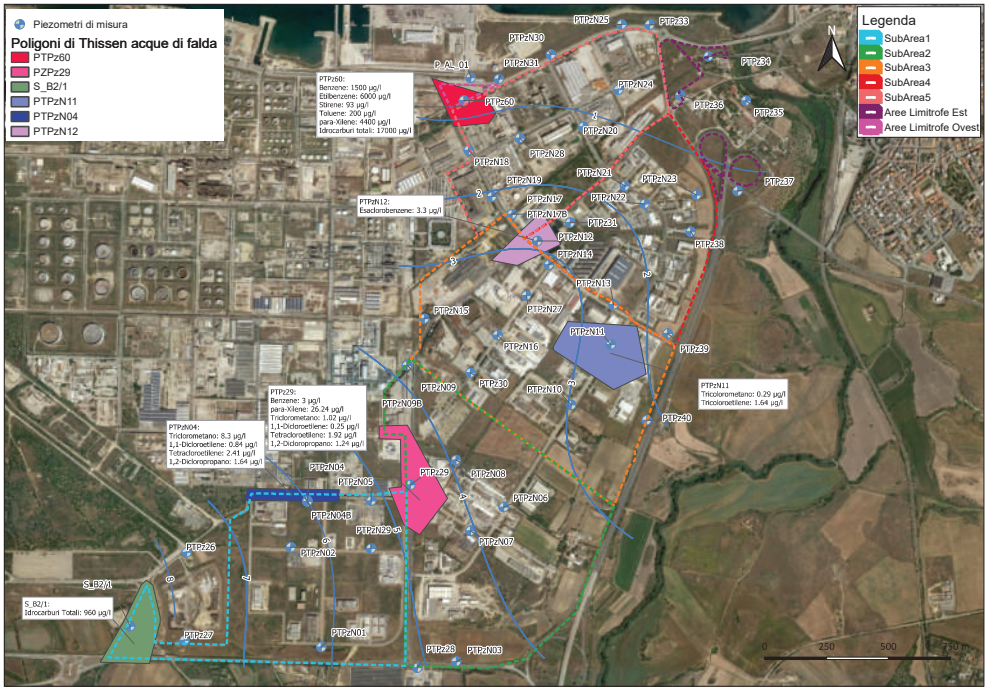


Figura 18. Sorgenti secondarie acqua di falda dei contaminati indice ad eccezione del triclorometano

4.3 BERSAGLI DELLA CONTAMINAZIONE

Le acque sotterranee rappresentano la principale via di trasmissione dei contaminanti. La loro direzione di moto, da SO verso NE, individua quali bersagli ambientali della contaminazione:

- l'area marina antistante le aree consortili;
- la parte terminale dell'asta fluviale del Rio Mannu.

Nella procedura di analisi di rischio sanitaria vengono presi in considerazione solo recettori umani le cui caratteristiche dipendono dalla destinazione d'uso del sito:

- residenziale (bersagli: adulti e bambini);
- ricreativo (bersagli: adulti e bambini);
- industriale/commerciale (bersagli: adulti).

Nel caso in oggetto, di uso industriale dell'area (Piano Regolatore del Consorzio Industriale, Figura 2), i bersagli della contaminazione sono rappresentati esclusivamente da lavoratori adulti.

In riferimento a questi si configurano 2 differenti scenari espositivi:

- quello relativo ai lavoratori continuativamente presenti nell'area (SCENARIO 1);
- quello relativo a lavoratori (operaio edile) che permangono nell'area per un tempo limitato, sufficiente a svolgere attività connesse alla realizzazione di edifici o posa di infrastrutture (SCENARIO 2).

Considerando infatti che tutte le aree oggetto sono costituite da terreni destinati a insediamenti industriali/commerciali e che parte di essi (strade e fasce di rispetto) sono sede di reti tecnologiche, appare realistico valutare il rischio a cui sono sottoposti i lavoratori impegnati in eventuali operazioni di scavo, durante le quali i terreni profondi contaminati sono portati in prossimità della superficie. Tale scenario si differenzia dallo SCENARIO 1 per le differenti vie di esposizione che in questo caso comprendono oltre l'inalazione, il contatto dermico, l'inalazione di polveri e l'ingestione oltre per il tempo e la frequenza dell'esposizione stessa (durata e frequenza) ma soprattutto. Per tale scenario sono state assunte la durata di esposizione di un anno e la frequenza di 90 giorni.

Considerato che la profondità degli scavi sarà ragionevolmente limitata a 3 metri, sono state considerate esclusivamente le sorgenti la cui parte sommitale si trova a profondità inferiore a 3 metri.

In riferimento alla protezione della risorsa idrica, il D.Lgs. 04/08 (art. 2 comma 43) definisce il punto di conformità (POC) come "il punto a valle idrogeologico della sorgente al quale deve essere garantito il ripristino dello stato originale (ecologico, chimico e/o quantitativo) del corpo idrico sotterraneo, onde consentire tutti i suoi usi potenziali (…). Pertanto in attuazione del principio generale di precauzione, il punto di conformità deve essere di norma fissato non oltre i confini del sito contaminato oggetto di bonifica e la relativa CSR per ciascun contaminante deve essere fissata equivalente alle CSC di cui all'Allegato 5 della parte quarta del presente decreto".

Considerando la geometria particolarmente eterogenea del sito, caratterizzato dalla sovrapposizione di aree pubbliche (oggetto dell'indagine) e di aree private (non oggetto dell'indagine), non risulta facilmente identificabile un confine di valle del sito, per questo motivo non viene identificato un punto di conformità off-site.

4.4 PERCORSI O VIE DI ESPOSIZIONE

Per lo SCENARIO 1 sono stati considerati potenzialmente attivi i seguenti percorsi di esposizione, caratteristici delle diverse sorgenti di contaminazione:

- Suolo Profondo: considerata la tipologia del contaminante (arsenico), l'unico meccanismo di trasporto attivo è il dilavamento (lisciviazione e trasporto in falda);
- Falda: volatilizzazione dei vapori verso ambienti indoor ed outdoor e trasporto nella risorsa idrica sotterranea.

Il percorso di esposizione verso gli ambienti indoor viene considerato attivo solo nel caso in cui siano presenti edifici adibiti ad uso commerciale/industriale in prossimità dell'area sorgente.

Per lo SCENARIO 2 sono stati considerati potenzialmente attivi i seguenti percorsi di esposizione, caratteristici delle diverse sorgenti di contaminazione:

- Suolo superficiale (diventato tale a seguito dello scavo): contatto dermico, ingestione di suolo e inalazione di particolato in ambiente outdoor;
- Falda: volatilizzazione dei vapori verso ambienti outdoor.

4.5 SINTESI DEL MODELLO CONCETTUALE

Il MCS è stato elaborato sulla base delle risultanze delle attività di caratterizzazione svolte a partire dal 2014 e concluse nel 2019. Da tali attività emerge che i comparti ambientali oggetto di contaminazione, sono:

- la zona insatura – suolo profondo (profondità > 1 m);
- l'acqua di falda (acquifero Detritico-Carbonatico Oligo-Miocenico).

Relativamente al suolo profondo, la contaminazione si riferisce unicamente all'Arsenico. In riferimento a tale contaminante, come meglio argomentato al paragrafo 3.2.2, vi è la ragionevole certezza che i superamenti della CSC siano legati alla composizione mineralogica delle calcareniti e che abbiano, dunque, origine naturale.

Relativamente all'acqua di falda, la caratterizzazione mette in luce una contaminazione diffusa da tricolorometano ed in misura minore da composti inorganici, composti organici aromatici, idrocarburi e solventi aromatici. Tale contaminazione non risulta correlabile ai centri di pericolo localizzati all'interno delle aree libere consortili ma presumibilmente a centri di pericolo esterni per la cui identificazione appare opportuna l'attivazione della procedura di individuazione del responsabile della contaminazione da parte dell'amministrazione competente ai sensi del D.Lgs. 152/2006.

Data la destinazione d'uso industriale dell'area, i bersagli della contaminazione sono rappresentati esclusivamente da lavoratori adulti, in riferimento ai quali si configurano 2 differenti scenari espositivi:

- SCENARIO 1 relativo ai lavoratori abitualmente impiegati nell'area;
- SCENARIO 2 relativo a lavoratori impegnati in attività di scavo per realizzazione di nuovi edifici o infrastrutture.

In riferimento allo SCENARIO 1, le sorgenti secondarie di contaminazione sono rappresentate dal suolo profondo e dall'acqua di falda; ad esse sono associati i seguenti percorsi di esposizione:

- dilavamento (lisciviazione e trasporto in falda) per il suolo profondo;
- volatilizzazione dei vapori verso ambienti indoor ed outdoor e trasporto nella risorsa idrica sotterranea per l'acqua di falda.

Si ritiene che non possa essere determinato un punto di conformità ai confini del sito, per la particolare conformazione geometrica del sito stesso. Tutte le verifiche sono state effettuate considerando un punto di conformità interno al sito (POC=0).

In Figura 19 si riporta la schematizzazione del modello concettuale relativo allo SCENARIO 1 in cui sono evidenziati i percorsi di esposizione considerati attivi.

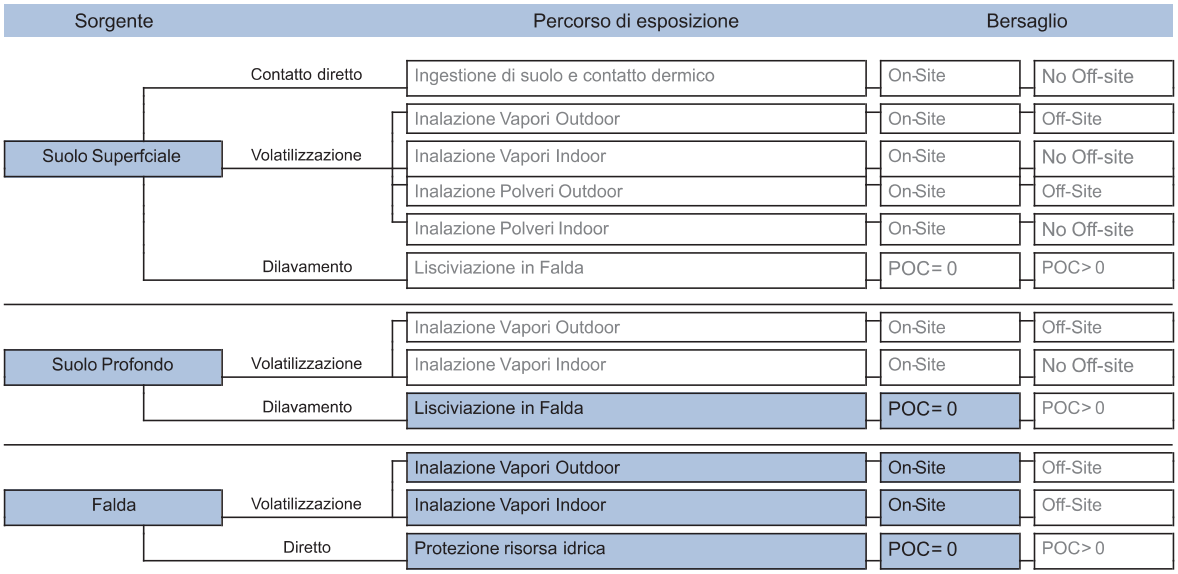


Figura 19. Modello concettuale del sito – SCENARIO 1

In riferimento allo SCENARIO 2, le sorgenti secondarie di contaminazione sono rappresentata dal suolo superficiale e dall'acqua di falda; ad esse sono associate i seguenti percorsi di esposizione:

- ingestione diretta di suolo, contatto dermico e inalazione di polveri in ambiente esterno (outdoor) per il suolo superficiale;
- volatilizzazione dei vapori verso ambienti indoor ed outdoor.

La schematizzazione del modello concettuale per questo scenario è riportata in Figura 20.

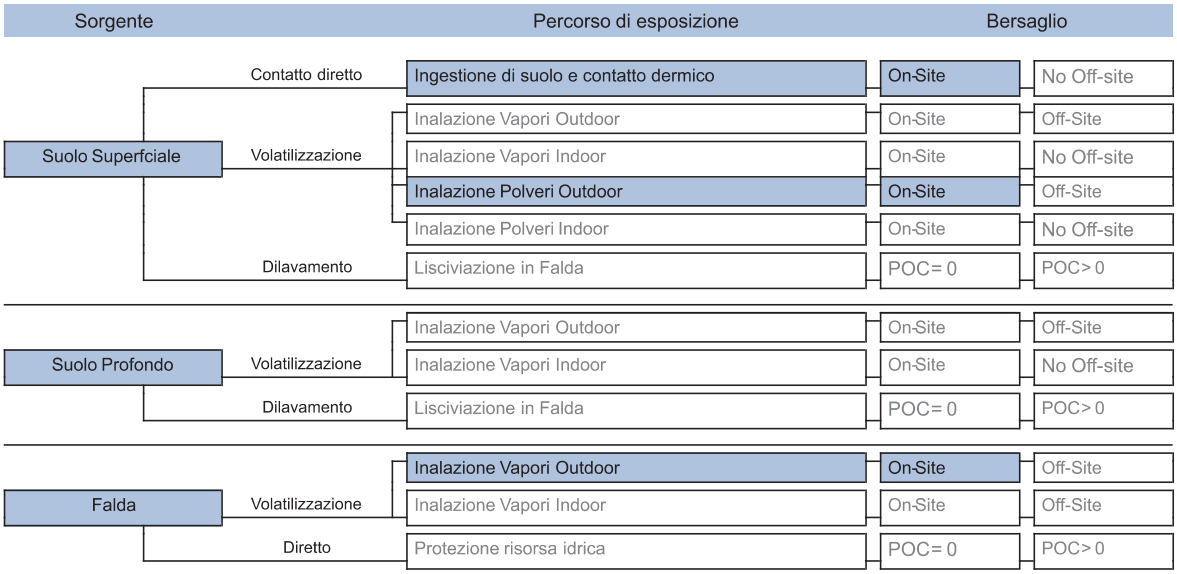


Figura 20. Modello concettuale del sito – Scenario 2

5 APPLICAZIONE DELL'ANALISI DI RISCHIO

5.1 GENERALITÀ

Le analisi sono state condotte utilizzando il software Risk-net 3.1 che permette di calcolare il rischio e gli obiettivi di bonifica legati alla presenza di contaminanti all'interno di un sito potenzialmente contaminato, applicando la procedura ISPRA di analisi di rischio sanitaria ("Criteri metodologici l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati"; ISPRA 2008) in accordo con quanto previsto dalla normativa italiana (D.Lgs. 152/06 e D.Lgs. 04/08). La versione 3.1 del software è stata sviluppata per tener conto degli ultimi aggiornamenti, in termini di parametri e modalità di calcolo, previsti nella banca dati ISS-INAIL (2018) e nelle nuove linee guida SNPA (2018) sulla gestione dei dati soil-gas.

I parametri chimico/fisici e tossicologici dei contaminanti indice individuati sono stati desunti dalla banca dati ISS-INAIL (2018), impostata di default in Risk-net.

5.2 DEFINIZIONE DI RISCHIO E CRITERI DI ACCETTABILITÀ

5.2.1 Rischio Sanitario

In riferimento ad un sito contaminato il rischio R è calcolato sulla base della seguente espressione:

$$R = E \cdot T$$

Dove: E ([mg/kg d]) rappresenta l'assunzione cronica giornaliera del contaminante e T ([mg/kg d]$^{-1}$) la tossicità di tale sostanza.

Il rischio calcolato viene confrontato con i criteri di accettabilità individuali e cumulativi del rischio sanitario, per decidere se esistono o meno condizioni in grado di causare effetti sanitari nocivi.

Il rischio per la salute umana viene suddiviso in rischio non cancerogeno e rischio cancerogeno.

Per le sostanze cancerogene il rischio è espresso dall'equazione:

$$R = E \cdot SF$$

Dove: R (adim) rappresenta la probabilità di casi incrementali di tumore nel corso della vita, causati dall'esposizione alla sostanza, rispetto alle condizioni di vita usuali, E (mg/kg d) rappresenta l'assunzione cronica giornaliera del contaminante, SF (Slope Factor [mg/kg d]$^{-1}$) indica la probabilità di casi incrementali di tumore nella vita per unità di dose.

Per le sostanze tossiche viene invece utilizzata l'espressione dell'indice di pericolo, definito da:

$$HI = \frac{E}{RfD}$$

Dove: HI (adim) è l'Indice di Pericolo, che esprime di quanto l'esposizione alla sostanza supera la dose tollerabile o di riferimento, E (mg/kg d) rappresenta l'assunzione cronica giornaliera del contaminante, cioè la quantità giornaliera di contaminante effettivamente assunta (per via orale, inalatoria o dermica) dal recettore, RfD (Reference Dose [mg/kg d]) è la stima dell'esposizione media giornaliera che non produce effetti nocivi apprezzabili sull'organismo umano durante il corso della vita.

Il calcolo del rischio per la salute umana associato alla presenza di più contaminanti viene effettuato (Rischio Cumulativo), in accordo con quanto definito nel documento ISPRA (2008), sommando il rischio (o l'indice di pericolo) di ogni singola specie chimica contaminate:

$$R_{tot} = \sum_{i=1}^{n} R_i \quad \text{(Rischio totale per le sostanze cancerogene)}$$

$$HI_{tot} = \sum_{i=1}^{n} HI_i \quad \text{(Indice di Pericolo totale per le sostanze non cancerogene)}$$

Il rischio e l'indice di pericolo totale vengono poi confrontati con i criteri di accettabilità individuali e cumulativi rappresentati da valori soglia per decidere se esistono o meno condizioni in grado di causare effetti sanitari nocivi e pertanto se il sito risulta contaminato.

Il limite di accettabilità del rischio individuale per le sostanze cancerogene è pari a 1.0E-06, mentre quello cumulativo è pari a 1.0E-05 (D.Lgs. 152/06 e s.m.i.); l'indice di Pericolo deve assumere un valore inferiore ad 1 sia per quanto riguarda il rischio individuale sia per quello cumulativo, secondo il criterio universalmente accettato del non superamento della dose tollerabile o accettabile definita per la sostanza (come da D. Lgs. 152/06).

5.2.2 Rischio per la Risorsa Idrica Sotterranea

Il rischio per la risorsa idrica sotterranea si calcola ponendo a confronto il valore di concentrazione del contaminante in falda, in corrispondenza del Punto di Conformità, con i valori di riferimento per la falda (Concentrazioni Soglia di Contaminazione) previsti dalla normativa vigente per i siti contaminati.

Il valore del Rischio per la risorsa idrica sotterranea (R_{GW}) è definito numericamente dal rapporto tra la concentrazione del contaminante in falda in corrispondenza del punto di conformità (C(PoE)) ed i valori di riferimento per la falda (CSC):

$$R_{GW} = \frac{C(PoE)}{CSC}$$

Si considera accettabile il rischio per la risorsa idrica sotterranea quando R_{GW} assume valori pari o inferiori a 1.

5.3 DATI DI INGRESSO

5.3.1 Parametri caratteristici del sito determinati in fase di caratterizzazione

I parametri necessari alla completa caratterizzazione del terreno insaturo, e della falda acquifera sono stati valutati in base ai dati sito-specifici acquisiti nella fase di caratterizzazione ambientale del sito.

Nello specifico sono stati determinati:

- densità del suolo (g/cm^3);
- contenuto naturale d'acqua in percentuale w;
- frazione di carbonio organico (gC/gsuolo);
- pH;
- curva granulometrica;
- determinazione del coefficiente di ripartizione solido-liquido Kd.

Oltre a tali parametri è stata determinata la direzione prevalente del vento necessaria per la per la caratterizzazione geometrica delle sorgenti.

5.3.1.1 Densità del suolo, contenuto d'acqua, frazione di carbonio organico e pH

In Tabella 8 sono riportate le determinazioni effettuate in riferimento al terreno insaturo, mentre in Tabella 9 quelle riferite al terreno saturo.

Tabella 8. Determinazione dei parametri sito specifici nel terreno insaturo

Sub Area	Sondaggio	Campione	Profondità [da – a m da pc]		pH [-]	FOC [g-C/g-suolo]	Wr [%]	γ [kN/m^3]
1	S_A04	CG1	0	1	8.4	2.1	8.81	16.55
1	S_A04	CG2	3	4	9.5	5.6	11.66	16
2	S_G19	CG1	3.1	4	7.5	0.035	5.87	15.48
2	S_C18	CG1	3	4	7.8	0.037	18.41	16.25
2	S_C18	CG2	11	12	7.8	0.035	15.18	14.19
2	S_L13	CG1	0	1	8	0.041	6.32	14.98
2	S_L13	CG2	8	9	8	0.038	4.69	15.42
2	S_L13	CG3	10.6	10.9	8	0.035	22.08	19.91
3	S_P22	CG1	0	1	8	0.04	6.4	15.05
3	S_Q17	CG1	0	1	7.7	0.03	8.03	14.73
3	S_Q17	CG2	7	7.5	7.6	0.057	17.07	14.9
4	S_R23	CG2	3.5	4	9	0.061	7.52	14.12
4	S_R23	CG1	0	1	9.5	0.026	20.43	14.53
4	S_U20/2	CG1	0	0.6	7.7	0.03	7.99	14.29
5	S_T18/1	CG1	0	0.7	7.6	0.067	6.13	15.93
5	S_T18/1	CG2	5	6	7.6	0.08	10.07	16.91
5	S_AB20	CG1	6	6.5	7.5	0.057	8.58	14.55
	Minimum				7.5	0.026	4.7	14.1
	Maximum				9.5	0.080	22.1	19.9
	Mean				7.95	0.045	11.0	15.4
	SD				0.56	0.016	5.9	1.5
	Coefficient of Variation				0.07	0.355	0.5	0.1
	95% Student's-t UCL				8.2	0.052	13.7	16.1
	95% Student's-t LCL				7.7	0.037	8.3	14.7

Tabella 9. Determinazione dei parametri sito specifici nel terreno saturo

Sub Area	Sondaggio	Campione	Profondità [da – a m da pc]		pH [-]	FOC [g-C/g-suolo]	Wr [%]	γ [kN/m^3]
2	S_C18	CG3	17	17.5	7.9	0.0	10.7	18.0
5	S_AB20	CG2	12.5	13	7.5	0.1	18.5	20.6

Sub Area	Sondaggio	Campione	Profondità [da – a m da pc]		pH [-]	FOC [g-C/g-suolo]	Wr [%]	γ [kN/m³]
AL	P_AL_01	CG1	7	8	8.3	0.0	15.3	18.0
	Minimum				7.5	0.0	10.7	18.0
	Maximum				8.3	0.1	18.5	20.6
	Mean				7.9	0.0	14.8	18.9

5.3.1.2 Tessitura del terreno insaturo e saturo

I risultati delle prove per la determinazione della granulometria dei terreni eseguite durante le campagne d'indagine (Progetto PO FESR Sardegna 2007-2013 e Piano di indagine CIP Sassari) sono sintetizzati in Tabella 10.

Tabella 10. Riepilogo della caratterizzazione granulometrica

Sondaggio/campione	Profondità [m da pc]	% Sabbia	% Limo	% Argilla	Matrice
PTPzN01/6	11.6-12.3	11.69	73.87	14.44	INSATURO
PTPzN02/5	13.0-14.0	80.87	17.3	1.83	INSATURO
PTPzN02/6	15.0-16.0	13.4	74.3	12.3	INSATURO
PTPzN03/G1	1.4-1.6	7.23	78.26	14.51	INSATURO
PTPzN04B/6	10.5-11.5	80.73	16.92	2.35	INSATURO
PTPzN04B/G1	1.0-1.1	27.25	68.48	4.27	INSATURO
PTPzN04B/G2	3.0-3.1	39.33	58.76	1.91	INSATURO
PTPzN05/5	11.8-12.5	88.31	10.61	1.09	INSATURO
PTPzN06/6	11.5-12.5	94.03	5.97	0	INSATURO
PTPzN06/7	18.0-19.0	96.67	3.33	0	INSATURO
PTPzN06/G1	5.8-6.0	14.21	82.02	3.77	INSATURO
PTPzN07/6	17.5-18.5	15.76	72.89	11.35	SATURO
PTPzN08/6	11.0-12.0	95.38	4.62	0	INSATURO
PTPzN08/7	15.0-16.0	96.24	3.76	0	INSATURO
PTPzN08/G1	1.2-1.4	23.2	62.69	14.11	INSATURO
PTPzN09B/G1	1.2-1.3	24.41	65.6	9.99	INSATURO
PTPzN10/6	14.0-15.0	87.41	11.16	1.43	INSATURO
PTPzN10/G1	1.3-1.5	13.34	80.87	5.79	INSATURO
PTPzN11/6	12.0-12.8	91.26	8.74	0	INSATURO
PTPzN12/G1	0.7-0.9	23.94	65.33	10.73	INSATURO
PTPzN13/6	10.0-11.0	9.95	85.33	4.71	INSATURO
PTPzN14/G1	1.0-1.2	18.1	71.44	10.46	INSATURO
PTPzN15/6	10.0-11.0	83.79	14.06	2.15	INSATURO
PTPzN15/G1	7.7-7.8	32.12	61.39	6.49	INSATURO
PTPzN16/G1	3.7-3.9	15.47	76.77	7.76	INSATURO

Sondaggio/campione	Profondità [m da pc]	% Sabbia	% Limo	% Argilla	Matrice
PTPzN18/G1	1.0-2.0	28.33	65.59	6.08	INSATURO
PTPzN19/6	12.0-13.0	60.53	34.47	5	INSATURO
PTPzN20/G1	1.4-1.6	45.1	50.39	4.51	INSATURO
PTPzN21/5	11.0-12.0	96.11	3.89	0	INSATURO
PTPzN21/G1	1.4-1.6	15.49	68.45	16.06	INSATURO
PTPzN21/G2	3.0-3.2	1.66	79.71	18.63	INSATURO
PTPzN22/6	11.0-12.0	95.76	4.24	0	INSATURO
PTPzN22/G1	1.0-1.2	19.65	69.34	11.01	INSATURO
PTPzN22/G2	3.0-3.2	29.78	64.8	5.42	INSATURO
PTPzN24/G1	3.0-3.4	34.72	60.92	4.36	INSATURO
PTPzN27/6	10.0-11.0	82.5	15.38	2.12	INSATURO
PTPzN28/G1	0.5-0.8	68.32	26.48	5.2	INSATURO
PTPzN29/5	13.0-14.0	83.3	14.62	2.08	INSATURO
PTPzN29/6	15.0-15.5	85.23	13.08	1.7	INSATURO
PTPzN31/G1	1.4-1.6	45.06	45.16	9.78	INSATURO
S_A04/CG1	0.0-1.0	44.75	37.26	18	INSATURO
S_A04/CG2	3.0-4.0	50.16	41.84	8	INSATURO
S_AL-01/CG1	7.0-8.0	51.31	43.68	5	INSATURO
S_T18/1/CG1	0.0-0.7	43.36	46.64	10	INSATURO
S_T18/1/CG2	5.0-6.0	42.26	47.73	10	INSATURO
S_AB20/CG1	6.0-6.5	55.82	34.18	8	INSATURO
S_AB20/CG2	12.5-13.0	42.1	50.9	7	SATURO
S_C18/CG1	3.0-4.0	44.95	49.04	6	INSATURO
S_C18/CG2	11.0-12.0	32.37	57.63	10	INSATURO
S_C18/CG3	17.0-17.5	54.37	39.63	6	SATURO
S_G19/CG1	3.1-4.0	73.31	22.68	4	INSATURO
S_L13/CG1	0.0-1.0	55.45	30.55	14	INSATURO
S_L13/CG2	8.0-9.0	47.08	40.91	12	INSATURO
S_L13/CG3	10.6-10.9	38.81	42.19	19	INSATURO
S_P22/CG1	0.0-4.0	68.48	27.52	4	INSATURO
S_Q17/CG1	0.0-1.0	60.8	29.2	10	INSATURO
S_Q17/CG2	7.0-7.5	55.31	39.69	5	INSATURO
S_R23/CG1	0.0-1.0	45.93	34.16	19.9	INSATURO
S_R23CG2	3.5-4.0	12.41	71.59	16	INSATURO
S_U20/2/CG1	0.0-0.6	57.14	30.86	12	INSATURO

In Figura 21 è riportata la classificazione dei terreni secondo l'USDA mentre in Figura 22 sono riportate le analisi granulometriche.

Le analisi granulometriche e il riscontro dei log stratigrafici non hanno messo in evidenza differenze rilevanti fra la tessitura del suolo insaturo (superficiale e profondo) e quella del suolo saturo.

Secondo il metodo USDA, suggerito dalle Linee Guida ISPRA, le tessiture prevalenti nel suolo superficiale e profondo sono “Silt Loam” o come “Sandy Loam”. Nelle simulazioni è stata impostata la più cautelativa tessitura Sandy Loam, .

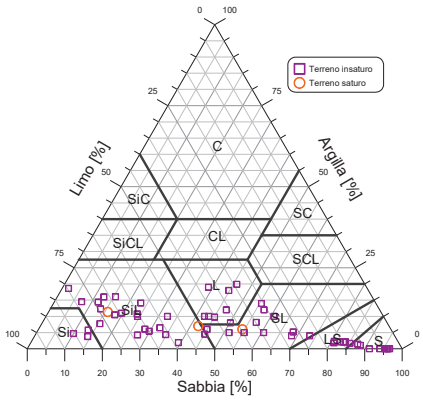


Figura 21. Classificazione dei campioni di terreno secondo l’USDA: S – Sand, LS - Loamy Sand, SL - Sandy Loam, SCL - Sandy Clay Loam, L – Loam, SiL - Silt Loam, CL - Clay Loam, SiCL - Silty Clay Loam, SiC - Silty Clay, Si – Silt, SC - Sandy Clay, C – Clay

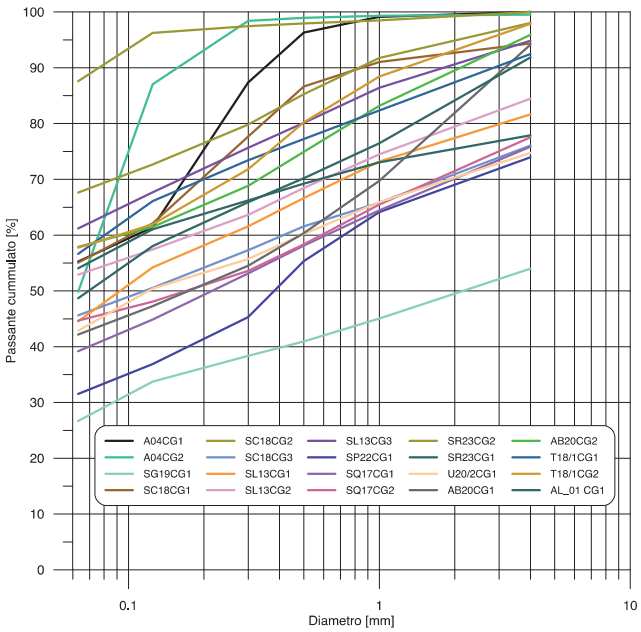


Figura 22. Curve granulometriche dei campioni prelevati

Nel piano di indagine integrativo è stato inoltre determinato sperimentalmente il coefficiente di ripartizione solido-liquido – Kd seguendo la procedura APAT Prot.011376 del 4 aprile 2007 in

riferimento all'arsenico. Tale coefficiente è risultato pari a 7366 L/Kg (rif. Certificato analitico GEOAS19/195). Il dato è stato utilizzato in sostituzione del valore di default presente nel database ISS-INAIL (2018).

5.3.1.3 Direzione prevalente del vento

La caratterizzazione anemologica del sito è stata effettuata utilizzando i dati della stazione meteo di Alghero nel periodo di osservazione disponibile 2010-2018[3].

In Figura 23 si riporta l'analisi delle frequenze dei venti, raggruppate per classi di velocità; da essa emerge che:

- i venti più frequenti sono quelli provenienti da ovest, in particolare il ponente (12.7%) e il maestrale (11.8%) e con frequenza leggermente inferiore quelli provenienti da Nord - Nord Est, in particolare il grecale (12%) e la tramontana 10.6%. Significativa è anche la frequenza (4.9%) dei venti da Sud Ovest (libeccio);
- i venti provenienti da ovest, nord-ovest spirano in genere con forte intensità e nel 60-70% dei casi sono caratterizzati da velocità superiori ai 7 m/s.

La frequenza della calma di vento (velocità inferiore a circa 0.5 m/s) è pari a circa l'5.3% delle osservazioni effettuate.

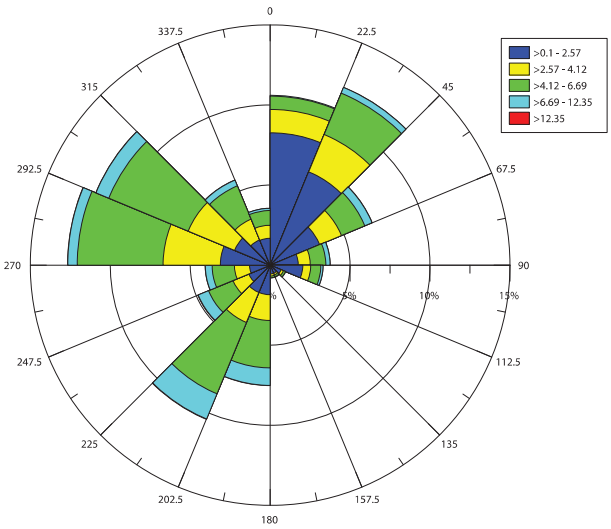


Figura 23. Frequenza percentuale della direzione dei venti 2009-2019

[3] SCIA - Sistema nazionale per l'elaborazione e diffusione di dati climatici - ISPRA

5.3.2 Parametri geometrici delle sorgenti secondarie

5.3.2.1 Terreno insaturo

Per ciascuna delle sorgenti individuate in Tabella 11 si riportano i valori dei parametri geometrici utilizzati per la stima dei fattori di trasporto. In particolare, si fa riferimento alla dimensione della sorgente nella direzione del flusso di falda (Figura 24 e Figura 25). Nello specifico tali parametri sono:

- A: superficie della sorgente;
- W: Dimensione della sorgente nella direzione del flusso di falda;
- Sw: Dimensione della sorgente nella direzione ortogonale al flusso di falda;
- Ls,SP: Profondità del top della sorgente nel suolo profondo rispetto al p.c.;
- ds: Spessore della sorgente nel suolo profondo insaturo;
- Lgw: Soggiacenza della falda da p.c.

La dimensione delle sorgenti secondarie rispetto al flusso di falda è stata determinata su base cartografica. La profondità del top e lo spessore di ciascuna sorgente sono state desunte dalla profondità e dallo spessore del campione contaminato prelevato dai sondaggi; la soggiacenza della falda rispetto al piano di campagna è stata determinata sulla base della ricostruzione piezometrica effettuata nella fase di caratterizzazione ed assumendo il valore più cautelativo corrispondente al minimo valore rilevato nell'areale corrispondente a ciascuna sorgente.

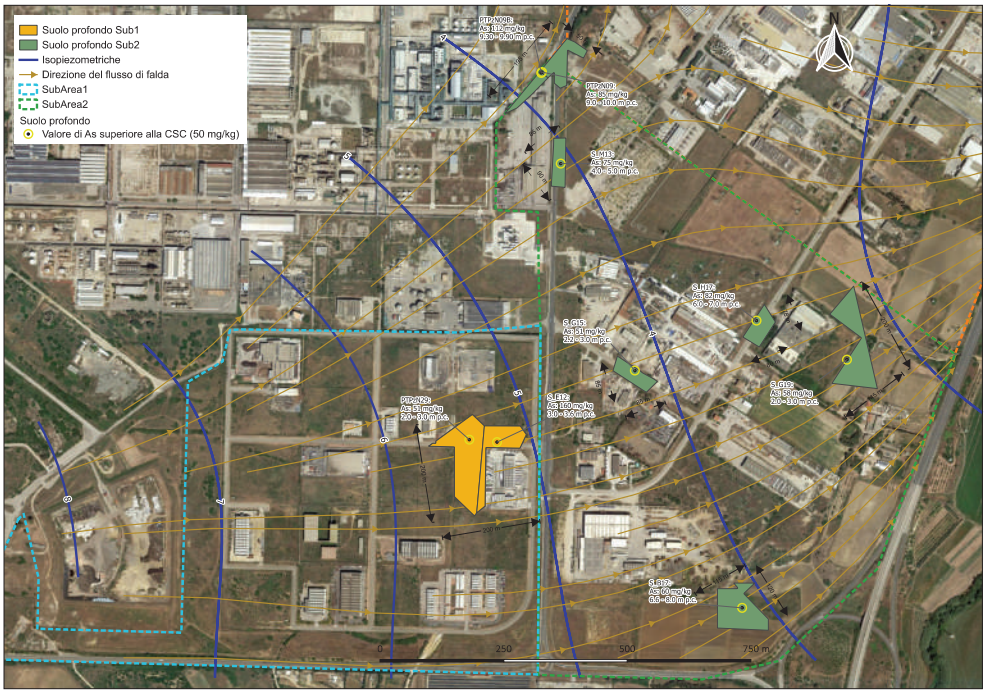


Figura 24.Dimensioni delle sorgenti secondarie di contaminazione nel suolo profondo lungo la direzione della falda – Subarea 1 e 2



Figura 25. Dimensioni delle sorgenti secondarie di contaminazione nel suolo profondo lungo la direzione della falda – Subarea 3 e 4

Tabella 11. Caratteristiche geometriche delle sorgenti suolo profondo rispetto alla direzione del flusso di falda

sub area	Poligono	Sorgente	A [m2]	W [m]	Sw [m]	Ls,SP [m]	ds [m]	Lgw [m]
1	PTPzN29+S_E12	SP_S1	15350.0	200.0	200.0	2.0	1.6	19.1
2	PTPzN09+PTPzN09B	SP_S2	5241.5	195.0	50.0	9.0	1.0	16.5
2	S_G15	SP_S3	2624.2	85.0	85.0	2.2	0.8	17.7
2	S_G19	SP_S4	8389.2	145.0	200.0	2.0	1.0	19.1
2	S_H17	SP_S5	2671.4	80.0	78.0	6.0	1.0	21.0
2	S_B17	SP_S6	7056.7	115.0	120.0	6.0	0.8	9.7
2	S_M13	SP_S7	2557.6	86.0	90.0	4.0	1.0	18.2
3	S_P22	SP_S8	2463.0	100.0	90.0	4.0	1.0	18.0
3	PTPzN16	SP_S9	1425.9	70.0	40.0	4.0	1.0	21.6
3	S_L19	SP_S10	15423.5	200.0	178.0	4.2	0.8	21.2
4	PTPzN12	SP_S11	2356.6	75.0	50.0	2.0	0.6	20.5

Delle sorgenti ubicate a una profondità inferiore a 3 m rispetto al p.c, considerate nello SCENARIO 2 come suolo superficiale, sono state calcolate le seguenti caratteristiche dimensionali riferite alla direzione del vento dominante (Tabella 12, Figura 26, Figura 27 e Figura 28):

- W': Dimensione della sorgente nella direzione principale del vento;
- Sw': Dimensione della sorgente nella direzione ortogonale a quella del vento.

Tabella 12. Caratteristiche geometriche delle sorgenti del suolo superficiale rispetto alla direzione principale del vento

sub Area	Poligono	Sorgente	W' [m]	Sw' [m]
1	PTPzN29+S_E12	SP_S1	200.0	200.0
2	S_G15	SP_S3	85.0	85.0
2	S_G19	SP_S4	145.0	200.0
4	PTPzN12	SP_S11	75.0	50.0

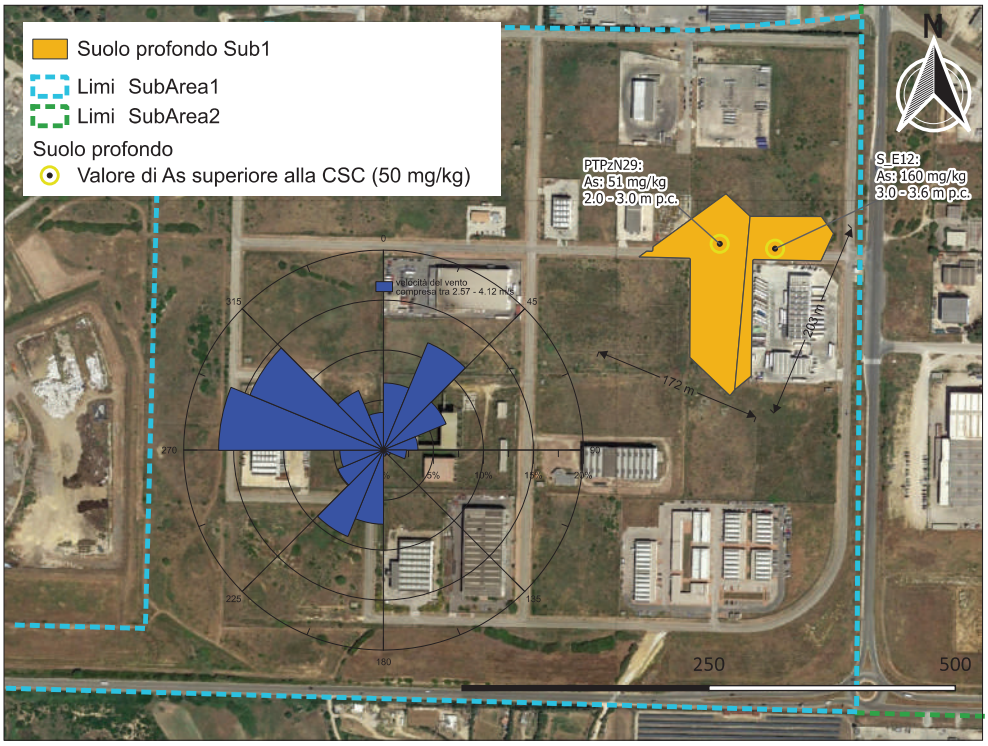


Figura 26. Dimensione della sorgente di contaminazione nella direzione prevalente del vento – Subarea 1

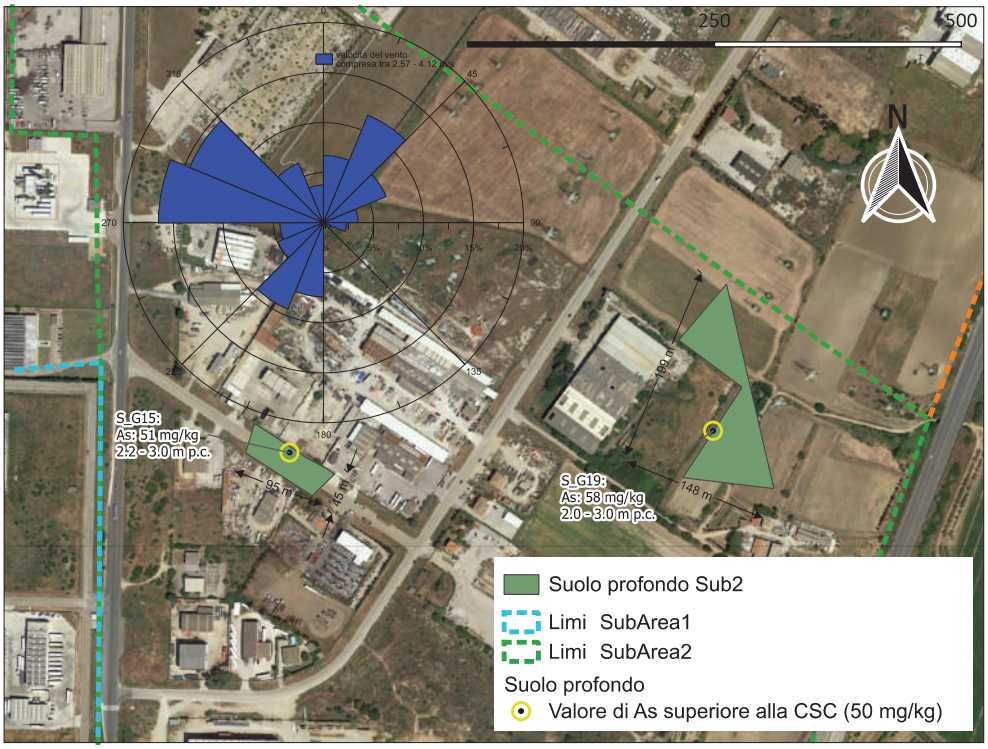


Figura 27. Dimensione della sorgente di contaminazione nella direzione prevalente del vento – Subarea 2



Figura 28. Dimensione della sorgente di contaminazione nella direzione prevalente del vento – Subarea 4

5.3.2.2 Acqua di falda

Per ciascuna sorgente individuata si riportano in Tabella 13 i valori dei parametri geometrici utilizzati per la stima dei fattori di trasporto. In particolare, si fa riferimento alla dimensione della sorgente rispetto alla direzione del flusso di falda e del vento prevalente (Figura 29 e Figura 30). Nello specifico tali parametri sono:

- A: superficie della sorgente;
- W: Dimensione della sorgente nella direzione del flusso di falda;
- Sw: Dimensione della sorgente nella direzione ortogonale al flusso di falda;
- Lgw: Soggiacenza della falda da p.c.;
- W' Dimensione della sorgente nella direzione principale del vento;
- Sw': Dimensione della sorgente nella direzione ortogonale a quella del vento.

Tabella 13. Caratteristiche geometriche delle sorgenti secondarie nella falda

sub Area	Sorgente	Poligono	A [m^2]	W [m]	Sw [m]	Lgw [m]	W' [m]	Sw' [m]
2	F_S1	PTPz29	57084	200	507	16.3	380	400
5	F_S2	PTPz60	28082	200	280	1.0	300	180
1	F_S3	PTPzN04	18176	350	230	14.6	360	180
3	F_S4	PTPzN11	69714	400	275	13.8	380	273
¾	F_S5	PTPzN12	27688	250	260	16.2	225	262
1	F_S6	S_B2/1	44285	259	339	8.2	180	375
	F_S7		2834921	3000	1000	0.92	1000	3000

In riferimento alla sorgente F_S7 i valori sono rappresentativi dell'intero sito. Il valore di soggiacenza della falda rappresenta quello minimo all'interno del sito.

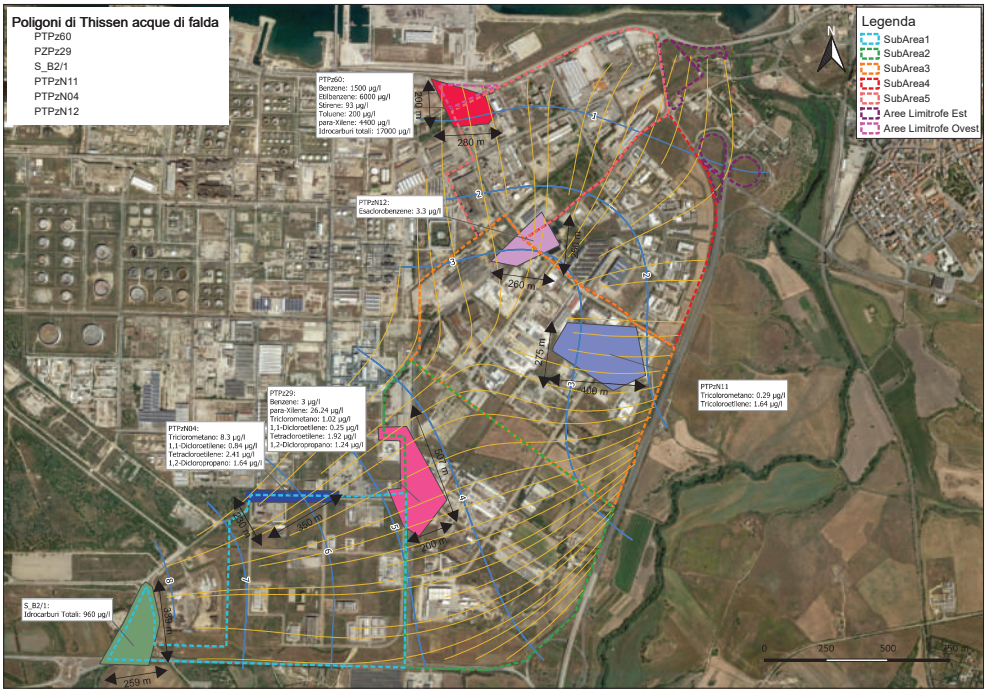


Figura 29. Dimensioni delle sorgenti secondarie in falda rispetto alla direzione della stessa

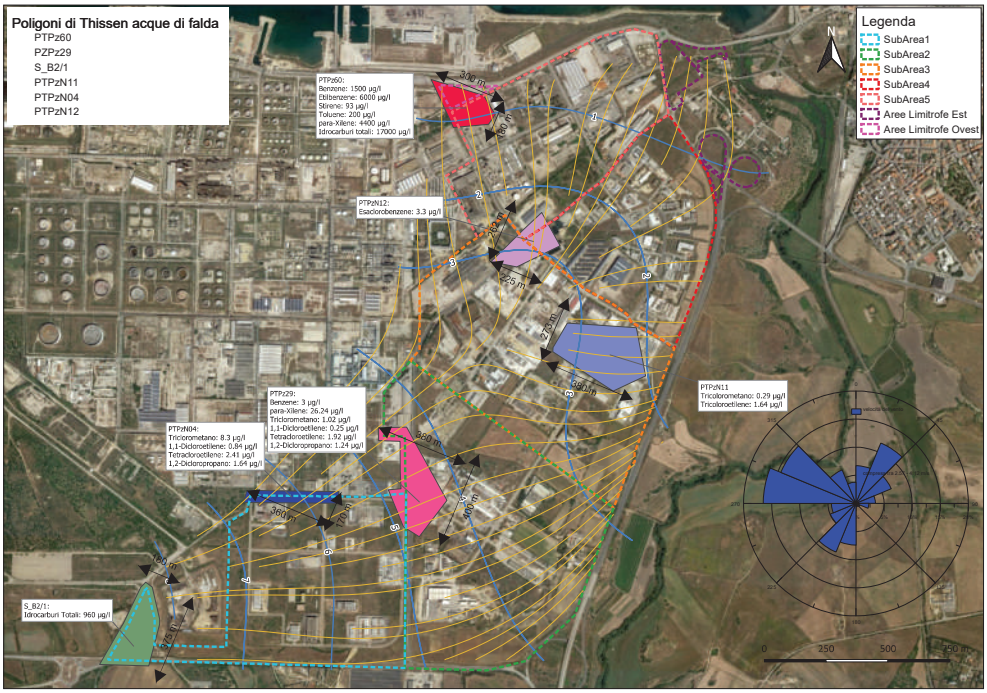


Figura 30. Dimensioni delle sorgenti secondarie in falda rispetto alla direzione prevalente del vento

5.3.3 Concentrazioni rappresentative

5.3.3.1 Terreno insaturo

La concentrazione rappresentativa della sorgente (CRS) è definita sulla base dei dati analitici del campione di terreno contaminato; nel caso in cui la sorgente sia costituita da più poligoni di Thiessen è stata assunta quale concentrazione rappresentativa quella massima.

Tabella 14. Concentrazione rappresentativa delle sorgenti nel suolo profondo

sub Area	Poligono	Sorgente	CRS - As [mg/kg]
1	PTPzN29+S_E12	SP_S1	160.0
2	PTPzN09+PTPzN09B	SP_S2	112.0
2	S_G15	SP_S3	51.0
2	S_G19	SP_S4	58.0
2	S_H17	SP_S5	82.0
2	S_B17	SP_S6	60.0
2	S_M13	SP_S7	75.0
3	S_P22	SP_S8	61.0
3	PTPzN16	SP_S9	60.0
3	S_L19	SP_S10	76.0
4	PTPzN12	SP_S11	53.0

5.3.3.2 Acqua di falda

Le concentrazioni rappresentative di ciascuna sorgente (CRS) sono riportate in Tabella 15. Per le sorgenti coincidenti con l'area d'influenza dei piezometri esse sono pari ai valori misurati; per gli idrocarburi totali si è fatto riferimento alla speciazione effettuata nel piano di indagine integrativo per il piezometro PTPz60 (Tabella 16), l'unico ad aver confermato il superamento delle CSC per gli idrocarburi totali fra i tre piezometri campionati. Conservativamente è stato attribuito il valore di concentrazione di idrocarburi totali, rilevato in ciascun piezometro, alla classe di idrocarburi aromatici C9-C10 (ovvero presente in maggior quantità nella speciazione MADEP).

Per triclorometano la concentrazione rappresentativa è stata posta pari all'Upper Confidence Limit (UCL) dei superamenti rilevati (Tabella 17).

Tabella 15. Concentrazioni rappresentative - Sorgenti acqua di falda

Sorgente	Piezometro	Benzene [µg/l]	Etilbenzene [µg/l]	Stirene [µg/l]	Toluene [µg/l]	para-Xilene [µg/l]	1,1-Dicloroetilene [µg/l]	Tricloroetilene [µg/l]	Tetracloroetilene [µg/l]	1,2-Dicloropropano [µg/l]	Esaclorobenzene [µg/l]	Idrocarburi aromatici C9-C10 [µg/l]	Triclorometano [µg/l]
F_S1	PTPz29	3				26.24	0.25		1.92	1.24			2.99
F_S2	PTPz60	1500	6000	93	200	4400						17000	2.99
F_S3	PTPzN04						0.84		2.41	1.64			2.99
F_S4	PTPzN11							1.64					2.99
F_S5	PTPzN12										3.3		2.99
F_S6	S_B2/1											960	2.99
F_S6													2.99

Tabella 16. sintesi della speciazione MADEP del piezometro PTPz60

PROVA	METODO ANALITICO	VALORE
IDROCARBURI ALIFATICI LEGGERI		
Idrocarburi alifatici C5-C8	T.A. SXGC 09/14	0.40 %
Idrocarburi alifatici C9-C12	T.A. SXGC 09/14	0.36 %
IDROCARBURI ALIFATICI PESANTI		
Idrocarburi alifatici C13-C18	EPA 3510+ EPA 8015D	<0.1 %
Idrocarburi alifatici C19-C36	EPA 3510+ EPA 8015D	<0.1 %
Idrocarburi alifatici C37-C40	EPA 3510+ EPA 8015D	<0.1 %
IDROCARBURI AROMATICI LEGGERI		
Idrocarburi aromatici C9-C10	T.A. SXGC 09/14	53.0 %
Idrocarburi aromatici C11-C12	EPA 3510+ EPA 8015D	2.4 %
IDROCARBURI AROMATICI PESANTI		
Idrocarburi aromatici C3-C22	EPA 3510+ EPA 8015D	1.30 %
Idrocarburi aromatici C23-C40	EPA 3510+ EPA 8015D	<0.10 %
Idrocarburi totali (espressi come n-esano)	EPA 5021 + EPA 8015 UNI 9377	17000 µg/l

Tabella 17. Concentrazioni superiori alla CSC del triclorometano misurate in fase di caratterizzazione e parametri statistici del dataset

Piezometro	Superamenti della CSC del Triclorometano [µg/l]
PTPz29	1.02
PTPz30	0.33
PTPz34	0.3

Piezometro	Superamenti della CSC del Triclorometano [µg/l]
PTPz38	0.65
PTPz39	0.181
PTPzN02	6.6
PTPzN04	8.3
PTPzN06	1.32
PTPzN07	10.8
PTPzN08	0.6
PTPzN10	0.175
PTPzN11	0.29
PTPzN13	0.61
PTPzN14	1.39
PTPzN15	1.77
PTPzN18	0.172
PTPzN19	0.25
PTPzN22	0.98
PTPzN23	0.49
PTPzN27	3.1
PTPzN28	0.184
Minimo	0.17
Massimo	10.80
Media	1.88
SD	2.96
Coefficiente di variazione	1.57
95% Student's-t UCL	2.99
95% Student's-t LCL	0.77

5.3.4 Parametri della zona insatura

I parametri della zona insatura utilizzati nelle simulazioni sono riportati in Tabella 18.

Tabella 18. Parametri della zona insatura utilizzati per l'analisi

Parametro	Simbolo	Sito-Specifico	UM	Fonte
Tessitura della Zona Insatura		Sandy Loam		Sito specifico
Porosità efficace del terreno in zona insatura	θe	0.345	-	Letteratura sulla base della tessitura del terreno insaturo: Sandy Loam
Contenuto volumetrico di acqua nel suolo	θw	0.194	-	
Contenuto volumetrico di aria nel suolo	θa	0.151	-	
Contenuto volumetrico di acqua nella frangia capillare	θw,cap	0.288	-	

Parametro	Simbolo	Sito-Specifico	UM	Fonte
Contenuto volumetrico di aria nella frangia capillare	θa,cap	0.057	-	
Spessore della frangia capillare	hcap	0.25	m	
Carico idraulico critico (potenziale di matrice)	hcr	-0.0848	m	
Conducibilità idraulica del terreno nella zona insatura	Ksat,s	1.23e-5	m/s	
Battente idrico in superficie	Hw	0.25	m	Default
Caratteristiche della Zona Insatura				
Densità del suolo	ρs	1.67	g/cm³	Sito specifico UCL 95%
pH del suolo	pH	7.5	-	Sito specifico minimo
Frazione di carbonio organico - suolo profondo	foc,SP	0.037	g/g	Sito specifico LCL 95%
Frazione residua dei pori nel suolo (per calcolo Cres)	Sr	0.04	m	Default
Spessore della zona insatura	hv	18.250	m	Calcolato
Piovosità media annua	P	53.91	cm/y	Sito specifico UCL 95%
Frazione areale di fratture outdoor	ηout	1	-	Default
Infiltrazione efficace nel suolo	Ief	5.23	cm/y	Calcolato sulla base della tessitura

La piovosità media annua è stata ricavata a partire dai dati pluviometrici giornalieri rilevati dalla rete delle stazioni gestite dal Servizio tutela e gestione delle risorse idriche, vigilanza sui servizi idrici e gestione della siccità della Regione Sardegna. La piovosità media annua è stata calcolata a partire dai dati giornalieri della serie storica disponibile della stazione pluviometrica di Porto Torres (1922 – 2010). La serie storica dei valori di precipitazione annua è riportata in Figura 31.

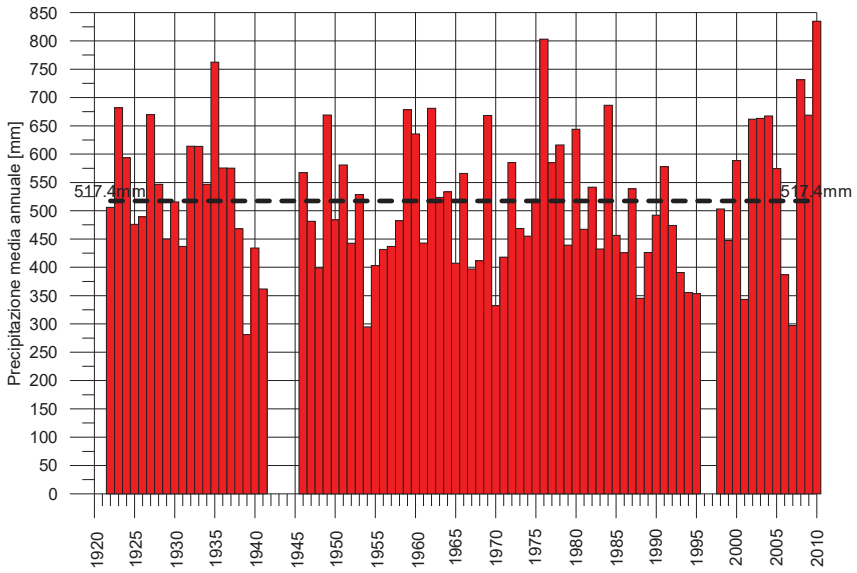


Figura 31. Precipitazioni annuali della stazione pluviometrica Porto Torres – periodo 1922 – 2011. La linea tratteggiata riporta il valore medio delle precipitazioni annuali (fonte dati: RAS – periodo 1922-2011)

Per il calcolo dell'Infiltrazione efficace, il valore di piovosità (P) maggiormente conservativo che deve essere utilizzato ai fini dell'elaborazione dell'analisi di rischio è quello massimo. In accordo a quanto riportato nel manuale APAT "Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati" (Rev.2, Marzo 2008), se il numero di dati disponibili è maggiore o uguale a 10 (N ≥ 10) e se il valore massimo è quello maggiormente conservativo, si deve selezionare come valore rappresentativo da inserire nella procedura di analisi di rischio l'Upper Confidential Limit al 95% (UCL95%). Tale valore è stato calcolato utilizzando il software ProUCL ed i risultati sono riportati in Tabella 19.

Tabella 19. Parametri statici della serie storica delle precipitazioni medie annue

Parametro	Valore [mm/anno]
Minimum	281.0
Maximum	834.7
Mean	517.4
SD	119.8
Coefficient of Variation	0.2
95% Student's-t UCL	539.1
95% Student's-t LCL	495.6

L'infiltrazione efficace Ief può essere calcolata applicando l'equazione di bilancio idrologico, espressa nei minimi termini, dalla relazione:

$$I_{ef} = P - (ET + S)$$

Dove I_{ef} [cm/anno] rappresenta appunto l'infiltrazione efficace, P [cm/anno] le precipitazioni, ET [cm/anno] rappresenta l'evapotraspirazione della copertura vegetale ed S [cm/anno] indica il ruscellamento superficiale. Cosi come indicato nel manuale ISPRA, nel caso in cui la sorgente secondaria di contaminazione sia costituita da terreno omogeneo o approssimabile come tale, l'infiltrazione efficace media annua può essere stimata in funzione delle precipitazioni medie annue e del tipo di tessitura prevalente nel suolo (sabbiosa, limosa o argillosa) a mezzo di relazione empiriche.

Nel caso specifico il calcolo viene effettuato in automatico dal software considerando la classe SAND a cui appartengono le tessiture: Sand, Loamy Sand e Sandy Loam.

In via cautelativa il suolo superficiale è stato considerato privo di qualsiasi tipologia di impermeabilizzazione superficiale.

5.3.5 Parametri della zona satura

I parametri della zona satura utilizzati nei calcoli sono riportati in Tabella 20.

Tabella 20. Parametri della zona satura utilizzati per l'analisi

Parametro	Simbolo	Sito-Specifico	UM	Fonte
Tessitura della Zona Satura		Sandy Loam		Sito specifico
Conducibilità idraulica del terreno saturo	Ksat	1.23E-05	m/s	Letteratura sulla base della tessitura del terreno insaturo: Sandy Loam
Porosità efficace del terreno in zona satura	θe,sat	0.345	-	
Caratteristiche della Zona Satura				
Spessore acquifero	da	20	m	Sito specifico
Gradiente idraulico	i	0.003	m/m	Sito specifico
Velocità di Darcy	vgw	3.69E-08	m/s	Calcolato
Velocità media effettiva nella falda	ve	1.07E-07	-	Calcolato

5.3.6 Parametri dell'ambiente outdoor

I parametri utilizzati per l'ambiente outdoor sono riportati in Tabella 21.

Tabella 21. Parametri dell'ambiente outdoor

Parametro	Simbolo	Sito-Specifico	UM	Fonte
Velocità del vento	Uair	1.11	m/s	Calcolato
Velocità del vento misurata nella centralina meteo	Uair,sm	2.7	m/s	Sito specifico
Altezza della centralina meteo	Hsm	10	m	Sito specifico
Classe di stabilità atmosferica F suolo Rurale				
Altezza di riferimento per stima velocità del vento	BM	2	m	Default
Coefficiente P	p	0.55	-	Calcolato sulla base della classe di stabilità e della rugosità del suolo rurale
Portata di particolato per unità di superficie	Pe	6.9e-14	g/cm/s²	Default
Coefficiente di dispersione trasversale	σy	3.98	m	Calcolato
Coefficiente di dispersione verticale	σz	1.55	m	Calcolato
Profondità della zona aerobica da p.c.	La Outdoor	1	m	Default

La velocità del vento al suolo è stata determinata, in conformità alle Linee Guida ISPRA, quale valore minimo delle medie annuali nel periodo di riferimento (Tabella 22) rilevato a 10 m di altezza (pari a 2.7 m/s), riportato all'altezza dello strato di miscelazione (2 m) mediante la formula:

$$\frac{U_{air}(z_1)}{U_{air}(z_2)} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^p$$

Tale valore è pari a 1.11 m/s, ricavato utilizzando il parametro p pari a 0.55 (classe di stabilità F e suolo rurale).

Tabella 22. Velocità media annua del vento a 10 m dal suolo (SCIA - Sistema nazionale per l'elaborazione e diffusione di dati climatici – ISPRA)

Anno di riferimento	Velocità media annua del vento [m/s]
2010	2.9
2011	2.8
2012	3.0
2013	3.1
2014	2.9
2015	2.7

Anno di riferimento	Velocità media annua del vento [m/s]
2016	2.9
2017	2.8
2018	2.9
Minima velocità media annua [m/s]	**2.7**

5.3.7 Parametri dell'ambiente indoor

I parametri dell'ambiente indoor utilizzati nei calcoli sono riportati nella Tabella 23.

Tabella 23. Parametri dell'ambiente indoor

Parametro	Simbolo	Sito-Specifico	UM	Fonte
Profondità delle fondazioni da p.c.	Z crack	0.2	m	0.15
Spessore delle fondazioni	L crack	0.2	m	0.15
Frazione areale di fratture indoor	η	0.01	m^2/m^2	0.01
Rapporto tra volume indoor ed area di infiltrazione	Lb	var	m	Sito specifico variabile
Contenuto volumetrico di acqua nelle fondazioni	θw,crack	0.12	-	Default
Contenuto volumetrico di aria nelle fondazioni	θa,crack	0.26	-	Default
Tasso di ricambio di aria indoor	ER	0.00023	1/s	Default
Differenza di pressione tra outdoor e indoor	Δp	40	$g/cm/s^2$	Default
Superficie totale coinvolta nell'infiltrazione	Ab	var	m^2	Sito specifico variabile
Permeabilità del suolo al flusso di vapore	Kv	1e-12	m^2	1e-12
Perimetro delle fondazioni/muri	x crack	var	m	Sito specifico variabile
Viscosità del vapore	µair	0.000181	g/cm/s	Default
Flusso convettivo entrante nell'edificio	Qs	0.00e+0	L/min	Calcolato
Profondità della zona aerobica dalle fondazioni	La Indoor	1	m	Default

Le caratteristiche degli edifici on site sono state ricavate attraverso la cartografia disponibile. Le altezze degli edifici sono state ricavate per differenza tra il DSM-Manufatti e il DSM (Modello Digitale della Superficie). Entrambi i modelli digitali del terreno sono liberamente scaricabili nel portale dedicato della Regione Sardegna (http://www.sardegnageoportale.it). Le dimensioni planimetriche e le caratteristiche degli edifici presenti (fuori terra, realizzato, in costruzione, ecc) sono stati desunti dal layer cartografico "immobili ed antropizzazioni" del Database geotopografico della Regione Sardegna.

Il rapporto tra volume indoor ed area di infiltrazione è pari al rapporto tra volume e area dell'edificio e nel caso di edifici fuori terra, come quelli che caratterizzano la zona industriale di interesse, coincide con l'altezza h dell'edificio stesso. La superficie totale coinvolta nell'infiltrazione e il perimetro delle fondazioni/muri sono stati calcolati con strumenti GIS sulla base del layer cartografico immobili ed antropizzazioni.

Gli edifici individuati in prossimità delle sorgenti in falda sono indicati nella Figura 32 e nella Figura 33.

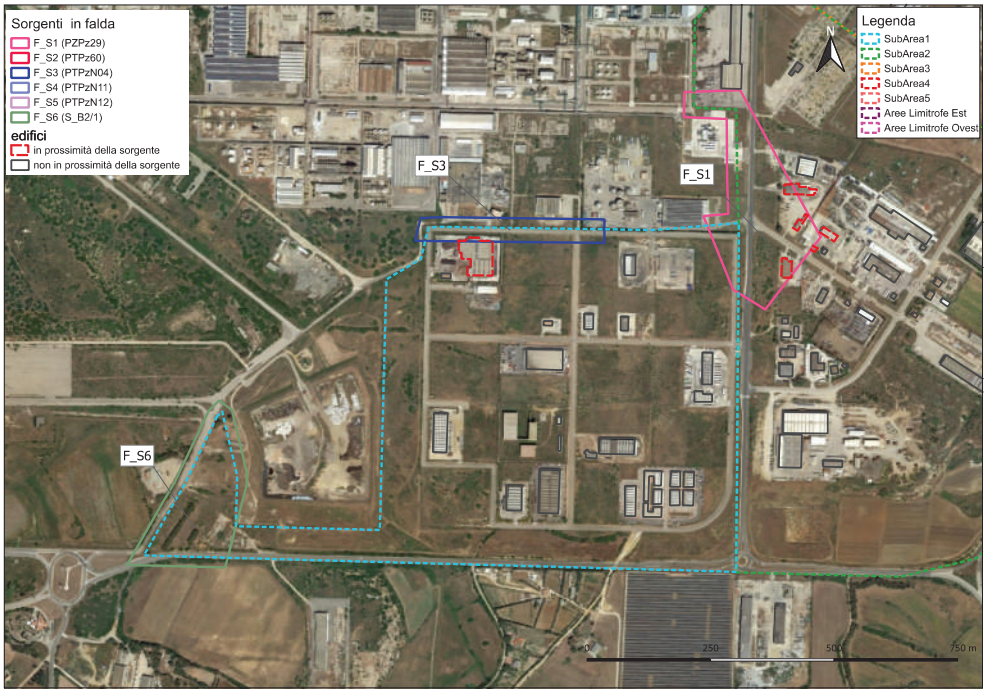


Figura 32. Individuazione degli edifici potenzialmente coinvolti nella volatizzazione in ambienti indoor. Sorgenti F_S1, F_S3 e F_S6

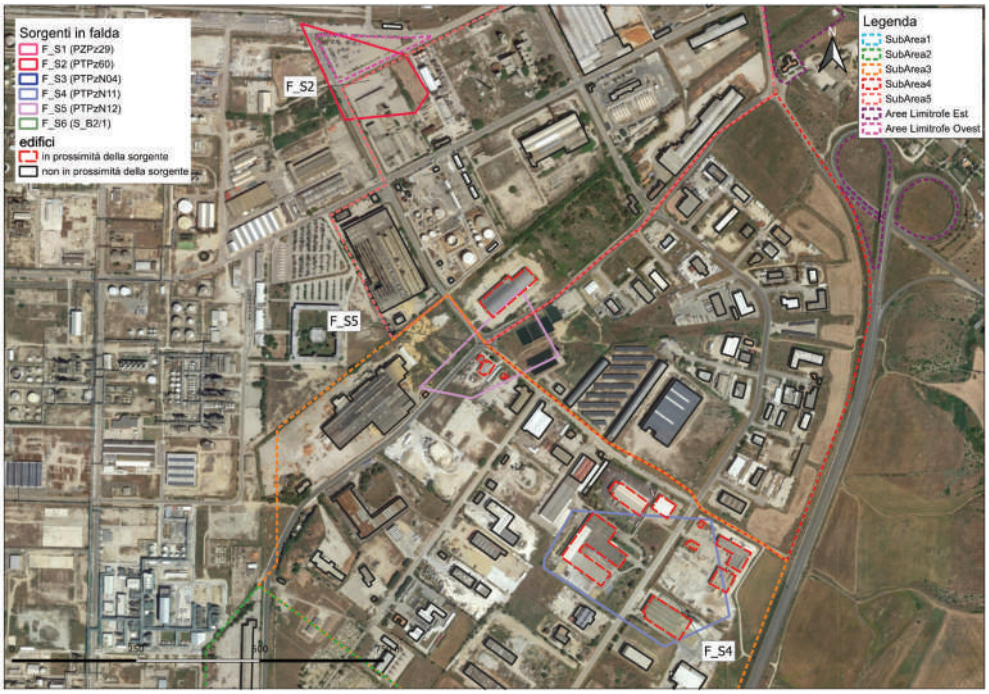


Figura 33. Individuazione degli edifici potenzialmente coinvolti nella volatizzazione in ambienti indoor. Sorgenti F_S4, F_S5 e F_S2

L'edificio scelto come rappresentativo di ogni sorgente, tra quelli individuati, è quello con il minor rapporto tra volume ed area di infiltrazione. Le caratteristiche geometriche degli edifici individuati sono riportate in Tabella 24.

Non sono stati individuati edifici in prossimità della sorgente F_S1 (PTPz60) e della sorgente F_S6 (S_B2/1).

Per la sorgente F_S7 sono stati considerati tutti gli edifici presenti all'interno del sito; in Tabella 24 sono riportate le caratteristiche dell'edificio per cui la valutazione è la più cautelativa.

Tabella 24. Caratteristiche degli edifici in prossimità delle sorgenti in falda (in grassetto le caratteristiche degli edifici utilizzate)

ID EDIFICIO	SORGENTE	PIEZOMETRO	H edificio [m]	Superficie [m^2]	Perimetro fondazioni [m]
ID2	F_S1	PTPz29	5.5	303.9	95.3
ID3	F_S1	PTPz29	5.7	1100.5	176.2
ID4	**F_S1**	**PTPz29**	**3.6**	**92.8**	**38.8**
ID5	F_S1	PTPz29	4.3	733.9	118.8
ID6	F_S1	PTPz29	8.9	456.0	95.2
ID1	**F_S3**	**PTPzN04**	**4.0**	**4176.8**	**302.2**
ID7	F_S4	PTPzN11	9.4	4276.2	279.1
ID8	F_S4	PTPzN11	8.4	8478.3	593.2
ID9	F_S4	PTPzN11	4.4	283.0	72.7
ID10	F_S4	PTPzN11	6.4	2170.4	228.9

ID11	F_S4	PTPzN11	7.9	1456.9	152.7
ID12	**F_S4**	**PTPzN11**	**3.7**	**112.9**	**43.4**
ID13	F_S4	PTPzN11	6.2	1186.8	138.4
ID14	F_S4	PTPzN11	7.0	2429.1	223.0
ID15	F_S5	PTPzN12	5.2	737.9	143.3
ID16	**F_S5**	**PTPzN12**	**3.4**	**72.7**	**38.5**
ID17	F_S5	PTPzN12	10.5	4496.3	317.1
ID18	**F_S7**		**2.3**	**214.6**	**93.7**

5.4 CALCOLO DEL RISCHIO INDIVIDUALE E CUMULATO

Il calcolo del rischio è stato effettuato considerando separatamente ogni sorgente secondaria individuata (terreno profondo e falda) per i due scenari di esposizione individuati.

5.4.1 SCENARIO 1

Nello SCENARIO 1 le sorgenti secondarie individuate nel terreno profondo determinano unicamente un rischio per la risorsa idrica sotterranea mentre le sorgenti secondarie individuate in falda determinano un rischio legato alla volatilizzazione dei contaminanti attraverso il terreno insaturo e alla successiva inalazione da parte dei recettori umani.

In riferimento alle sorgenti secondarie individuate nel terreno profondo, applicando l'analisi in modalità diretta è stato determinato il rischio per la risorsa idrica sotterranea, mentre applicando l'analisi in modalità inversa sono state calcolate le concentrazioni soglia di rischio. I risultati di tale analisi, riportati in Tabella 25, mettono in evidenza che le sorgenti secondarie dovute alla presenza di arsenico nel terreno profondo determinano valori del rischio per la risorsa idrica sotterranea abbondantemente inferiori all'unità. Tale risultato è coerente con l'assenza, verificata durante la caratterizzazione del sito, del contaminante arsenico nelle acque di falda, in prossimità delle sorgenti secondarie presenti nel terreno.

Tabella 25. Scenario 1 - Rischio e CSR per il suolo profondo - Arsenico

Sorgente	Subarea	Sondaggio	CRS [mg/kg]	Rgw (GW)	CSR [mg/kg]
SP_S1	1	PTPzN29+S_E12	160.0	0.0630	2540.0
SP_S2	2	PTPzN09+PTPzN09B	112.0	0.2220	504.0
SP_S3	2	S_G15	51.0	0.0084	6090.0
SP_S4	2	S_G19	58.0	0.0113	5130.0
SP_S5	2	S_H17	82.0	0.0174	4720.0
SP_S6	2	S_B17	60.0	0.0416	1440.0
SP_S7	2	S_M13	75.0	0.0168	4460.0

Sorgente	Subarea	Sondaggio	CRS [mg/kg]	Rgw (GW)	CSR [mg/kg]
SP_S8	3	S_P22	61.0	0.0139	4390.0
SP_S9	3	PTPzN16	60.0	0.0108	5550.0
SP_S10	3	S_L19	76.0	0.0150	5050.0
SP_S11	4	PTPzN12	53.0	0.0055	9710.0

In riferimento alle sorgenti secondarie individuate nella falda, applicando l'analisi in modalità diretta è stato determinato il rischio per i recettori umani conseguente all'esposizione a vapori. I risultati sono riportati nelle tabelle da Tabella 26 a Tabella 31.

I valori del rischio e dell'indice di pericolo calcolati, sia in riferimento alla singola sostanza sia al valore cumulato, risultano al di sotto dei rispettivi limiti di ammissibilità.

Il rischio cumulato massimo si verifica per la sorgente F_S2 (PTPZ60) ed è pari a 1.48E-06. Le altre sorgenti presenti in falda determinano valori del rischio cumulato inferiori di due ordini di grandezza (F_S5 (PTPzN12) con Rcum=3.17E-08 e F_S1 (PTPz29) con Rcum=5.81E-08).

I valori del rischio massimo per singola sostanza sono stati calcolati in riferimento alla sorgente F_S2 (PTPz60) per i composti etilbenzene (R=8.49E-07) e benzene (R=6.24E-07). I valori calcolati in tutte le altre sorgenti risultano di almeno un ordine di grandezza inferiori (valore massimo degli altri dati è stato calcolato per l'esaclorobenzene nella sorgente F_S5 (PTPzN12) R=3.17E-08).

Il valore massimo dell'indice di pericolo cumulato si ha ancora per la sorgente F_S2 (PTPz60) (HIcum = 0.129). L'indice di pericolo calcolato cumulato relativo alle restanti sorgenti risulta di circa due ordini di grandezza inferiore (HIcum=0.00178 per la sorgente F_S6 (S_B2/1) e HIcum=0.0009 per la sorgente F_S1 (PTPz29)).

In riferimento alle singole sostanze l'indice di pericolo massimo si presenza per i composti aromatici nella classe C9-C10 in corrispondenza della sorgente F_S2 (PTPz60) (HI=0.1140) e con valore molto inferiore in corrispondenza della sorgente F_S6 (S_B2/1) (HI = 0.00178).

Tabella 26. Calcolo del rischio per la sorgente F_S1 (PTPz29)

Contaminante	CRS [µg/L]	On-Site		On-Site		On-Site
		Vapori Outdoor		Vapori Indoor		Protezione risorsa idrica
		R [-]	HI [-]	R [-]	HI [-]	Rgw [-]
Benzene	3.00E+00	8.31E-10	1.24E-08	8.02E-09	1.48E-04	3.00E+00
p-Xilene	2.62E+01	-	-	-	3.73E-04	2.62E+00
Triclorometano	2.99E+00	1.49E-09	2.24E-08	1.39E-08	2.78E-05	1.99E+01
Dicloroetilene (1,1)	2.50E-01	-	-	-	7.92E-06	5.00E+00

Contaminante	CRS [µg/L]	On-Site		On-Site		On-Site
		Vapori Outdoor		Vapori Indoor		Protezione risorsa idrica
		R [-]	HI [-]	R [-]	HI [-]	Rgw [-]
Tetracloroetilene	1.92E+00	3.05E-11	4.79E-10	3.00E-10	1.29E-04	1.75E+00
Dicloropropano (1,2)	1.24E+00	7.52E-11	1.13E-09	6.92E-10	2.14E-04	8.27E+00
Rischio Cumulato		2.43E-09	5.92E-05	3.63E-08	8.99E-04	

Tabella 27. Calcolo del rischio per la sorgente F_S2 (PTPz60)

Contaminante	CRS [µg/L]	On-Site		On-Site
		Vapori Outdoor		Protezione risorsa idrica
		R [-]	HI [-]	Rgw [-]
Benzene	1.50E+03	6.24E-07	7.46E-03	1.50E+03
Etilbenzene	6.00E+03	8.49E-07	9.51E-04	1.20E+02
Stirene	9.30E+01	1.07E-09	6.00E-06	3.72E+00
Toluene	2.00E+02	-	6.12E-06	1.33E+01
p-Xilene	4.40E+03	-	6.14E-03	4.40E+02
Triclorometano	2.99E+00	2.24E-09	2.78E-06	1.99E+01
Aromatici C9-C10	1.70E+04	-	1.14E-01	4.86E+01
Rischio Cumulato		1.48E-06	1.28E-01	-

Tabella 28. Calcolo del rischio per la sorgente F_S3 (PTPzN04)

Contaminante	CRS [µg/L]	On-Site		On-Site		On-Site
		Vapori Outdoor		Vapori Indoor		Protezione risorsa idrica
		R [-]	HI [-]	R [-]	HI [-]	Rgw [-]
Triclorometano	2.99E+00	8.30E-10	1.03E-06	5.31E-09	6.60E-06	1.99E+01
Dicloroetilene (1,1)	8.40E-01	-	1.08E-06	-	6.91E-06	1.68E+01
Tetracloroetilene	2.41E+00	2.31E-11	6.21E-06	1.51E-10	4.05E-05	2.19E+00
Dicloropropano (1,2)	1.64E+00	5.41E-11	1.02E-05	3.47E-10	6.56E-05	1.09E+01
Rischio Cumulato		9.07E-10	1.86E-05	5.81E-09	1.20E-04	

Tabella 29. Calcolo del rischio per la sorgente F_S4 (PTPzN11)

Contaminante	CRS [µg/L]	On-Site Vapori Outdoor		On-Site Vapori Indoor		On-Site Protezione risorsa idrica
		R [-]	HI [-]	R [-]	HI [-]	Rgw [-]
Triclorometano	2.99E+00	9.12E-10	1.13E-06	6.15E-09	7.64E-06	1.99E+01
Tricloroetilene	1.64E+00	2.07E-10	7.06E-05	1.40E-09	4.78E-04	1.09E+00
Rischio Cumulato		1.12E-09	7.18E-05	7.55E-09	4.86E-04	

Tabella 30. Calcolo del rischio per la sorgente F_S5 (PTPzN12)

Contaminante	CRS [µg/L]	On-Site Vapori Outdoor		On-Site Vapori Indoor		On-Site Protezione risorsa idrica
		R [-]	HI [-]	R [-]	HI [-]	Rgw [-]
Triclorometano	2.99E+00	4.79E-10	5.95E-07	5.97E-09	7.42E-06	1.99E+01
Esaclorobenzene	3.30E+00	2.04E-09	-	2.57E-08	-	3.30E+02
Rischio Cumulato		2.51E-09	5.95E-07	3.17E-08	7.42E-06	

Tabella 31. Calcolo del rischio per la sorgente F_S6 (S_S_B2/1)

Contaminante	CRS [µg/L]	On-Site Vapori Outdoor		On-Site Protezione risorsa idrica
		R [-]	HI [-]	Rgw [-]
Triclorometano	2.99E+00	5.94E-10	7.37E-07	1.99E+01
Aromatici C9-C10	9.60E+02	-	1.78E-03	2.74E+00
Rischio Cumulato		5.94E-10	1.78E-03	-

Tabella 32. Calcolo del rischio per la sorgente F_S7

Contaminante	CRS [µg/L]	On-Site Vapori Outdoor		On-Site Vapori Indoor		On-Site Protezione risorsa idrica
		R [-]	HI [-]	R [-]	HI [-]	Rgw [-]
Triclorometano	2.99E+00	7.56E-09	9.39E-06	3.55E-08	4.41E-05	1.99E+01
Rischio Cumulato		7.56E-09	9.39E-06	3.55E-08	4.41E-05	

5.4.2 SCENARIO 2

Il modello concettuale dello SCENARIO 2 individua la presenza contemporanea delle sorgenti del terreno profondo (che nell'ipotesi di scavo vengono trattate come sorgenti nel suolo superficiale) e nella falda acquifera. Il rischio associato alle sorgenti nel suolo superficiale è legato all'esposizione diretta dei lavoratori per ingestione di suolo e per contatto dermico ed indiretta legata al sollevamento ed inalazione di polveri nel sito. Il rischio associato alle sorgenti individuate nella falda è legato all'inalazione di vapori in ambiente outdoor.

Considerando che le non conformità del parametro arsenico sono state rilevate nelle sub aree 1, 2, 3 e 4, tale scenario è valido esclusivamente in tali sub aree.

Il rischio complessivo associato a tale scenario è stato calcolando aggregando il rischio determinato dalle sorgenti nel terreno profondo con quelle presenti in falda. Il valore del rischio generato dalle sorgenti presenti nel terreno profondo è stato assunto pari al valore massimo fra quelli relativi alle 4 sorgenti (SP_S1(PTPzN29+S_E12), SP_S3(S_G15), SP_S4(S_G19) e SP_S11(PTPzN12) rilevate ad una profondità inferiore a 3 metri (assunta come massima profondità di scavo). Il valore rischio generato dalle sorgenti presenti in falda è stato assunto pari al massimo fra quelli delle sorgenti individuate nelle sub aree 1, 2, 3 e 4 (F_S1(PTPz29), F_S3(PTPzN04), F_S4(PTPzN11), F_S5(PTPzN12), F_S6(S_B2/1)) e F_S7.

I risultati dei calcoli sono riportati in Tabella 33 (suolo superficiale) e il Tabella 34 (falda).

Tabella 33. Calcolo del rischio - sorgenti suolo superficiale - SCENARIO 2

Sorgente	Sondaggio	CRS As [mg/kg]	On-Site		On-Site		On-Site		On-Site	
			Ingestione di suolo		Contatto Dermico		Polveri Outdoor		Cumulato outdoor	
			R [-]	HI [-]	R [-]	HI [-]	R [-]	HI [-]	R [-]	HI [-]
SP_S1	PTPzN29+S_E12	1.60E+02	6.04E-07	9.39E-02	2.39E-07	3.72E-02	4.32E-11	4.69E-05	**8.43E-07**	**1.31E-01**
SP_S3	S_G15	5.10E+01	1.92E-07	2.99E-02	7.62E-08	1.19E-02	7.60E-12	8.25E-06	**2.69E-07**	**4.18E-02**
SP_S4	S_G19	5.80E+01	2.19E-07	3.41E-02	8.67E-08	1.35E-02	1.35E-11	1.46E-05	**3.06E-07**	**4.75E-02**
SP_S11	PTPzN12	5.30E+01	2.00E-07	3.11E-02	7.92E-08	1.23E-02	5.82E-12	6.32E-06	**2.79E-07**	**4.34E-02**

Tabella 34. Calcolo del rischio - sorgenti in falda - SCENARIO 2

Sorgente	Piezometro	Contaminante	CRS	On-Site	
				Vapori Outdoor	
				R [-]	HI [-]
F_S1	PTPz29	Benzene	3.00E+00	1.20E-11	3.58E-06
		p-Xilene	2.62E+01	-	8.79E-06
		Triclorometano	2.99E+00	2.15E-11	6.68E-07
		Dicloroetilene (1,1)	2.50E-01	-	1.90E-07
		Tetracloroetilene	1.92E+00	4.40E-13	2.96E-06
		Dicloropropano (1,2)	1.24E+00	1.08E-12	5.12E-06
		Rischio Cumulato		**3.50E-11**	**2.13E-05**
F_S3	PTPzN04	Triclorometano	2.99E+00	1.20E-11	3.71E-07
		Dicloroetilene (1,1)	8.40E-01	-	3.90E-07
		Tetracloroetilene	2.41E+00	3.32E-13	2.23E-06
		Dicloropropano (1,2)	1.64E+00	7.79E-13	3.68E-06
		Rischio Cumulato		**1.31E-11**	**6.68E-06**
F_S4	PTPzN11	Triclorometano	2.99E+00	1.31E-11	4.08E-07
		Tricloroetilene	1.64E+00	2.98E-12	2.54E-05
		Rischio Cumulato		**1.61E-11**	**2.58E-05**
F_S5	PTPzN12	Triclorometano	2.99E+00	4.79E-10	5.95E-07
		Esaclorobenzene	3.30E+00	2.04E-09	-
		Rischio Cumulato		**2.51E-09**	**5.95E-07**
F_S6	S_B2/1	Triclorometano	2.99E+00	8.55E-12	2.65E-07
		Aromatici C9-C10	9.60E+02	-	6.42E-04
		Rischio Cumulato		**8.55E-12**	**6.42E-04**
F_S7		Triclorometano	2.99E+00	1.09E-10	3.38E-06
		Rischio Cumulato		**1.09E-10**	**3.38E-06**

Il rischio per le sostanze cancerogene connesso allo SCENARIO 2 risulta dunque pari a 8.46E-07, pari alla somma dei valori massimi dei rischi riferiti alle sorgenti superficiali (R= 8.43E-07) e alle sorgenti in falda (R=2.51E-09). Per quanto riguarda le sostanze tossiche, l'indice di pericolo dato dalla somma dei valori massimi dell'indice di pericolo relativo alle sorgenti superficiali (0.131) e dell'indice di pericolo relativo alle sorgenti in falda (6.42E-4), è risultato pari a 0.132.

6 CONCLUSIONI

La caratterizzazione delle Aree Libere è stata effettuata nell'ambito di due distinti piani di indagine:

- il piano di indagine relativo al progetto "*Aggiornamento della rete di monitoraggio siti inquinati: area industriale di Porto Torres*" realizzato nel 2013 dalla RAS allo scopo di caratterizzare le acque sotterranee;
- il "Piano di indagine per la caratterizzazione delle aree di competenza pubblica all'interno del Sito di bonifica di Interesse Nazionale "Aree Industriali di Porto Torres" – Aree libere consortili" realizzato nel 2016 dal Consorzio allo scopo di caratterizzare principalmente i terreni.

I risultati di tali piani sono presentati nel documento "Piano della caratterizzazione delle Aree Libere Consortili – Modello concettuale definitivo" del novembre 2017.

Nel corso del 2019 il Consorzio ha portato a termine il piano di indagini integrativo finalizzato alla predisposizione dell'analisi di rischio.

I risultati della analisi effettuate sui campioni di terreno e sull'acqua di falda, mettono in evidenza che:

- nel top soil non sono presenti superamenti dei limiti normativi;
- nella matrice terreno superficiale (fino a 1 m di profondità) non sono presenti superamenti dei limiti normativi;
- nella matrice terreno profondo (profondità > 1 m) sono presenti 14 punti di non conformità per l'arsenico;
- nella matrice acque di falda è stata rilevata contaminazione diffusa di triclorometano e una contaminazione localizzata relativa agli altri inquinanti (composti inorganici, composti alifatici clorurati cancerogeni, composti organici aromatici, idrocarburi e solventi aromatici.

La presenza delle eccedenze delle CSC nei terreni profondi del parametro Arsenico è stata attribuita ad origine naturale e, comunque, considerata nell'elaborazione dell'Analisi di Rischio sanitario.

Le eccedenze alle CSC rilevate in falda non sono correlabili ai centri di pericolo localizzati all'interno delle aree libere consortili ma a centri di pericolo presumibilmente esterni, per la cui identificazione appare opportuna l'attivazione della procedura di individuazione del responsabile della contaminazione da parte dell'amministrazione competente ai sensi dell'art.244 del D.Lgs. 152/2006. Tutti i contaminanti rinvenuti in falda sono stati comunque inclusi nell'elaborazione dell'Analisi di Rischio al fine di valutarne i rischi sanitari, ad eccezione dei contaminanti non volatili metallici ed inorganici per i quali non si hanno vie di esposizione attive.

Nel primo scenario espositivo analizzato (SCENARIO 1), rappresentativo delle condizioni attuali, le sorgenti secondarie di contaminazione sono rappresentate dal suolo profondo e dall'acqua di falda; ad esse sono associati i seguenti percorsi di esposizione:

- dilavamento (lisciviazione e trasporto in falda) per il suolo profondo;
- volatilizzazione dei vapori verso ambienti indoor ed outdoor e trasporto nella risorsa idrica sotterranea per l'acqua di falda.

Le sorgenti secondarie individuate nel terreno profondo, consistenti in concentrazioni di arsenico superiori alle CSC, determinano unicamente un rischio per la risorsa idrica sotterranea. I calcoli hanno evidenziato che tale rischio è ampiamente al di sotto dei limiti di accettabilità per la risorsa idrica sotterranea. Tale risultato è confermato dall'assenza di arsenico nelle acque sotterranee, in prossimità delle sorgenti presenti nel suolo profondo, verificata durante la fase di caratterizzazione. Le sorgenti secondarie individuate nell'acqua di falda determinano rischio sia sanitario che ambientale. I calcoli hanno messo in evidenza valori del rischio sanitario (sia cancerogeno sia tossico) inferiori ai limiti di accettabilità, in riferimento sia al singolo contaminante sia alla presenza contemporanea di più contaminanti. Il rischio per la risorsa idrica sotterranea supera invece i limiti di accettabilità.

Nel secondo scenario espositivo considerato (SCENARIO 2), caratterizzato da una breve durata di esposizione (massimo 90 giorni) e legato ai possibili lavori di scavo che potranno essere programmati in futuro nelle aree libere consortili, le sorgenti di contaminazione sono rappresentate dal suolo profondo messo a nudo dalle operazioni di scavo e dall'acqua di falda. I percorsi di esposizione associati a tale scenario sono:

- ingestione diretta di suolo, contatto dermico e inalazione di polveri in ambiente esterno (outdoor) per il suolo superficiale;
- volatilizzazione dei vapori verso ambienti indoor ed outdoor.

Il rischio massimo associato a tale scenario, determinato sommando i rischi cumulati (sia cancerogeni che tossici) derivanti da ciascuna via di esposizione, è risultato inferiore ai limiti di accettabilità per cui i lavoratori che dovessero essere impegnati in operazioni di scavo sarebbero soggetti a rischi accettabili se venissero rispettati i tempi di esposizione ipotizzati.