

Luigi Boeri, Ingegnere & Associati



LSCT – La Spezia Container Terminal S.p.A.

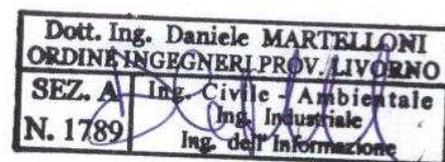


*Nuovo Terminal Ravano del Porto della Spezia*

***Analisi della conterminazione della  
colmata della Marina del Canaletto  
nel Porto della Spezia per la  
verifica di assenza di rischi per  
l'ambiente***

*EH&S Report 028-21*

*Environment, Health and Safety*



*Studio di Ingegneria*

**Sede Legale:** ✉ *Via di Marmiceto 6/C  
56121 Ospedaletto Pisa*

☎: + 39 050 6204260

☎: + 39 050 6204259



✉: [info@studioboeri.it](mailto:info@studioboeri.it)  
<http://www.studioboeri.it>

*Pisa, 26 febbraio 2022*



*LSCT – La Spezia Container Terminal S.p.A.*



*Nuovo Terminal Ravano del Porto della Spezia*

*Analisi della conterminazione della colmata della Marina del  
Canaletto nel Porto della Spezia per la verifica di assenza di rischi  
per l'ambiente*



## **INDICE**

<b>1.</b>	<b>LA COLMATA DELL'AMPLIAMENTO DEL TERMINAL RAVANO.....</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>INQUADRAMENTO NORMATIVO .....</b>	<b>6</b>
<b>3.</b>	<b>INQUADRAMENTO TERRITORIALE .....</b>	<b>7</b>
<b>4.</b>	<b>DATI E DOCUMENTAZIONE DI BASE .....</b>	<b>8</b>
<b>4.1.</b>	<b>Aspetti Geologici e Stratigrafici .....</b>	<b>8</b>
<b>4.2.</b>	<b>Caratterizzazione Ambientale dei Sedimenti della Marina del   Canaletto del Porto della Spezia ai sensi del D.M. 173/2016 (ottobre   2021).....</b>	<b>14</b>
<b>4.3.</b>	<b>Caratterizzazione Ambientale della Falda .....</b>	<b>16</b>
4.3.1.	Aspetti quantitativi: livelli piezometrici .....	17
4.3.2.	Aspetti qualitativi .....	22
<b>4.4.</b>	<b>Caratterizzazione dei fondali antistanti il Molo Garibaldi e interni al   secondo e terzo bacino portuale della Spezia (agosto 2020).....</b>	<b>23</b>
<b>4.5.</b>	<b>Caratterizzazioni delle acque marine antistanti la colmata.....</b>	<b>24</b>
<b>5.</b>	<b>CONCENTRAZIONE RAPPRESENTATIVA DEI SEDIMENTI DEL FONDO DELLA COLMATA (CONCENTRAZIONE SORGENTE) .....</b>	<b>28</b>
<b>5.1.</b>	<b>Stima delle concentrazioni nelle acque interstiziali della colmata .....</b>	<b>31</b>
<b>6.</b>	<b>METODOLOGIA SEGUITA PER LA PREDISPOZIONE DEL MODELLO NUMERICO DI FLUSSO E DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI.....</b>	<b>36</b>
<b>7.</b>	<b>MODELLO CONCETTUALE DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>37</b>
<b>8.</b>	<b>MODELLO MATEMATICO DI FLUSSO .....</b>	<b>38</b>
<b>8.1.</b>	<b>Stato di fatto .....</b>	<b>38</b>
8.1.1.	Il dominio di calcolo e il modello 3D.....	38
8.1.2.	Stratigrafia di riferimento.....	40
8.1.3.	Condizioni al contorno .....	41
8.1.4.	Permeabilità utilizzate .....	44
8.1.5.	Calibrazione .....	44
8.1.6.	Risultati .....	45
<b>8.2.</b>	<b>Stato di Progetto .....</b>	<b>50</b>
8.2.1.	Il dominio di calcolo e il modello 3D.....	50
8.2.2.	Stratigrafia di riferimento.....	51
8.2.3.	Condizioni al contorno .....	52
8.2.4.	Opzione 1: riempimento della colmata con materiale da cava .....	53
8.2.5.	Opzione 2: riempimento con sedimenti provenienti dai dragaggi.....	60
8.2.6.	Opzione 3: realizzazione di un dreno a monte della colmata .....	66
8.2.7.	Verifica dei flussi in uscita dalla colmata nel caso di aumento del gradiente della falda.....	70
<b>8.3.</b>	<b>Considerazioni finali sui risultati del modello.....</b>	<b>73</b>
<b>9.</b>	<b>CONSIDERAZIONI SUL MONITORAGGIO .....</b>	<b>74</b>
<b>10.</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>75</b>

## 1. LA COLMATA DELL'AMPLIAMENTO DEL TERMINAL RAVANO

Il terminal della *Banchina Ravano* sarà dotato di una banchina operativa di lunghezza pari a **520 m** circa (di cui **156 m** circa del lato di colmata fronte mare). La quota dei fondali di progetto fronte banchina sarà pari a **15 m s.l.m.m.** così come previsto dal *PRP* vigente. La configurazione del *Nuovo Terminal Ravano* è conforme alle previsioni del vigente *PRP* del *Porto della Spezia*.

La quota del piano banchina è stata posta a **+2.50 m s.l.m.m.**, coincidente con quella delle due banchine esistenti che verranno inglobate nella nuova struttura.

Lo specchio acqueo su cui viene realizzata la colmata è caratterizzato in maggioranza da modeste profondità (inferiori a **5 m**) e con terreni di base di scarsissime capacità portanti e potenzialmente contaminati. In riferimento alle caratteristiche geotecniche dei terreni di base i *sedimenti del fondo dovranno pertanto essere consolidati*. L'intervento previsto per il consolidamento dello strato di depositi fangosi che si estende dalla quota fondale (**-3.00 m s.m.**) fino a quota **-12.00 m s.m.** circa, è costituito dalla realizzazione di colonne di ghiaia (*vibrosostituzione* con metodo "*bottom-feed*") collocate ai vertici di una maglia quadrata di **2.00 m** di lato.

La colmata ingloberà le attuali banchine interne della *Marina del Canaletto* e i terrapieni a tergo.

Per quanto riguarda la *gestione dei sedimenti sul fondo della realizzanda colmata* tra gli obiettivi primari indicati in *PTFE*, oltre a quello di minimizzare le volumetrie di sedimento da destinare a discarica, rientra anche quello, già condiviso con la struttura tecnica della *Regione Liguria*, di minimizzare la movimentazione dei sedimenti permettendo di annullare il potenziale rischio di diffusione nell'ambiente circostante della frazione più fina, e maggiormente contaminata, dei sedimenti stessi, legato alle varie operazioni, che non si potrebbe escludere anche adottando sistemi di dragaggio di tipo ambientale. Il previsto refluitamento, sopra i sedimenti del fondo della colmata, di materiale da cava, o di sedimenti idonei, fungerà inoltre da *capping* minimizzando ulteriormente la potenziale diffusione dei contaminanti verso l'ambiente.

Alla luce di tali considerazioni, nel *PTFE* si propone la *messa in sicurezza dei sedimenti* della *Marina del Canaletto*. La messa in sicurezza verrà attuata mediante la *conterminazione* delle strutture di banchina che delimitano l'area, sia esistenti (tutte con pareti continue di palancole che pervengono a quote molto inferiori di quelle del letto dello strato di sedimenti contaminati caratterizzati intestandosi all'interno dello strato argilloso) che di nuova realizzazione (diaframmi di palancole con gargami impermeabili in grado di garantire una permeabilità corrispondente ad un strato di un metro di spessore di materiale caratterizzato da un coefficiente di permeabilità  $k = 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ). Verrà inoltre posto sopra i sedimenti uno strato di materiali inerti da cava o di sedimenti idonei da punto di vista qualitativo, che ridurranno ancor più la diffusione di eventuali contaminanti verso l'ambiente.

Deve quindi essere effettuata una *valutazione del potenziale rischio ambientale dei sedimenti costituenti i fondali della colmata* come indicato in *Allegato B al D.M. 7 novembre 2008*.

Per il riempimento della colmata della *Marina del Canaletto* il *PFTE* prevede l'impiego di *materiale di cava*; nell'ambito del presente studio sarà inoltre presa in considerazione la possibilità di impiegare in quota parte, nel riempimento, sedimenti provenienti dai futuri dragaggi previsti nei fondali antistanti il *Molo Garibaldi* e interni al *Secondo* e *Terzo Bacino Portuale della Spezia*. In tal caso, i sedimenti dovranno essere *conformi al refluento così come previsto dal D.M. 173/16*.

Per quanto riguarda la pavimentazione del piazzale operativo del nuovo terminal, che riguarderà sia la superficie della nuova colmata che quella del piazzale esistente, è stata prevista l'adozione di soluzioni tecniche differenti a seconda delle differenti diverse subaree previste da progetto (edifici, aree carrabili, etc). Su tutto il piazzale operativo del nuovo terminal contenitori verrà realizzata una rete di drenaggio delle acque meteoriche con annessi dispositivi di trattamento delle acque di prima pioggia (*AMPP*). Le acque raccolte verranno fatte transitare attraverso degli impianti di trattamento prima del loro scarico a mare.

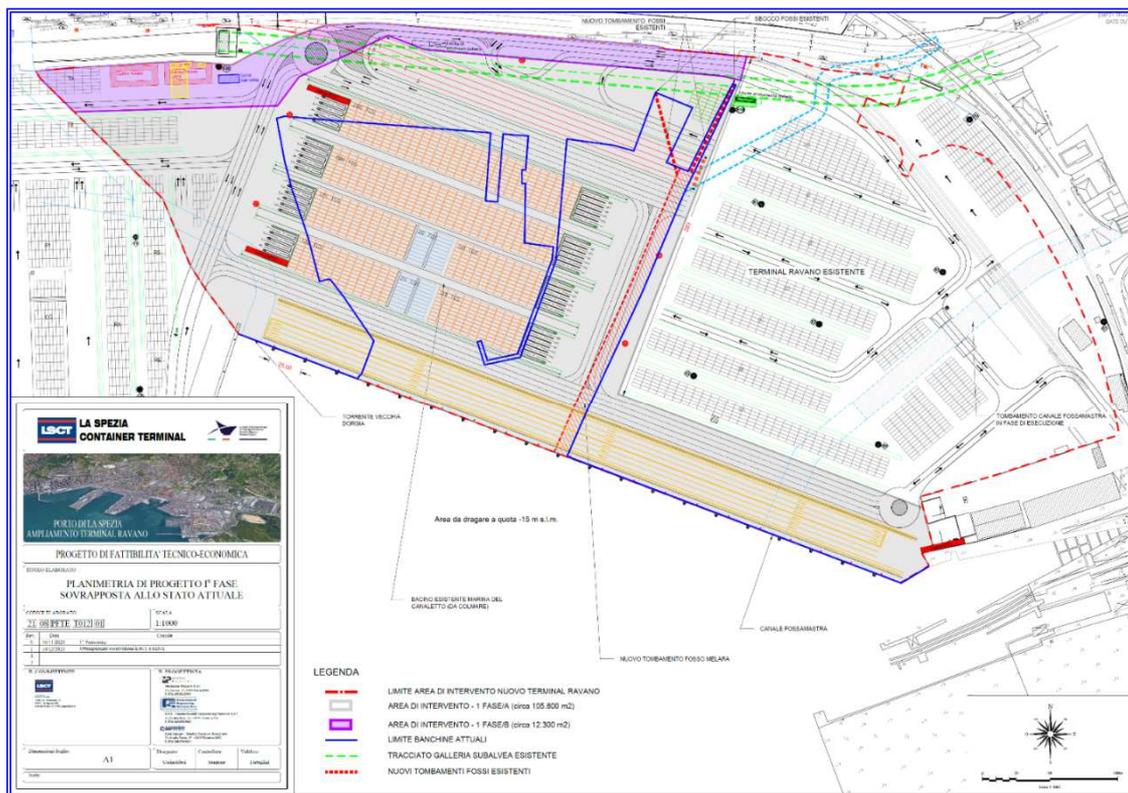


Figura 1 - Planimetria della cassa di colmata sovrapposta allo stato di fatto

## 2. INQUADRAMENTO NORMATIVO

Per la realizzazione della colmata *non è necessario, ai fini progettuali, dragare i sedimenti del fondo*. Pertanto *non si applicano le classi del DM 173/06 che si riferiscono ai sedimenti provenienti da attività di dragaggio*. L'eventuale dragaggio (rimozione) deve essere preso in considerazione solo nel caso in cui il mantenimento in sito dei sedimenti del fondo della colmata induca un rischio per l'ambiente. I limiti ammissibili per i sedimenti sul fondo della colmata sono:

- ✚ *“Non Pericolosi” nei S.I.N. ai sensi dell’art. 5 bis, comma 2, lettera c), della Legge 28 gennaio 1994, n. 84 e del D.M. 15 luglio 2016, n. 172;*
- ✚ *Limite Colonna B, Tab.1, All. 5, D.Lgs. 152/06, ai sensi del D.M. 173/16, Allegato n. 1 (cap 3.1.3). Per i sedimenti del fondo della colmata il D.M. 173/16 indica come sufficiente una caratterizzazione del fondale sull'impronta della colmata per uno spessore di 50 cm, non considerate le indagini microbiologiche e valutati i risultati secondo la destinazione d'uso industriale.*

I sedimenti oggetto dello studio, come meglio riferito nel prosieguo, sono risultati tutti *non pericolosi*, quindi *ammissibili a rimanere in cassa di colmata secondo quanto stabilito per i SIN*.

*In assenza di una chiara indicazione per il SIR, è stata valutata anche l'opzione più cautelativa di applicazione del D.M. 173/16 e, quindi, del limite di Colonna B, Tab. 1, All. 5 del D.Lgs. 152/06 per il fondale dell'impronta della cassa di colmata. In caso di superamento del limite di Colonna B, secondo il D.Lgs. 152/06, deve essere applicata una valutazione del rischio atta a verificare che non si pregiudichino gli obiettivi di qualità delle matrici ambientali.*

*Sul punto occorre evidenziare che la metodologia usata a progetto per la verifica della conterminazione della struttura di confinamento e la valutazione del rilascio dei contaminanti dalla cassa di colmata è stata recentemente adottata dal MiTE nel S.I.N. “Napoli-Orientale”. Essa consta di una valutazione della concentrazione sorgente come potenziale fonte di contaminazione e della valutazione dei possibili processi di filtrazione dalla colmata che associati potrebbero comportare una variazione delle attuali condizioni ambientali.*

### 3. **INQUADRAMENTO TERRITORIALE**

Nell'immagine fotografica successiva è individuata l'area di intervento all'interno del **Porto della Spezia**; in particolare, la colmata sarà realizzata in corrispondenza di uno specchio acqueo, denominato **Marina del Canaletto**, situato tra la **Banchina Fornelli** e la **Calata Ravano**, destinato ad accogliere imbarcazioni di piccole dimensioni facenti parte della cosiddetta nautica sociale, in parte in pieno ambito cittadino, in una zona confinante con il fascio binari delle **FF.SS.** asservito alle necessità portuali.



## 4. DATI E DOCUMENTAZIONE DI BASE

Ai fini della valutazione del rischio associato al potenziale rilascio di inquinanti dalla colmata del **Nuovo Terminal Ravano** sono stati analizzati i seguenti documenti:

- ✦ *Progetto di fattibilità tecnico-economica – ampliamento Terminal Tavano, rev 1 (Dicembre 2021)*
- ✦ *Caratterizzazione ambientale dei sedimenti della marina del canaletto del porto della Spezia ai sensi del D.M. 173/2016 (Ottobre 2021), rev.03*
- ✦ *Caratterizzazione falda: Area ex-MALCO (anno 2010), Area Tamoil (anni 2004-2009), area ex-SIO (ano 2018), piezometro in vicinanza del sondaggio Sb9, Centrale Enel*
- ✦ *Varianti al piano urbanistico comunale per il sistema delle aree ENEL della Spezia Rapporto Ambientale, gennaio 2021.*
- ✦ *Dati di piezometri presenti nel Geoportale della regione Liguria.*
- ✦ *Caratterizzazione acque di mare: dati di varie campagne di monitoraggio effettuate da ARPAL dal 2003 al 2017.*

Di seguito vengono descritti i dati di caratterizzazione geologica ed ambientale desunti dai documenti sopra indicati ed utilizzati ai fini dell'impostazione del modello per la valutazione dei rilascio dei contaminanti dalla colmata.

### 4.1. Aspetti Geologici e Stratigrafici

Ad ampia scala, nella zona a **nord** dell'area di intervento, sono disponibili la carta geologica e la carta geotecnica della **Regione Liguria** scaricate dal **Geoportale** della **Regione**. Dalla carta geologica emerge come la zona a **nord** veda prevalentemente depositi alluvionali terrazzati con ghiaie, sabbie e limi di origine fluviali.



Figura 2 – Stralcio della carta geologica nell'area di intervento

Dalla carta geotecnica della **Regione** si ottengono invece delle informazioni più di dettaglio, utili in particolare in fase di realizzazione del modello di flusso, ovvero:

- ✚ *la zona nord è caratterizzata dalla presenza di materiale grossolano quale ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo (Figura 3, area in verde)*
- ✚ *la zona centrale è invece caratterizzata dalla presenza di materiale più fino e coesivo quale limi organici, argille limose organiche di bassa plasticità (Figura 3, area in marrone)*
- ✚ *la zona più a sud-est vede la presenza di sabbie limose, miscela di sabbia e limo (Figura 3, area in giallo).*

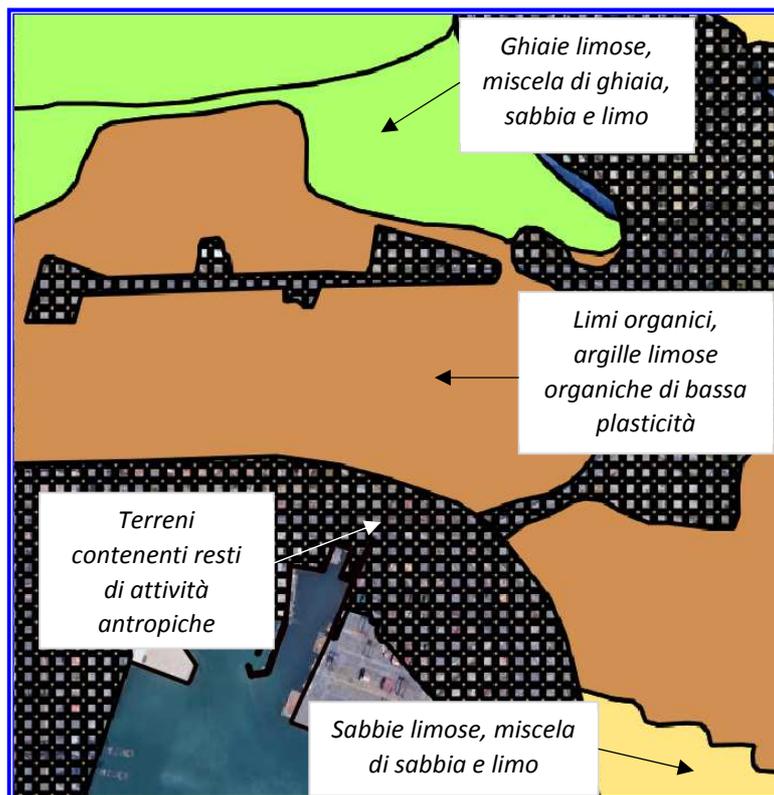


Figura 3 – Stralcio della carta geotecnica nell'area di intervento

In corrispondenza dell'area di intervento le unità stratigrafiche sono state definite in fase di **PFTE**<sup>1</sup> sulla base di una serie di sondaggi riportati in **Tabella 1**. Le unità stratigrafiche ricostruite in corrispondenza dell'area di intervento sono le seguenti:

- (A) *depositi marini attuali e recenti*, che rappresentano i sedimenti del fondale attuale e quelli posti al disotto delle colmate antropiche già in opera. Sono principalmente costituiti da argille, argille limose, limi argilloso-sabbiosi e subordinatamente da sabbie limose e limoso-argillose e sabbie ghiaiose, di colore grigio-nerastro localmente tendente al bruno, con abbondante materia organica indecomposta (resti algali localmente prevalenti), frammenti di gusci di bivalvi e ghiaie eterometriche sparse o concentrate in lenti. Lo spessore di tali depositi varia notevolmente da zona a zona, con minimi dell'ordine di **1,0 m** e massimi di circa **9,6 m**. Gli spessori maggiori si rilevano in corrispondenza del fondale attuale di **Marina del Canaletto (6,0-9,6 m)**.
- (B) *depositi continentali (alluvionali fluvio-lacustri) di natura prevalentemente limoso-argillosa con intercalazioni di depositi marini*, principalmente costituiti da argille, argille

<sup>1</sup> **Relazione geologica del PFTE Porto di La Spezia - Ampliamento terminal Ravano, Dicembre 2021.**

limose, limi argilloso-sabbiosi e sabbie con limi, di colore variabile dal marrone chiaro-avana al grigio, con frequenti varvature, a luoghi con frammenti di gusci di bivalvi e ghiaie eterometriche sparse o concentrate in lenti. Costituiscono presumibilmente depositi fluvio-lacustri e/o di laguna salmastra in cui si intercalano sedimenti francamente marini di fondale poco profondo, legate ad oscillazioni del livello marino. Lo spessore massimo di tale unità è stato rilevato nell'ordine dei **6-7 m**.

- (C) *depositi continentali (alluvionali fluvio-lacustri) di natura prevalentemente limoso-argillosa*, principalmente costituiti da argille limose o limoso-sabbiose, limi argillosi e sabbie limose argillose di colore variabile dal marrone-avana al grigio chiaro, con frequenti varvature, a luoghi con ghiaie eterometriche sparse o concentrate in lenti e orizzonti torbosi nerastri. Costituiscono anch'essi depositi fluvio-lacustri e/o di laguna salmastra caratterizzati da spessori variabili con massimi anche superiori ai **20 m**.
- (D) *depositi continentali (alluvionali fluvio-lacustri e di spiaggia emersa) di natura prevalentemente sabbioso-ghiaiosa* principalmente costituiti da limi con sabbie e ghiaie, sabbie limoso-argillose, sabbie e/o limi con ghiaie di colore variabile dal marrone chiaro al grigio-rossastro, a luoghi con resti vegetali nerastri. La frazione ghiaiosa, localmente molto abbondante, è costituita da elementi prevalentemente arenacei e subordinatamente calcarei o silicei, eterometrici fino alla dimensione dei ciottoli e blocchi, generalmente scarsamente evoluti e sub-angolosi. A luoghi possono essere presenti intercalazioni di argille limose, limi argillosi e argilloso-sabbiose di colore marrone chiaro, grigio-rosato fino al nerastro, con ghiaie sparse e resti carboniosi. A struttura generalmente caotica, costituiscono presumibilmente depositi continentali alluvionali e/o di spiaggia emersa, provenienti in gran parte dall'erosione e rielaborazione dei flysch costituenti i rilievi collinari molto prossimi alla linea di costa. Nel corso dei sondaggi eseguiti non è stata raggiunta la base di tali depositi, almeno fino alle profondità investigate (**~ -58 m slm**). Lo spessore di tale unità risulta pertanto superiore ai **30 m**.

Superficialmente, in corrispondenza delle banchine esistenti, sono presenti **terreni di riporto eterogenei (r)** caratterizzati da una estrema variabilità granulometrica, sia in senso laterale che verticale, in funzione della natura dei terreni di provenienza messi in opera per la formazione delle colmate. Sono essenzialmente costituiti da aggregati disomogenei di ghiaie e ciottoli in matrice sabbiosa, sabbioso limosa e/o limoso-argillosa a luoghi molto abbondante o prevalente di colore variabile dal marrone al grigio nerastro. Gli elementi grossolani sono eterometrici anche fino alla dimensione dei blocchi, poligenici (arenacei, calcarei, ecc...) con presenza anche di frammenti di laterizi e materiali antropici vari. Lo spessore di tali terreni può raggiungere localmente anche i **15,0 m**.

<b>A</b>	<b>depositi marini attuali e recenti</b> ( <i>argille, argille limose, limi argilloso-sabbiosi e subordinatamente sabbie limose e limoso-argillose e sabbie ghiaiose, con abbondante materia organica indecomposta e frammenti di gusci di bivalvi e ghiaie eterometriche sparse o concentrate in lenti</i> )
<b>B</b>	<b>depositi continentali alluvionali fluvio-lacustri prevalentemente limoso-argillosi con intercalazioni di depositi marini</b> ( <i>argille, argille limose, limi argilloso-sabbiosi e sabbie con limi, con frequenti varvature, a luoghi con frammenti di gusci di bivalvi e ghiaie eterometriche sparse o concentrate in lenti</i> )
<b>C</b>	<b>depositi continentali alluvionali fluvio-lacustri prevalentemente limoso-argillosi</b> ( <i>argille limose o limoso-sabbiose, limi argillosi e sabbie limose argillose di colore variabile dal marrone-avana al grigio chiaro, con frequenti varvature, a luoghi con ghiaie eterometriche sparse o concentrate in lenti e orizzonti torbosi nerastri</i> )
<b>D</b>	<b>depositi continentali alluvionali fluvio-lacustri prevalentemente sabbioso-ghiaiosi</b> ( <i>limi con sabbie e ghiaie, sabbie limoso-argillose, sabbie e/o limi con ghiaie, a luoghi con resti vegetali nerastri; le ghiaie, localmente molto abbondanti, sono eterometriche fino alla dimensione dei ciottoli e blocchi; a luoghi sono essere presenti intercalazioni di argille limose, limi argillosi e argilloso-sabbiose con ghiaie sparse e resti carboniosi</i> )

Figura 4 – Unità stratigrafiche individuate nell'ambito del PFTE

Nella tabella seguente si riportano i sondaggi considerati per ricostruire la stratigrafia in corrispondenza dell'area di intervento.

Tabella 1 – Sondaggi eseguiti in fase di PFTE in corrispondenza dell'area di intervento (le coordinate sono espresse nel sistema di riferimento Monte Mario 3003)

Sondaggio	Coord. X	Coord. Y	A top (m slm)	B top (m slm)	C top (m slm)	D top (m slm)
Sb1	1567903.94	4884307.71	-7.0	-11.6	-21.1	-48.6
SB1	1568127.52	4884185.07	-11.0	-13.0	-18.0	-30.0
Sb2	1567939.76	4884295.47	-6.6	-11.1	-24.1	-46.4
SB2	1568132.87	4884199.98	-12.7	-10.0	-17.7	-29.6
Sb3	1568120.41	4884223.22	-9.8	-13.6	-18.0	-31.0
SB3	1568260.7	4884134.66	-8.8	-11.8	-20.3	-28.8
Sb5	1568329.05	4884154.21	-4.7	-7.7	-15.2	-26.1
Sb6	1568165.89	4884297.92	-6.5	-10.5	-10.5	-25.5
Sb8	1568199.22	4884358.67	-7.1	-13.3	-13.3	-20.0
Sb9	1568423.03	4884255.53	-2.0	-6.7	-18.5	-13.4
Sb11	1568232.21	4884409.74	-6.5	-13.0	-13.0	-22.5
Sb13	1567984.95	4884477.39	-3.4	-10.0	-10.0	-21.0
Sb14	1567865.9	4884276.67	-7.2	-11.9	-21.7	-50.0
Sb16	1568199.86	4884152.14	-10.3	-12.0	-17.2	-24.8
Sb17	1568333.28	4884103.16	-3.5	-7.5	-13.7	-25.3
Sb19	1567899.52	4884395.84	-3.1	-10.0	-12.2	-34.9
Sb21	1567997.03	4884457.15	-2.0	-9.3	-9.3	-22.0
Sb23	1568142.42	4884340.83	-3.0	-11.1	-17.7	-23.0
Sb25	1568089.58	4884226.4	-9.2	-12.7	-18.1	-31.5
Sb26	1567983.81	4884237.91	-6.0	-12.9	-22.0	-36.7
Sb27	1568038.28	4884221.39	-5.0	-14.0	-22.0	-37.5
Sb29	1567984.05	4884302.34	-3.3	-10.9	-19.6	-32.4
Sb30	1568031.45	4884375.27	-3.0	-12.5	-10.4	-27.2
Sb31	1568110.84	4884332.94	-3.2	-12.1	-14.0	-27.2



Figura 5 – Ubicazione dei sondaggi realizzati nell'ambito del PFTE

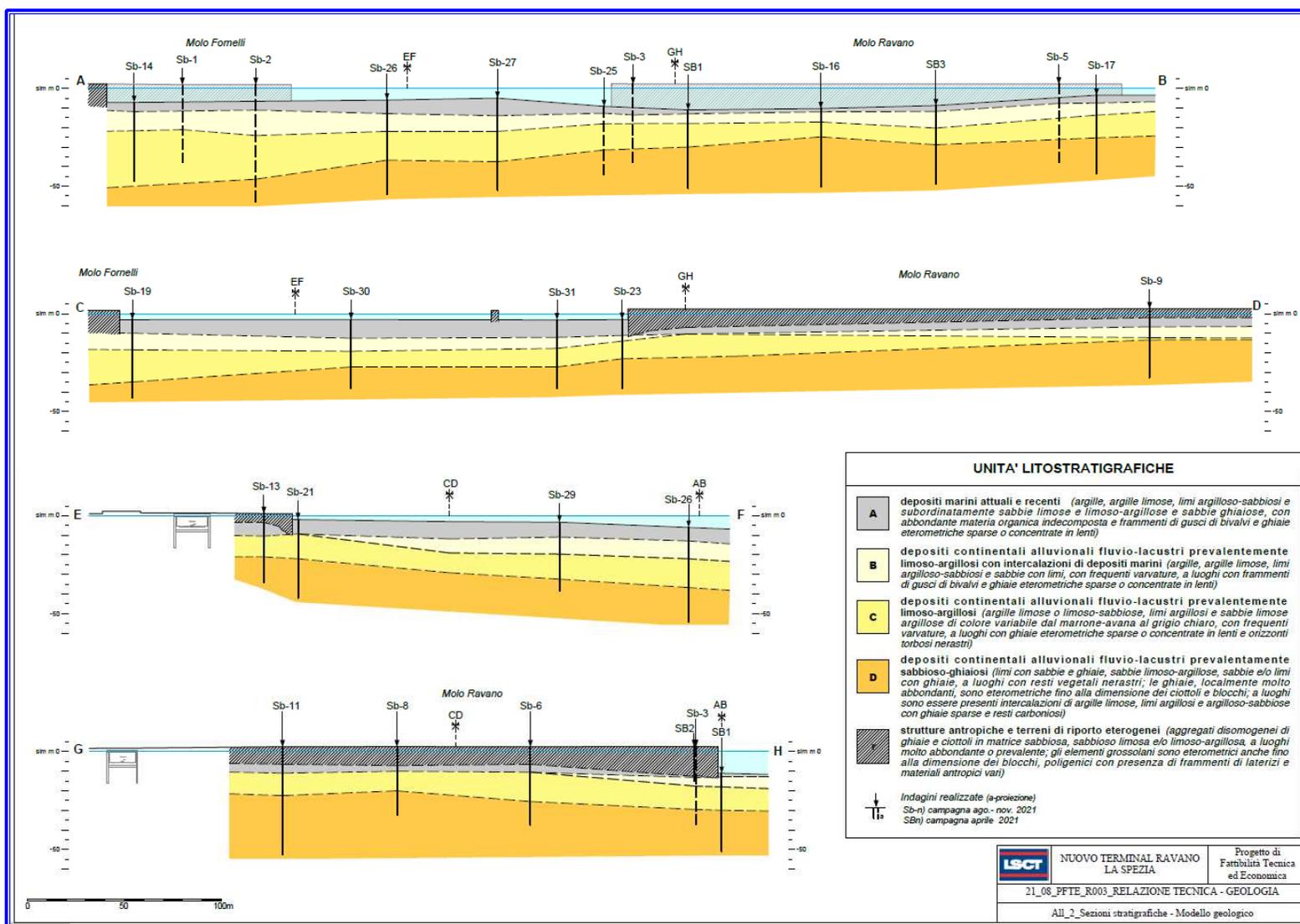


Figura 6 – Sezioni stratigrafiche di riferimento realizzate nell'ambito del PFTE

#### 4.2. *Caratterizzazione Ambientale dei Sedimenti della Marina del Canaletto del Porto della Spezia ai sensi del D.M. 173/2016 (ottobre 2021)*

Al fine della caratterizzazione dei sedimenti sono stati effettuati **19 carotaggi** della lunghezza di **2 m** ciascuno. Il prelievo delle carote è stato effettuato nei giorni **23 e 24 settembre 2021** in parte dalla ditta **Co.L.Mar. S.r.l.** di **La Spezia** che, tramite un **Vibrocorer** ha effettuato il prelievo di **13 carote** e in parte dalla ditta **GEOTER** che tramite un carotiere a rotazione ha effettuato il prelievo di **6 carote**.

La caratterizzazione è stata eseguita sulla base del **D.M. 15 luglio 2016, n. 173** e sulla base del **D.Lgs. 152/06**, con riferimenti ai limiti (**CSC**) fissati per il suolo con destinazione d'uso industriale (**colonna B, Tab 1, All.5** alla **Parte Quarta** del **D.Lgs. 152/06**).

I sedimenti analizzati sono caratterizzati da un'alta percentuale di **pelite** (i valori misurati oscillano tra un minimo di **52,0%** e un massimo di **97,2%**). La caratterizzazione chimica ha evidenziato superamenti del **limite L2** del **D.M. 173/2016** per molti analiti (**metalli** e **composti organici**) da cui un **indice di pericolo chimico (HQc)** corrispondente a classi di pericolo da **Alto** a **Molto Alto**.

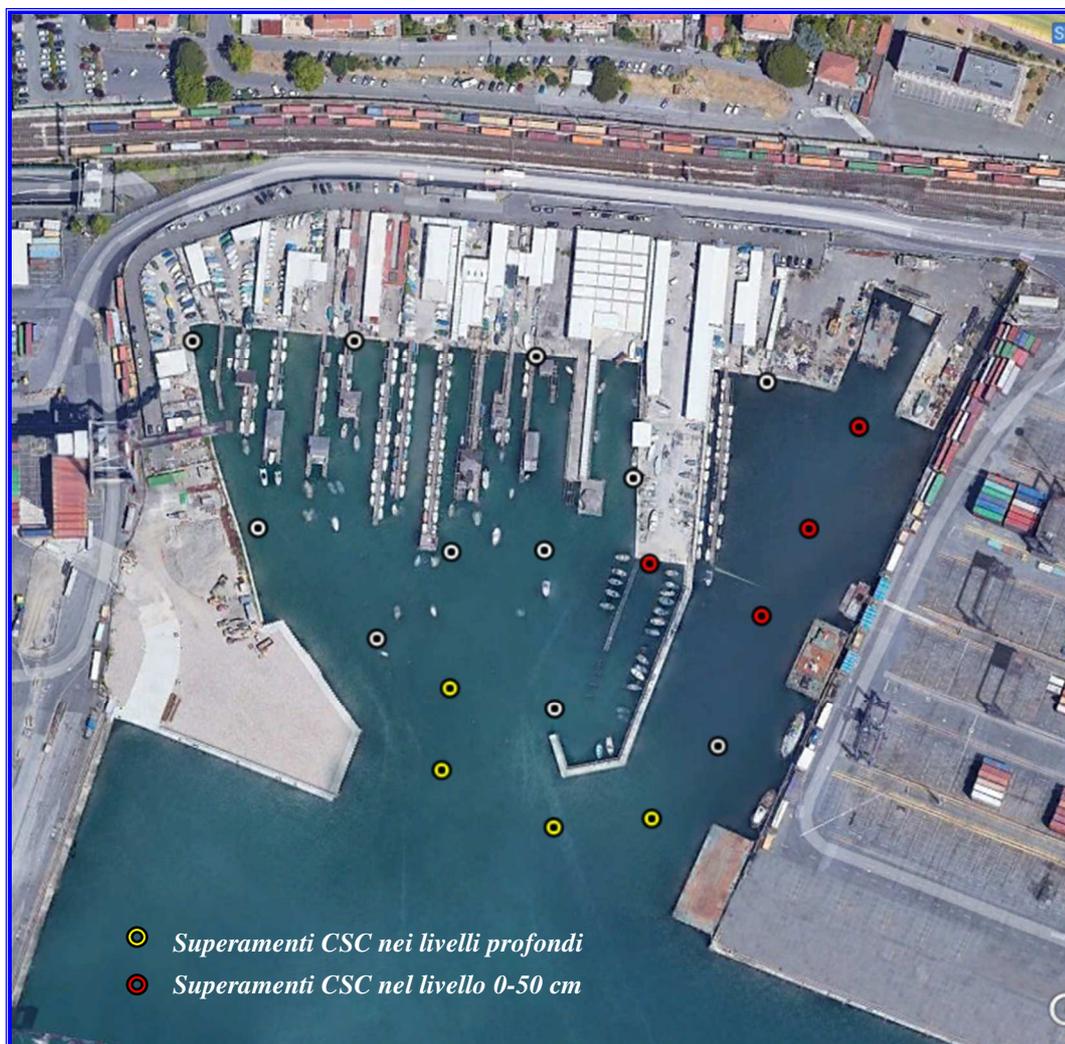
Da un punto di vista **tossicologico** i sedimenti sono risultati per la maggior parte in **classe E**. Nel **Report** viene indicato che qualora questi sedimenti dovessero essere dragati per essere conferiti in cassa di colmata dovrebbe essere valutato il **"LEG"** (**Livello di Effetto Grave**) cioè dei **Livelli Chimici** di riferimento sito specifici, prima di poter definire un eventuale collocazione del materiale in ambiente conterminato.

**Gli scriventi evidenziano tuttavia che non è interesse un dragaggio di tali sedimenti ma un mantenimento degli stessi in sito sul fondo della colmata con copertura di materiali idonei.**

La destinazione d'uso della futura colmata è **industriale**; pertanto, il limite dei materiali in esso contenuta è quella della **Colonna B** della **Tabella 1, Allegato 5** alla **Parte Quarta** del **DLgs 152/06**. **I risultati della caratterizzazione indicano superamenti di tale limite per Idrocarburi C>12 e PCB.**

*Tabella 2 – Concentrazioni di Idrocarburi pesanti (IC>12) e PCB nei sedimenti della futura colmata.  
Nell'immagine è indicata la posizione dei sondaggi e in giallo o rosso i superamenti del limite di  
colonna B (uso industriale)*

sondaggio	Profondità	Idrocarburi C>12	Somma PCB
C3	100-200	805,1	52,555
C3-2	100-200	1879,68	145,065
C4	100-200	1462,05	18,32
C4-3	50-100	1156,58	167,6
C5	0-50	1087,27	0,446
C5-1	0-50	755,16	76,691
C5-3	0-50	986,52	473,669
C6-1	0-50	2021,94	349,503
C6-1	50-100	1232,63	7312,133
C6-1	100-200	5597,68	3145,874



### 4.3. Caratterizzazione Ambientale della Falda

Nella zona di intervento non sono disponibili *carte idrogeologiche (mappe delle isofreatiche)* redatte dalla *Regione*. Per ottenere l'andamento della falda locale e avere quindi un riferimento per la taratura del modello numerico di flusso si rende necessario ricostruire l'andamento delle *isofreatiche* a partire da dati puntuali di livello piezometrico, registrati in piezometri o pozzi presenti sul territorio.

Tali dati sono stati ottenuti dal *Geoportale* della *Regione*, nella sezione delle indagini geognostiche e da alcuni documenti progettuali reperiti tramite *LSCT*. Non tutti i dati sono completi e per pochi di essi sono presenti le coordinate dei punti di analisi. Inoltre, i dati sono riferiti ad anni e mesi differenti e soprattutto sono ottenuti da misure puntuali e non in continuo. Di conseguenza non è stato possibile analizzare i dati né da un punto di vista statistico (essendo disponibile, di fatto, un'unica misura per ogni piezometro) né da un punto di vista di *regime freaticometrico*, definendo cioè i livelli medi di piena e di magra della falda. Si assume quindi che tutti i dati disponibili siano anche validi e che essi descrivano il comportamento medio della falda.

Sono quindi stati analizzati i dati di falda disponibili in corrispondenza di:

- ✚ *Sito Ex Malco (anno 2010)*
- ✚ *Sito Ex SIO (anno 2018)*
- ✚ *Sito Tamoil (anni 2004-2009)*
- ✚ *Centrale Enel (anno 2021)*
- ✚ *Piezometro al porto in corrispondenza del sondaggio Sb-9 (anno 2021)*
- ✚ *Vari punti di indagine accessibili dal Geoportale della Regione (vari anni)*



Figura 7 – Ubicazione dei punti di misura della falda

#### 4.3.1. *Aspetti quantitativi: livelli piezometrici*

Si riportano di seguito, per ciascun sito, le informazioni reperite sul livello freatico misurato.

- ✚ **Sito Ex SIO<sup>2</sup>**: la falda è stata riscontrata compresa fra 2.7-2.8 m slm e 0.7-1.2 m slm con un andamento prevalente nord-sud



Figura 8 – Andamento delle linee di falda in corrispondenza del sito Ex Sio

- ✚ **Sito Ex Malco<sup>3</sup>**: (ad ovest del torrente Dorgia): si riporta la mappa delle isofreatiche elaborata, in cui si nota che la direzione prevalente del flusso è da est verso ovest, e in cui emerge l'azione drenante del Dorgia rispetto la falda superficiale. In corrispondenza del sito è stata misurata la conducibilità: circa tra 1E-07 e 1E-8 cm/s.

<sup>2</sup> Studio Geologico Ambientale – Rapporto Finale nell'ambito del progetto “Sub Distretto di trasformazione ADI/C Loc. La Pianta - Ex SIO Comune della Spezia, TALEA spa  
<sup>3</sup> Caratterizzazione Ambientale Area Ex MALCO, Comune di La Spezia, 2010



Figura 9 – Andamento delle linee di falda in corrispondenza del sito Ex Malco

✚ **Sito Tamoil<sup>4</sup>:** la direzione prevalente della falda è verso Nord-ovest, ovvero in direzione del torrente Dorgia

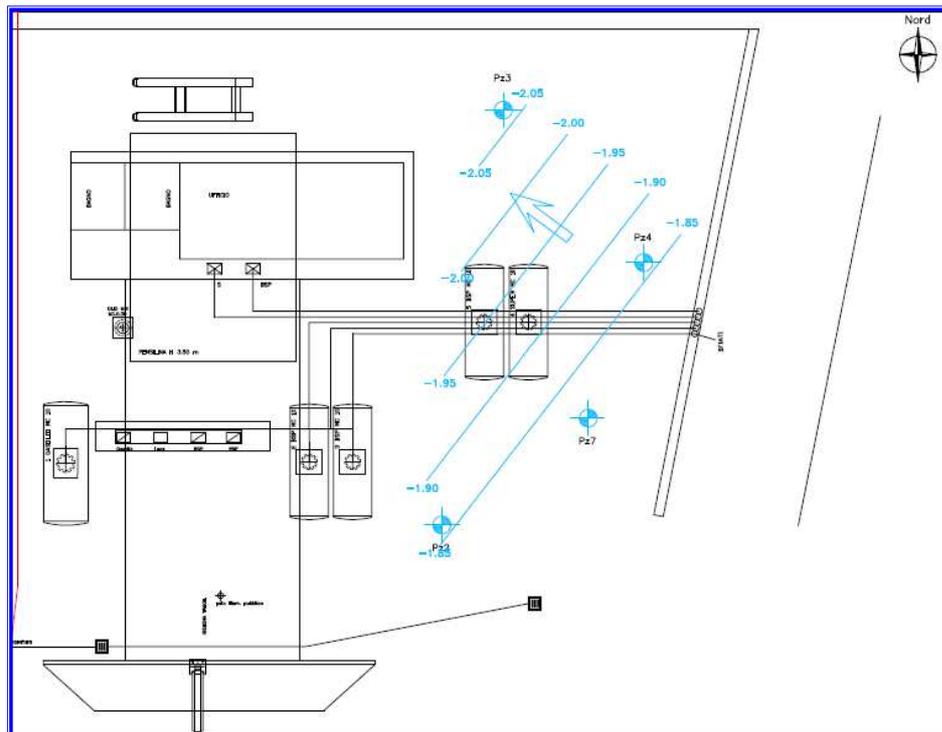


Figura 10 – Andamento delle linee di falda in corrispondenza del sito Tamoil

<sup>4</sup> Report di Monitoraggio, Campionamenti del 6 marzo 2009, Tamoil Italia S.p.A.

- ✚ **Piezometro in vicinanza del sondaggio Sb9:** è disponibile una misura della falda misurata durante il sopralluogo svolto in data 04/11/2021 presso il piezometro esistente utilizzato per i campionamenti. La falda è stata trovata ad una profondità di 1.9m dal PC, ovvero ad una quota di 0.1 m slm



Figura 11 – Ubicazione del piezometro vicino a sondaggio Sb-09

- ✚ **Centrale Enel<sup>5</sup>:** la figura sottostante mostra come il flusso sotterraneo sia diretto da Est verso Ovest fino a raccordarsi con la superficie marina in prossimità dell'area degli Stagnoni. L'andamento della piezometrica consente di individuare un asse di drenaggio principale proveniente dall'area delle Pianazze oltre e da due assi meno marcati provenienti rispettivamente da Nord (alimentazione dal bacino del Torrente Melara) e da Sud-Ovest (alimentazione dai modesti impluvi dei rilievi quarziticici posti a sud dell'area ENEL).

<sup>5</sup> Variante al Piano Urbanistico Comunale per il sistema delle aree ENEL della Spezia - Rapporto Ambientale, gennaio 2021.

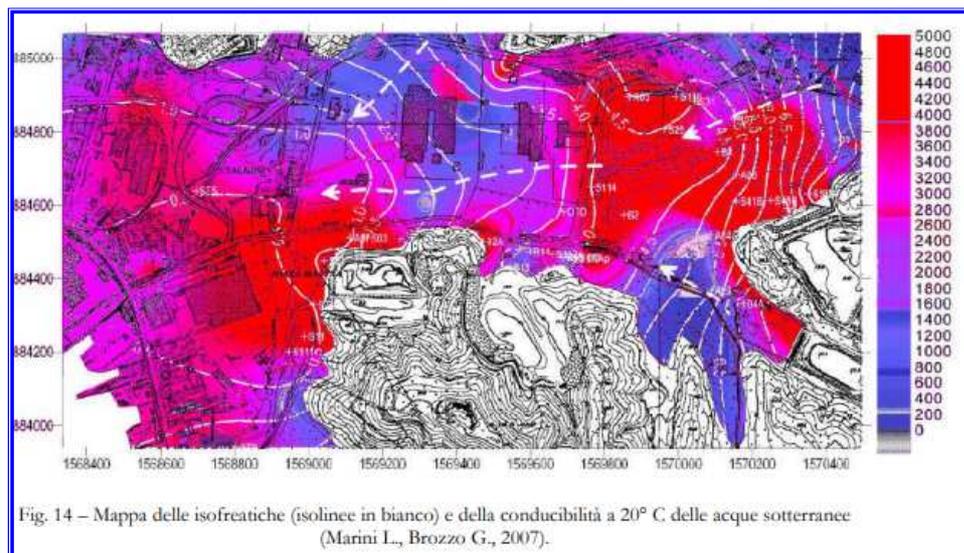


Figura 12 – Carta isofreatiche dell'area Enel

Nella tabella seguente sono riportati i valori di livello piezometrico assoluto (*m slm*) presi a riferimento per la ricostruzione delle *linee isofreatiche* e per la successiva fase di calibrazione del modello numerico.

Tabella 3 – Valori di livello piezometrico di riferimento

<i>ID</i>	<i>Coord. X</i>	<i>Coord. Y</i>	<i>Quota falda (m slm)</i>
1	1568340	4884993	2.8
2	1568399	4884198	0.1
3	1567684	4884761	0.8
4	1569190	4884632	2.3
5	1568978	4884927	4.6
6	1568223	4884554	0.1
7	1568331	4884547	0.2
8	1568009	4884919	2.9
9	1568007	4884938	3.0
11	1568050	4885040	3.3
12	1567961	4884920	2.5
14	1568241	4884564	0.3
15	1568100	4884513	0.1
16	1570612	4884756	8.5
17	1568931	4884518	0.5
18	1567716	4884604	0.5
19	1568064	4884721	1.8

Tali punti sono così disposti nel territorio:



Figura 13 – Disposizione dei piezometri presi a riferimento per la ricostruzione delle isofreatiche

Si fa notare che per la ricostruzione delle *isofreatiche*:

- ✚ *Si sono presi anche piezometri ricadenti fuori dall'area del dominio di calcolo del modello numerico di flusso*
- ✚ *Non sono disponibili dati nella zona ad ovest del porto, per cui in tale area le isofreatiche saranno poco rappresentative*

Per la ricostruzione delle *isofreatiche* si è utilizzato come metodo di interpolazione il *Kriging*<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> *I processi di interpolazione spaziale nella ricostruzione della superficie piezometrica, C. Cencetti et al., 2007*

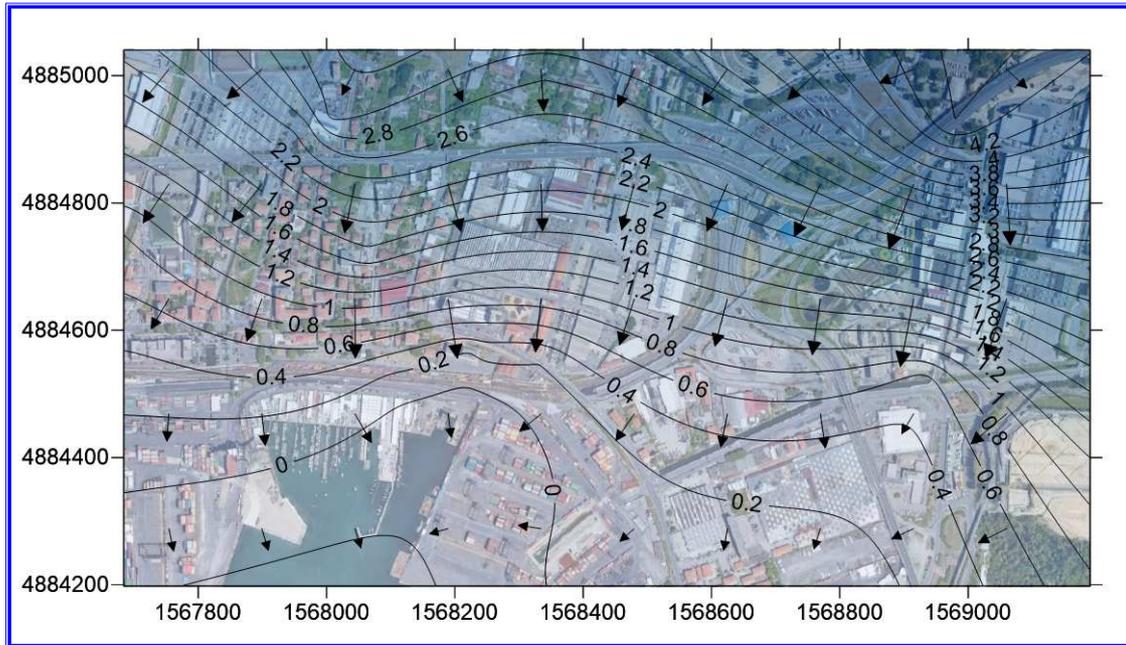


Figura 14 – Linee isofreatiche ricostruite con interpolazione Kriging

Dall'andamento qualitativo delle isofreatiche deriva quanto segue:

- ✚ *Nella zona a nord del porto, ed in particolare a nord della futura cassa di colmata, la falda si attesta intorno a +0.1-+0.2m slm*
- ✚ *Tra i piezometri posti più a nord e la zona di intervento si verifica una forte perdita di carico, di circa 3 m (da 3.2m slm a 0.1-0.2m slm)*
- ✚ *La direzione prevalente della falda è da nord a sud*
- ✚ *Lateralmente la falda tende a drenare verso il mare e di conseguenza la direzione è da nord-est a sud-ovest al lato est del dominio e da nord-ovest a sud est al lato ovest*

Nel modello numerico di flusso si cercherà di rappresentare sia l'andamento qualitativo (direzioni di flusso) che quello quantitativo (carichi piezometrici).

#### 4.3.2. Aspetti qualitativi

Le caratterizzazioni sono state eseguite, come già evidenziato, in anni differenti. Nell'area *ex-Malco* la falda è risultata drenata dal torrente *Dorgia* ed *esente da contaminazione*. Nel sito della stazione *Tamoil* la falda è risultata contaminata da *Pb*, *IC>12*, *BTEX*, *p-Xilene*. Nel sito *ex-SIO* la falda, con soggiacenza prossima allo strato di riporto superficiale (*-1 m* dal *p.c.*), *non è risultata con particolari criticità*. Gli scriventi pertanto rilevano una sostanziale *non criticità della falda nell'area* ad eccezione della contaminazione localizzata in corrispondenza della stazione della *TAMOIL*. La contaminazione risulta per il periodo *2004-2009*, non è noto pertanto se a valle di tale caratterizzazione sono state intraprese azioni di bonifica.

#### 4.4. *Caratterizzazione dei fondali antistanti il Molo Garibaldi e interni al secondo e terzo bacino portuale della Spezia (agosto 2020)*

La *AdSP* ha fatto eseguire nel **2020** nell'ambito della progettazione dei dragaggi una caratterizzazione dei fondali del *Porto*. I risultati di tale caratterizzazione sono riportati nel documento “*Servizio di caratterizzazione dei fondali antistanti il Molo Garibaldi e interni al Secondo e Terzo Bacino Portuale della Spezia – Relazione Tecnica*” dell’**agosto 2020**, redatto da *Ambiente S.p.A.* per conto dell’*AdSP*. I dati di interesse per il progetto della colmata sono i risultati relativi al *Terzo bacino*, i cui sedimenti di dragaggio potrebbero essere confluiti in quota parte nella costruenda cassa di colmata.

Risulta che in questo momento *AdSP* sta ripetendo tale caratterizzazione a causa di alcuni problemi con il laboratorio in relazione ai *test ecotossicologici* (i dati per la parte chimica risultano invece essere affidabili). Pare pure che la caratterizzazione sia stata estesa anche alla fascia antistante il *Nuovo Terminal Ravano*.

I dati attualmente disponibili indicano che in una piccola area immediatamente adiacente il futuro profilo di banchina (almeno così si desume dalle *tavole* dalla **2a** alla **2h** allegate alla citata *Relazione Tecnica*) i sedimenti risultano in *classe A-B-C* fino a **4 m** dal fondale e successivamente **D**) quindi ammissibili al refluento in cassa di colmata. I rimanenti sedimenti più al largo risulterebbero in *classe E* (confermato anche con *LEG* sito specifico) e non ammissibili in cassa di colmata.

Ovviamente la classificazione dipende dai risultati tossicologici che sono in corso di accertamento. Pertanto, gli scriventi sospendono al momento qualunque giudizio.

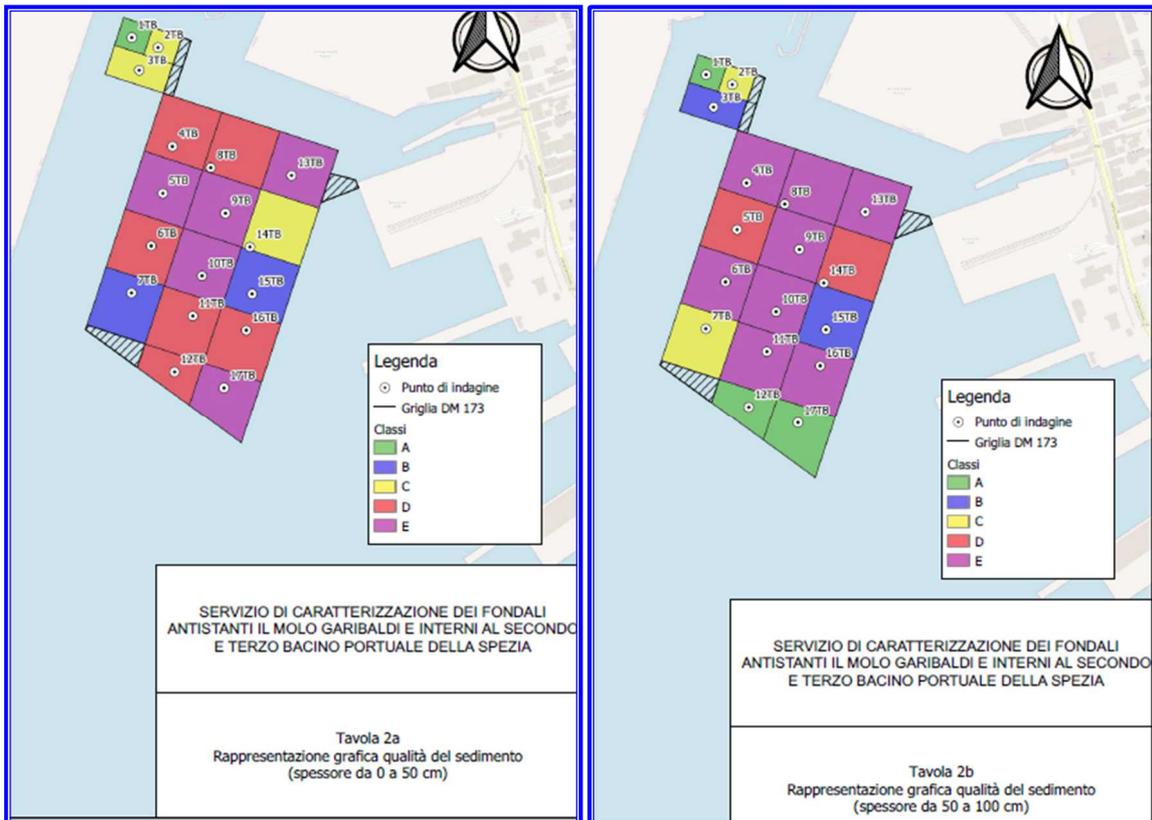


Figura 15 - Risultati della caratterizzazione 2020 per il primo metro di sedimento dal fondale.

#### 4.5. Caratterizzazioni delle acque marine antistanti la colmata

Sono stati valutati i dati di caratterizzazione **ARPAL** delle acque marine portuali dal **2003** al **2017**. In nessun campione sono stati analizzati gli **IC totali** ma sono noti i dati di concentrazione di **PCB**. Da tutto il data set sono stati valutati i risultati dell'ultimo decennio (periodo dati **2011-2017**) riportati nella **Tabella** che segue. Le concentrazioni di **PCB** nelle acque di mare indicano per tutti i campioni concentrazioni di **PCB** al di sotto del limite di rilevabilità, con limiti di rilevabilità a seconda delle campagne riportati variabili da **0,001 µg/l**, a **0,005 µg/l**, a **0,01 µg/l**, fino a **0,05 µg/l**.

Per analogia con quanto già monitorato da **ARPAL** negli anni passati si suggerisce per il **Piano di Monitoraggio Ambientale** di progetto di eseguire campionamenti nelle stazioni più prossime all'area di intervento: **PP020**, **PP030**, **PP048**.

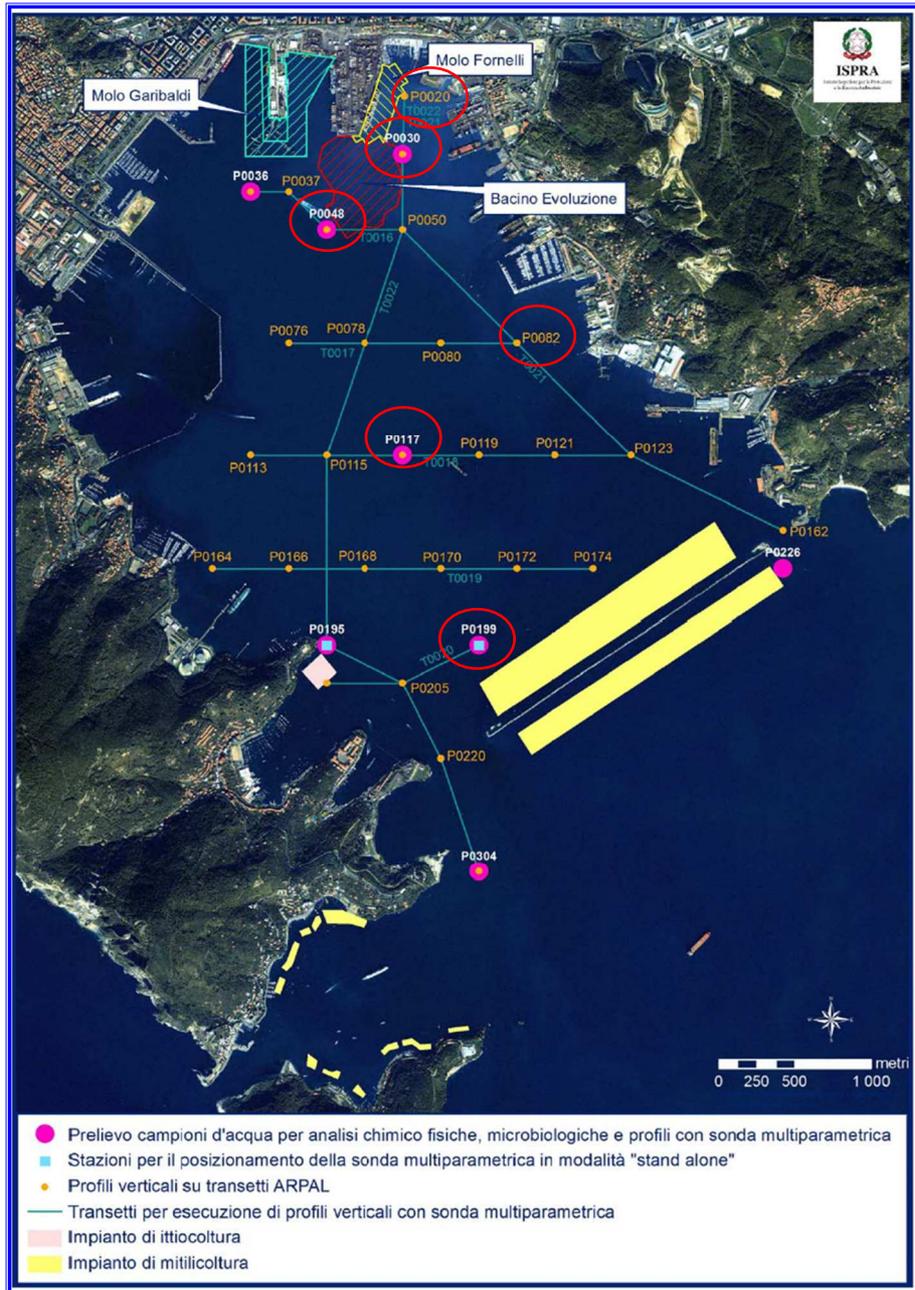


Figura 16 - Ubicazione delle stazioni di misura delle ACQUE di ARPAL. Cerchiate le stazioni ove sono stati monitorati i PCB.

Tabella 4 - Concentrazioni di PCB rilevate nelle acque di mare del Porto di La Spezia

Anno	data	LdR µg/l	STAZIONI											
			P0020		P0030		P0048		P0117		P0199		P0082	
2011	Campagna 09/03/2011	0,01			<0.01	<0.01								
	Campagna 27/07/2011	0,01			<0.01	<0.01			<0.01	<0.01	<0.01	<0.01		
	Campagna 27/09/2011	0,01			<0.01	<0.01			<0.01	<0.01	<0.01	<0.01		
	Campagna 06/12/2011	0,01			<0.01	<0.01			<0.01	<0.01	<0.01	<0.01		
2012	Campagna 13/03/2012	0,01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01			<0.01	<0.01	<0.01	<0.01		
	Campagna 19/06/2012	0,01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01			<0.01	<0.01	<0.01	<0.01		
	Campagna 03/10/2012	0,01			<0.01	<0.01			<0.01	<0.01	<0.01	<0.01		
	Campagna 20/08/2012	0,01			<0.01	<0.01			<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Campagna 14/11/2012	0,01			<0.01	<0.01			<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
2013	Campagna 16/01/2013	0,01			<0.01	<0.01			<0.01	<0.01	<0.01	<0.01		
	Campagna 05/03/2013	0,00 1			<0.00 1									
	Campagna 18/06/2013	0,00 1			<0.00 1									
	Campagna 29/10/2013	0,00 5			<0.00 5									
	Campagna 03/12/2013	0,05			<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05		
2014	Campagna 13/01/2014	0,05			<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05		
	Campagna 12/02/2014	0,05			<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05		
	Campagna 17/03/2014	0,1			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		
	Campagna 08/04/2014	0,1			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		
	Campagna 12/05/2014	0,01			<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01		
	Campagna 18/06/2014	0,1			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		
	Campagna 22/07/2014	0,1			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		
	Campagna 17/12/2014	0,05			<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05		
2015	Campagna 03/03/2015	0,05			<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05		
	Campagna 11/02/2015	0,1			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		
	Campagna 30/03/2015	0,1			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		
	Campagna 21/02/2015	0,1			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		
	Campagna 30/03/2015	0,1			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		
	Campagna 18/05/2015	0,1			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		
	Campagna 30/06/2015	0,1			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		
	Campagna 24/08/2015	0,1			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		
	Campagna 07/09/2015	0,1			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		
	Campagna 28/09/2015	0,1			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		

		<i>LdR</i>	<i>STAZIONI</i>											
<i>Anno</i>	<i>data</i>	<i>µg/l</i>	<i>P0020</i>		<i>P0030</i>		<i>P0048</i>		<i>P0117</i>		<i>P0199</i>		<i>P0082</i>	
	Campagna 12/10/2015	0,1			<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		
	Campagna 27/10/2015	0,1			<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		
	Campagna 09/11/2015	0,1			<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		
	Campagna 23/11/2015	0,1			<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		
	Campagna 16/12/2015	0,1			<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		
	Campagna 28/12/2015	0,1			<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		
2016	Campagna 19/01/2016	0,1			<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		
	Campagna 18/04/2016	0,1			<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		
	Campagna 29/08/2016	0,1			<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		
	Campagna 28/11/2016	0,1			<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		
	Campagna 13/03/2017	0,1			ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND		

## 5. **CONCENTRAZIONE RAPPRESENTATIVA DEI SEDIMENTI DEL FONDO DELLA COLMATA (CONCENTRAZIONE SORGENTE)**

La presente analisi si basa sulla valutazione delle concentrazioni dei principali contaminanti rilevanti nei sedimenti del fondo della futura colmata del **Terminal Ravano** nel **Porto della Spezia**. Alcuni dei sedimenti presentano, come visto, concentrazioni superiori a quella della destinazione d'uso della cassa di colmata (uso industriale). Per valutare l'ammissibilità al mantenimento in sito di tali sedimenti **deve quindi essere eseguita una valutazione del potenziale rischio indotto nell'ambiente circostante**.

Nell'**Analisi di Rischio di livello 1** i punti di esposizione sono ipotizzati coincidenti con le sorgenti di contaminazione, non si tiene quindi conto di fenomeni di attenuazione dovuti alla diffusione dei contaminanti nello spazio e nel tempo. L'applicazione di un **livello 2-3** di analisi di rischio tiene invece in considerazione la diffusione dei contaminanti ed è idonea al caso in caso in esame in quanto i contaminanti presenti nei sedimenti della cassa di colmata per raggiungere l'ambiente dovranno migrare verso l'esterno. L'analisi di rischio a **livello 2** richiede l'individuazione di un unico valore di **concentrazione rappresentativa** in corrispondenza ad ogni sorgente secondaria di contaminazione (suolo superficiale, suolo profondo e falda). Nel caso in esame **la sorgente di contaminazione sono i suoli del fondo della colmata** per i quali si vuole valutare il mantenimento degli stessi in sito.

Il valore della **concentrazione rappresentativa della sorgente** raffigura un input primario per l'analisi di rischio, e va determinato sulla base di criteri legati ad assunzioni che variano più o meno sensibilmente a seconda del grado di approssimazione richiesto, del numero e del tipo di rilevamenti disponibili, della loro rappresentatività. Il punto di criticità principale in questo tipo di analisi è dunque la scelta dei campioni e l'utilizzazione di algoritmi tali da arrivare a valori che risultino rappresentativi e scientificamente attendibili. Per valutare la concentrazione rappresentativa del materiale sul fondo e valutarne l'ammissibilità al mantenimento in sito, è stata applicata una analisi statistica dei dati con il **Software ProUCL v.5.1** dell'**EPA**, previsto dalle **linee Guida APAT del 2006** e **Criteri metodologici APAT 2008, All. H**, per il calcolo della concentrazione alla sorgente.

Per la valutazione del rischio sono stati considerati gli analiti che presentano concentrazioni, in alcuni campioni, di concentrazioni superiori a quelli alla destinazione d'uso industriale: **IC>12** e **PCB**. Non sono invece stati considerati gli altri analiti perché già conformi alla destinazione d'uso prevista. Come indicato nelle **linee guida APAT**, sono stati presi in considerazione tutti i dati di concentrazione disponibili per gli analiti sopra indicati; quindi, anche quelli che non superano le **CSC** per sito industriale. Come previsto dalle linee guida il **data set** è stato valutato per i seguenti aspetti:

- ✚ **omogeneità del campione: tutti i campioni appartengono ad una classe di sedimenti considerata omogenea essendo tutti appartenenti allo stesso litotipo (sedimenti fini);**
- ✚ **ampiezza del data set: il data set è composto da 57 quindi idoneo all'analisi (numero minimo di campioni richiesto =10);**

- ✚ *campionamento uniformemente distribuito: il campionamento è uniformemente distribuito in quanto a maglia 50 x 50m regolare sull'intera superficie del fondo della cassa di colmata;*
- ✚ *identificazione degli outlier e distinzione dei veri outlier dai falsi outlier come di seguito indicato. I "veri outlier" possono derivare da errori di trascrizione, di codifica dei dati o da una qualsiasi inefficienza degli strumenti del sistema di rilevazione dei dati. I "falsi outlier" sono quei valori estremi reali, che, in campo ambientale di inquinamento dei suoli, in genere corrispondono ai picchi (hot spot) locali di contaminazione. Si suppone che il data-set a disposizione sia stato già validato dagli Enti preposti; quindi, si dovrebbe escludere automaticamente la presenza di veri outlier. In ogni caso a seguire è stata fatta una verifica statistica degli andamenti di concentrazione;*
- ✚ *identificazione dei Non-Detec.: Non presenti.*

Il *Test degli outlier*, per *IC>12* e *PCB*, che presentano concentrazioni di analiti superiori a quelli della destinazione d'uso industriale, ha evidenziato:

- ✚ *per gli idrocarburi pesanti (IC>12) la presenza di 1 potenziale outlier per 1% e 5% di significatività ossia 5.598 mg/Kg;*
- ✚ *per la sommatoria di PCB la presenza di 1 potenziale outlier per 1% e 5% di significatività ossia 7.312 mg/Kg;*

Dall'analisi della distribuzione delle concentrazioni (*Figura 15*), tali due valori sono ritenuti *dei "falsi outlier"* e piuttosto riconducibili a campioni con più elevate concentrazioni di inquinante (*hot spot*). Vengono quindi cautelativamente considerati per il calcolo dei valori della sorgente considerati come *Upper Confidence Level (UCL)* tutti i valori disponibili.

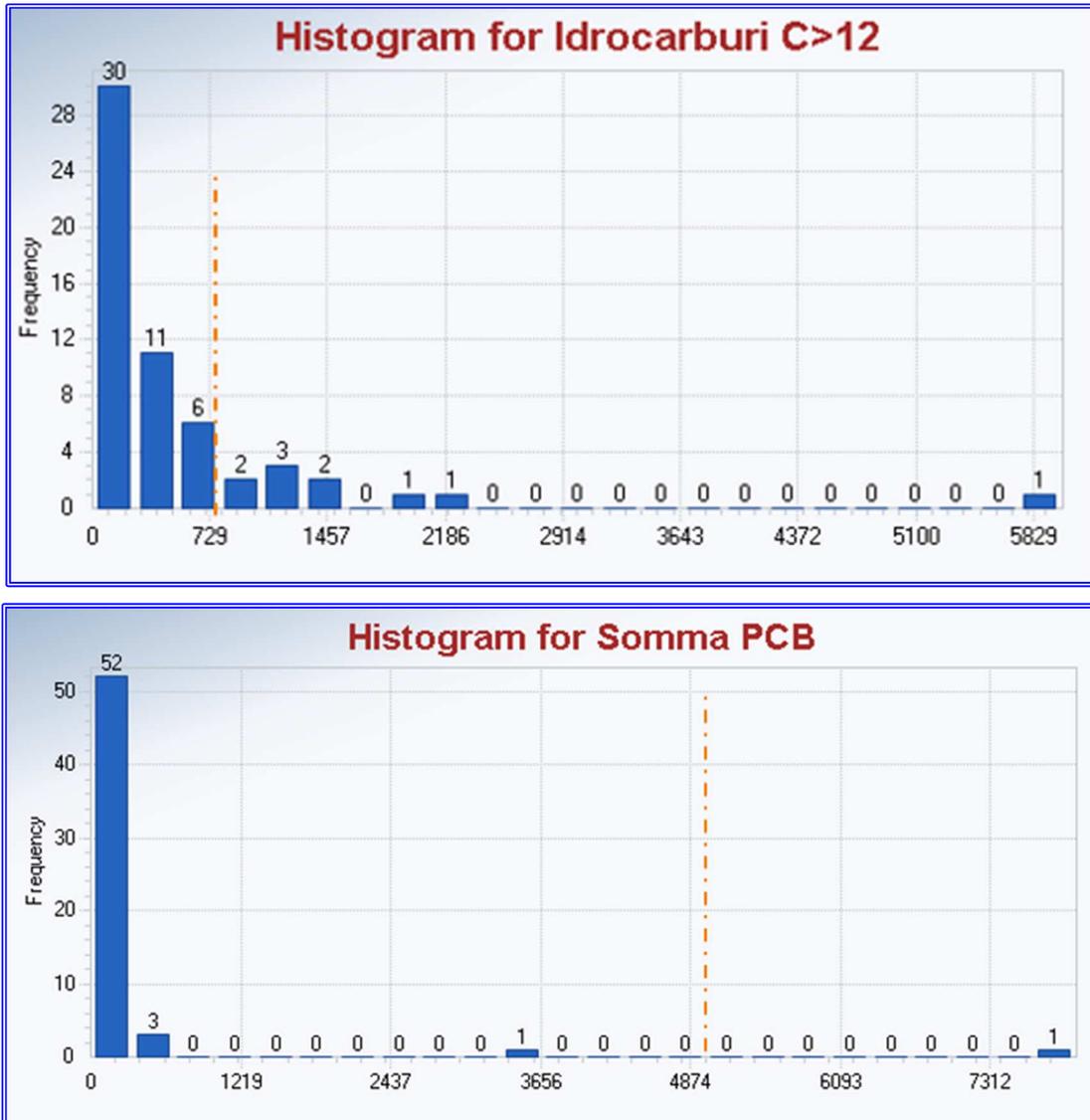


Figura 17 – Distribuzione di frequenza delle concentrazioni in mg/Kg di idrocarburi pesanti, µg/Kg di PCB (in arancione il limite ammissibile per uso industriale)

Al fine di individuare la distribuzione di probabilità che approssimi meglio l'insieme dei dati disponibili e che fornisca il valore di sorgente più rappresentativo è stato utilizzato il software **PROUCL 5.1** (in modalità "all") consentendo di comparare le diverse distribuzioni di probabilità che per i dati ambientali possono essere:

- ✚ *distribuzione gaussiana o normale*
- ✚ *distribuzione lognormale*
- ✚ *distribuzione gamma*
- ✚ *distribuzione non parametrica.*

I risultati completi dell'elaborazione statistica sono riportati in **Allegato 1**. I risultati ottenuti indicano un **UCL** al **95%**:

- ✚ per **Idrocarburi Pesanti (IC>12)** una concentrazione di **632,4 mg/Kg** (con una distribuzione gamma);
- ✚ per **sommatoria di PCB** una concentrazione di **289,7 µg/Kg** (con una distribuzione lognormale basata sulla statistica H). Tuttavia, ProUCL segnala che il calcolo è emesso solo per ragioni storiche e che la statistica H spesso risulta in valori instabili (sia alti che bassi) di UCL95, e pertanto è se possibile da evitare. I dati non seguono una distribuzione non parametrica o gamma (come risulta dall'Allegato 1) quindi per identificare l'UCL95 può essere scelto Chebyshev che per la distribuzione lognormale fornisce una concentrazione di **308,8 µg/Kg al 95%**.

**Tali concentrazioni, che a questo punto rappresentano la concentrazione sorgente del fondo della colmata verso l'ambiente esterno, sono inferiori alle Concentrazioni Soglia di Contaminazione per terreni di siti ad uso industriale. Si può quindi affermare che il mantenimento in sito di tali materiali al fine di costituire una colmata con destinazione d'uso industriale (ambiente conterminato e con capping) quasi certamente non indurrà rischi all'ambiente.** Al fine, comunque, di verificare il grado di contenimento della colmata, è stata effettuata, come di seguito riportato, una analisi del flusso in uscita dalla stessa sulla base dei gradienti idraulici presenti.

### **5.1. Stima delle concentrazioni nelle acque interstiziali della colmata**

Il **modello concettuale** adottato assume diverse condizioni cautelative, ovvero:

1. Che la concentrazione nelle acque interstiziali sia rappresentativa della massa di sedimento (considerando la stessa interamente in contatto con il sedimento contaminato),
2. Che il tempo di contatto sia sufficientemente lungo e tale da consentire l'instaurarsi di condizioni di equilibrio,
3. Che il sedimento costituisca un serbatoio inesauribile di contaminante (cioè che la concentrazione iniziale dei contaminanti non diminuisca nel tempo per azione di fenomeni naturali di degradazione chimico-fisica).

La stima delle concentrazioni nelle acque interstiziali si basa sulla teoria degli equilibri di ripartizione (**Di Toro et al 1991<sup>7</sup>, Burgess et al. 2013<sup>8</sup>**), in base alla quale nel suolo (o nel sedimento) vi è un equilibrio tra la concentrazione di una sostanza adsorbita nella frazione solida e quella disciolta nelle acque interstiziali. La stima delle concentrazioni di **idrocarburi** e **PCB** nelle **acque interstiziali** della colmata viene quindi calcolata mediante il modello dell'equilibrio di ripartizione (**EqP**).

Per i composti organici il coefficiente di partizione **Kp** può essere espresso come il prodotto fra il coefficiente di ripartizione sul carbonio organico (**Koc**) e la frazione di carbonio organico (**foc**) espressa in g di carbonio organico/g di sedimento secco:

---

<sup>7</sup> Di Toro D., Zarba C., Hansen D.J., Berry W.J., Swartz R. Pavlou S., Cowan C., Allen H, Thomas N., Paquin P. (1991) *Technical basis for establishing sediment Quality criteria for nonionic organic Chemicals using equilibrium partitioning*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 10, pp. 1541-1583, 1991

<sup>8</sup> Burgess, R.M., Berry W, Mount, R., Di Toro D. (2013) *Mechanistic sediment quality guidelines based on contaminant bioavailability: equilibrium partitioning sediment benchmarks*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 32, No. 1, pp. 102–114, 2013

$$K_p = K_{oc} * f_{oc}$$

Il *K<sub>oc</sub>* [ml/g] riflette la tendenza di un inquinante di ripartirsi fra il carbonio organico presente nel *suolo/sedimento* e l'*acqua* ed è *il rapporto tra la concentrazione del contaminante adsorbito al carbonio organico del suolo [mg/g(carbonio organico)] e la concentrazione del contaminante presente in fase liquida [mg/ml]*. Pertanto, più piccolo è il *K<sub>oc</sub>* maggiore è la tendenza dell'inquinante a trasferirsi in soluzione.

Questo metodo è applicabile solo quando *f<sub>oc</sub>* è maggiore dello **0,2 %** (EPA 1993<sup>9</sup>). In caso contrario, infatti altri parametri (dimensione delle particelle, adsorbimento sulle frazioni minerali non organiche) diventano importanti. Nel caso in esame il valor medio di *TOC* dei sedimenti è **1,83%** quindi *il metodo è applicabile*.

Per la valutazione del *K<sub>oc</sub>* per gli *idrocarburi* e *PCB* viene utilizzata la banca dati creata *ISS-INAIL* nel **2018** per la predisposizione dell'*Analisi di Rischio* prevista dal *D.Lgs. 152/06 (Tabella 5)*. Sebbene i *K<sub>oc</sub>* proposti nel database *ISS-INAIL* derivino da un valore calcolato da una estesa banca dati mondiale ottenuta da analisi di sedimenti di varia natura<sup>10 11</sup>, i valori di *K<sub>oc</sub>* vengono utilizzati principalmente per l'analisi di rischio con applicazione in acque di falda.

Il progetto in esame riguarda ovviamente sedimenti marini. *PCB* e *Idrocarburi* sono *composti organici (non ionici)* i quali è noto subiscono il fenomeno del *salting-out* ovvero all'aumentare della concentrazione degli ioni nelle acque (*acque di mare*) diminuisce la solubilità in acqua<sup>12</sup>. Pertanto, utilizzare i valori di *K<sub>oc</sub>* normalmente utilizzati per le acque di falda, *equivale, per i sedimenti marini, a massimizzare la solubilità degli stessi nelle acque interstiziali* (si stima di un fattore **1,36 medio**<sup>13</sup>).

<sup>9</sup> U.S. Environmental Protection Agency (1993) – *Technical basis for deriving sediment quality criteria for non ionic organic contaminant for the protection of benthic organism by using equilibrium partitioning*, EPA-822-R-93-011, Washington D.C.

<sup>10</sup> <https://semspub.epa.gov/work/HQ/175223.pdf>

<sup>11</sup> <https://semspub.epa.gov/work/HQ/175235.pdf>

<sup>12</sup> *Evaluating the Salting-Out Effect on the Organic Carbon/Water Partition Ratios (K<sub>OC</sub> and K<sub>DOC</sub>) of Linear and Cyclic Volatile Methylsiloxanes: Measurements and Polyparameter Linear Free Energy Relationships*. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jced.6b00196>.

<sup>13</sup> *A Review of the Effect of Salts on the Solubility of Organic Compounds in Seawater, Marine Environmental Research*, Vol. 44, NO. 4, pp. 429-444 1997.

Tabella 5 –  $K_{oc}$ ,  $\log K_{ow}$  e coeff. di diffusione in acqua per  $IC>12$  e PCB presentati nella banca dati ISS-INAIL del 2018. In verde chiaro vengono indicate per ciascuna classe idrocarburica le frazioni più conservative. Fra queste, con bordo rosso, viene indicato il valore più cautelativo scelto per il calcolo. Anche per i PCB con bordo rosso è indicato il valore preso a riferimento.

Specie Chimica	$K_{oc}$ o $K_d$ [ml/g]	$\log K_{ow}$ [adim.]	Coeff. Diff. Acqua [cm <sup>2</sup> /sec]
<b>Idrocarburi (Classificazione TPHCWG)</b>			
Alifatici C >12-16	5,01E+05	7,31	4,61E-06
Alifatici >C16-21	3,98E+08	9,85	3,85E-06
Alifatici >C21-C35	3,98E+08	9,85	3,85E-06
Aromatici C >12-16	6,31E+03	4,87	7,41E-06
Aromatici C >16-21	1,58E+04	5,83	6,54E-06
Aromatici C >21-35	1,26E+05	6,77	5,07E-06
<b>Idrocarburi (Classificazione MADEP)</b>			
Alifatici C13-C18	6,80E+05		5,00E-06
Alifatici C19-C36	3,98E+08		3,85E-06
Aromatici C11-C12	5,00E+03		1,00E-05
Aromatici C13-C22	5,00E+03		1,00E-05
<b>PCB</b>			
PCB Tot.	7,81E+04	7,20E+00	5,04E-06

Le analisi di caratterizzazione disponibili forniscono **valori di  $IC>12$** . Nella banca dati vengono riportate per le classi **Idrocarburi  $C>12$**  i valori delle proprietà chimico fisiche e tossicologiche corrispondenti a due possibili sistemi di classificazione, **[TPHCWG, 1997]** e **[MADEP, 2002]** (Tabella 1). Gli idrocarburi pesanti comprendono un insieme di molecole differenti sia alifatiche a catena più o meno lunga che aromatiche e quindi non essendo note tutte le frazioni presenti, è stato adottato **cautelativamente** la categoria di molecole a maggiore solubilità teorica (**Documento di supporto alla Banca dati ISS-INAIL, Marzo 2018, pag. 18<sup>14</sup>**). Fra i due possibili sistemi di classificazione si è scelto dalla **1**, **anche in questo caso cautelativamente**, quello che porta ad una solubilità maggiore ( **$K_{oc}$  minore**): gli  **$IC>12$**  vengono considerati con la classificazione **MADEP** tutti nella classe degli aromatici **C13-22** con  **$K_{oc} = 5,00E+03$** . Di conseguenza nella trattazione che segue si considera il caso estremamente cautelativo per:

14

ISS (2018) Banca dati ISS-INAIL, Documento di Supporto, Marzo 2018.

- ✚ considerare tutto assimilabile alla classe idrocarburica a maggiore diffusione;
- ✚ considerare il sistema di classificazione più conservativo.

$$K_{oc} [ml/g] = 5,00E+3$$

e

$$K_p [ml/g] = 5E+3 \times 0,0183 = 91,50 [ml/g \text{ o } L/Kg]$$

Ponendo una concentrazione nel solido **IC>12 (concentrazione sorgente) = 632,4 mg/Kg**, si ottiene (**conc/Kp**):

$$632,4/91,50 = 6,9 \text{ mg/L } \underline{\text{nelle acque interstiziali all'interno della colmata}}$$

Nel caso dei **Policlorobifenili**, si ottengono analogamente i seguenti risultati:

$$K_{oc} [ml/g] = 7,81E+4$$

e

$$K_p [ml/g] = 7,81E+4 \times 0,0183 = 1,43E+3 [ml/g \text{ o } L/Kg]$$

Ponendo una concentrazione nel solido **PCB (concentrazione sorgente) = 308 µg/Kg**, si ottiene (**conc/Kp**):

$$308/1,43E+3 = 2,16E-4 \text{ mg/L } \underline{\text{nelle acque interstiziali all'interno della colmata}}$$

Queste sono quindi le concentrazioni nelle acque interstiziali del sedimento della colmata che possono diffondere nelle acque soprastanti e, mescolandosi alle stesse, contribuiscono a definire la concentrazione finale in tali acque.

E' difficile valutare la concentrazione delle acque soprastanti a partire dalle concentrazioni nelle acque interstiziali in quanto il valore finale dipende da molti fattori: le concentrazioni delle acque soprastanti, le correnti locali, i fenomeni redox che avvengono all'interfaccia acqua/sedimento e che ostacolano i flussi diffusivi, i fenomeni di adesione degli inquinanti alle particelle organiche presenti all'interfaccia che spesso si accumulano sul fondo, processi diagenetici, bioturbazione e rimescolamento del sedimento. Il complesso dei fenomeni sopraindicati fa sì che le acque interstiziali e le acque soprastanti non siano in equilibrio e che le concentrazioni di inquinanti nelle

acque interstiziali siano **1-3 ordini di grandezza** superiori a quelle delle acque soprastanti<sup>15 16 17 18</sup>.

Inoltre, qualora venga refluito sopra i sedimenti uno strato di materiale inerte che funga da **capping** (come, ad esempio, nel caso dello stato di progetto in cui è previsto ricoprimento con materiali inerti da cava o sedimenti idonei), è stato valutato per **PCB** e **IPA** che basterebbe uno strato di **10 cm** per ridurre del **99%** il flusso diffusivo, creando uno strato di stagnazione. Considerando le concentrazioni di **PCB** calcolate nelle acque interstiziali e considerando i fenomeni sopra indicati, che portano ad una riduzione delle concentrazioni dei contaminanti da **1** a **3** ordini di grandezza nelle acque interstiziali, **risulta quindi comprensibile capire il perché nelle acque attuali i PCB risultano sempre al di sotto del limite di rilevabilità.**

Per **Idrocarburi** e **PCB** non esiste un riferimento normativo che imponga dei limiti per le acque di mare. Si è quindi fatto riferimento a quanto indicato dalla **Regione Liguria** in occasione della valutazione del potenziale rilascio di contaminanti dalla colmata del **Rio Molinassi** a **Genova**, in cui si indicavano come possibili limiti di riferimento le concentrazioni medie annue (**SQA-MA**) individuate per le sostanze di priorità (**Tabella 1/A** e **1/B** dell'**Allegato 1** alla **Parte Terza** del **D.Lgs. 152/06**) e i limiti per le acque sotterranee (**Tabella 2** dell'**Allegato 5** alla **Parte Quarta, Titolo V**, del **D.Lgs. 152/06**). In tutti i casi, come prescritto dalla **Regione Liguria**, si considera **la metà della concentrazione tabulata**, ovvero: per gli **IC>12**, **175 µg/l** espresso come **Idrocarburi totali**, e per i **PCB**, **0,005 µg/l**.

Si osserva che il limite per i **PCB** è pure nel range dei limiti di rilevabilità delle tecniche analitiche indicate da **ARPAL** dal **2003** al **2017**, **quindi di difficile rilevazione**. I risultati del monitoraggio **ARPAL** indicano infatti, come già indicato, per tutti i campioni concentrazioni di **PCB** al di sotto del limite di rilevabilità, con limiti di rilevabilità a seconda delle campagne variabili da **0,001 µg/l**, a **0,005 µg/l**, a **0,01 µg/l**, fino a **0,05 µg/l**.

Sulla base di questi risultati si potrebbe concludere lo studio di potenziale rischio indotto dai sedimenti del fondo della colmata per le acque soprastanti. Si sottolinea che nell'analisi finora condotta non sono presenti le palancole che ancor più limitano la diffusione verso l'ambiente esterno, ed uno strato di **capping** con materiali non contaminati (siano essi inerti da cava o sedimenti idonei) che come sopra indicato diminuiscono fortemente la diffusione verso la colonna d'acqua soprastante. Ciò nonostante, si procede con l'analisi del modello per definire le forzanti in gioco e i potenziali effetti della colmata anche sulla falda in ingresso da monte.

<sup>15</sup> *Fluxes of trace elements and nutrients from porewater to overlying water in the La Spezia harbour (Ligurian Sea). Environmental Contamination, Barcellona, 1990, 561-563*

<sup>16</sup> *Eek, E.; Cornelissen, G.; Kibsgaard, A.; Breedveld, G. D. Diffusion of PAH and PCB from contaminated sediments with and without mineral capping; measurement and modelling. Chemosphere 2008, 71 (9), 1629-1638.*

<sup>17</sup> *Granberg, M. E.; Gunnarsson, J. S.; Hedman, J. E.; Rosenberg, R.; Jonsson, P. Bioturbation-driven release of organic contaminants from Baltic sea sediments mediated by the invading polychaete Marenzelleria neglecta. Environ. Sci. Technol. 2008, 42 (4), 1058-1065.*

<sup>18</sup> *Booij, K.; Hoedemaker, J. R.; Bakker, J. F. Dissolved PCBs, PAHs, and HCB in pore waters and overlying waters of contaminated harbor sediments. Environ. Sci. Technol. 2003, 37 (18), 4213-4220*

## 6. **METODOLOGIA SEGUITA PER LA PREDISPOSIZIONE DEL MODELLO NUMERICO DI FLUSSO E DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI**

La metodologia seguita per la predisposizione del modello numerico di flusso ha previsto le seguenti fasi di lavoro individuate e illustrate nei capitoli seguenti:

1. *Fase 1. Definizione degli obiettivi (Capitolo 6)*
2. *Fase 2. Analisi dei dati disponibili (Capitolo 4)*
3. *Fase 3. Elaborazione del modello concettuale di riferimento (Capitolo 7)*
4. *Fase 4. Implementazione del modello numerico di flusso (Capitolo 8)*

Stanti le informazioni disponibili di carattere puntuale, sia in termini spaziali che temporali, l'obiettivo generale che ci si pone è quello di ricostruire, avvalendosi della modellazione numerica, uno schema sufficientemente rappresentativo della falda locale. Verranno dunque studiate due configurazioni, corrispondenti rispettivamente allo *Stato di Fatto (SDF)* e allo *Stato di Progetto (SDP)*. Il modello dello *Stato di Fatto*, opportunamente tarato, permetterà di ottenere una condizione di riferimento rispetto a cui sarà possibile determinare gli effetti delle opere previste da progetto. Nello specifico, per ciascuna configurazione, gli obiettivi sono i seguenti

### ➤ *Stato di Fatto (SDF)*

- ⚡ *Schematizzazione del comportamento medio della falda*
- ⚡ *Rappresentazione della direzione prevalente del moto in condizioni stazionarie*
- ⚡ *Ottenere una condizione di riferimento rispetto a cui determinare gli effetti delle opere di progetto*

### ➤ *Stato di Progetto (SDP)*

- ⚡ *determinare le eventuali variazioni in termini di carichi piezometrici e direzioni di flusso indotte dalla presenza della colmata e delle nuove palancole;*
- ⚡ *definire la portata in uscita dalle nuove palancole;*
- ⚡ *studiare l'effetto della diversa permeabilità del materiale di riempimento della colmata in termini di piezometria e flussi in uscita;*
- ⚡ *studiare l'effetto di un eventuale dreno a monte della colmata;*
- ⚡ *studiare in termini qualitativi l'effetto dell'intervento nel contenimento dell'intrusione salina;*
- ⚡

## 7. MODELLO CONCETTUALE DI RIFERIMENTO

Per *modello concettuale di riferimento* si intende lo *schema interpretativo delle caratteristiche significative e dei principali processi attivi nell'acquifero in esame in relazione all'obiettivo dello studio che sintetizza in modo coerente i dati osservati*<sup>19</sup>. Sulla base delle informazioni disponibili, dal punto di vista qualitativo si può concludere che *la direzione della falda è principalmente da nord a sud*, a meno di deviazioni locali dovuto alla presenza di canali drenanti (nella zona a nord, più lontana dal porto) o pozzi di emungimento. In corrispondenza del porto i canali non sembrano drenanti la falda, essendo questi impermeabilizzati sia sul fondo che lateralmente tramite muri di sponda o palancole. Qualitativamente si nota inoltre che nella zona centrale dell'area di interesse si verifica una forte perdita di carico, rappresentata dalla breve distanza tra una isofreatica e l'altra, sinonimo di una bassa permeabilità, ovvero di un mezzo poroso che rallenta molto il fluire della falda. Al contrario, nella zona di valle in corrispondenza del porto, le isofreatiche si distanziano tra loro, sinonimo di una minor perdita di carico e quindi di una maggior permeabilità.

Dal punto di vista quantitativo invece:

- ✚ *Nella zona più a monte (sito ex Sio) la falda è a circa 2.7-2.8 m slm*
- ✚ *Nella zona più a valle (piezometro al porto) la falda è a circa 0.1-0.2 m slm*

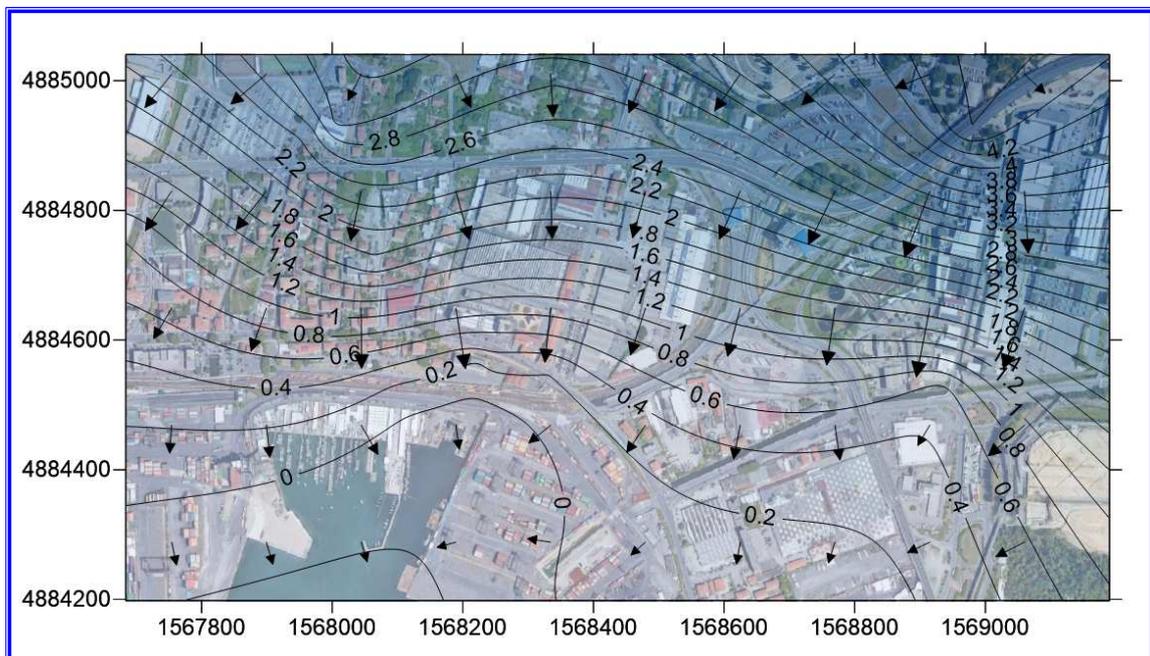


Figura 18 – Andamento delle linee isofreatiche ottenuto dalla interpolazione tramite Kriging

<sup>19</sup> Sviluppo e valutazione di modelli di flusso in acquiferi porosi, ISPRA, 2021.

## 8. MODELLO MATEMATICO DI FLUSSO

Il **modello numerico** traspone in termini quantitativi il modello concettuale utilizzando tutti i dati a disposizione (compresi quelli descrittivi) e mettendoli tra loro in relazione mediante, in questo caso, l'utilizzo del software di calcolo, sviluppato dalla **WASY GmbH**. Si tratta di un modello matematico tridimensionale agli elementi finiti in grado di modellare sia il flusso sotterraneo, in termini di carico piezometrico, pressione e direzioni di flusso, sia il trasporto di massa di specie chimiche reattive e no.

Le simulazioni sono state condotte in **regime saturo**. Il flusso sotterraneo, in condizioni di completa saturazione, è descritto dalla legge di **Darcy**:

$$v_e = -\frac{Ki}{n_e}$$

dove  $v$  è la velocità apparente,  $n_e$  è la porosità efficace ed  $i = - (dh/dL)$  è il gradiente idraulico. Il segno negativo presente nell'equazione ha significato fisico in quanto la direzione del moto dell'acqua sotterranea è diretto verso carichi piezometrici decrescenti.

Si sono costruiti due modelli differenti: uno per lo **Stato di Fatto (SDF)**, calibrato in modo da rappresentare le direzioni di flusso e i carichi piezometrici attuali, e uno per lo **Stato di Progetto (SDP)** con la presenza della colmata. Lo stato di fatto ha visto la modellazione anche di parte dell'attuale fondale marino, su cui in fase di progetto verrà realizzata la colmata.

### 8.1. Stato di fatto

La modellazione dello **Stato di Fatto (SDF)** permette di ottenere una **condizione di riferimento schematica** rispetto a cui sarà possibile determinare gli effetti delle opere previste da progetto. Di seguito si riportano i principali risultati della modellazione.

#### 8.1.1. Il dominio di calcolo e il modello 3D

Il dominio di calcolo è stato definito considerando gli obiettivi, i dati disponibili e le caratteristiche del territorio circostante all'area di intervento. Nel caso in esame l'unico limite fisico presente è rappresentato dal mare, che è stato quindi scelto come confine sud del modello; il confine ovest passa in mezzo ai due canali esistenti in modo da comprendere il **Torrente Vecchia Dorgia** con sbocco a mare (lato area di intervento), i confini nord ed est sono invece definiti arbitrariamente in modo da coinvolgere un'area rappresentativa in termini di flusso ma non troppo ampia da determinare un eccessivo costo computazionale. Il dominio di calcolo viene quindi definito come in figura seguente.



Figura 19 – Dominio per le simulazioni dello stato di fatto

La *mesh* di calcolo è composta da **11.000 nodi**, **23.000 elementi triangolari**, raffittiti in corrispondenza dei canali, della galleria subalvea e dell'area di intervento.

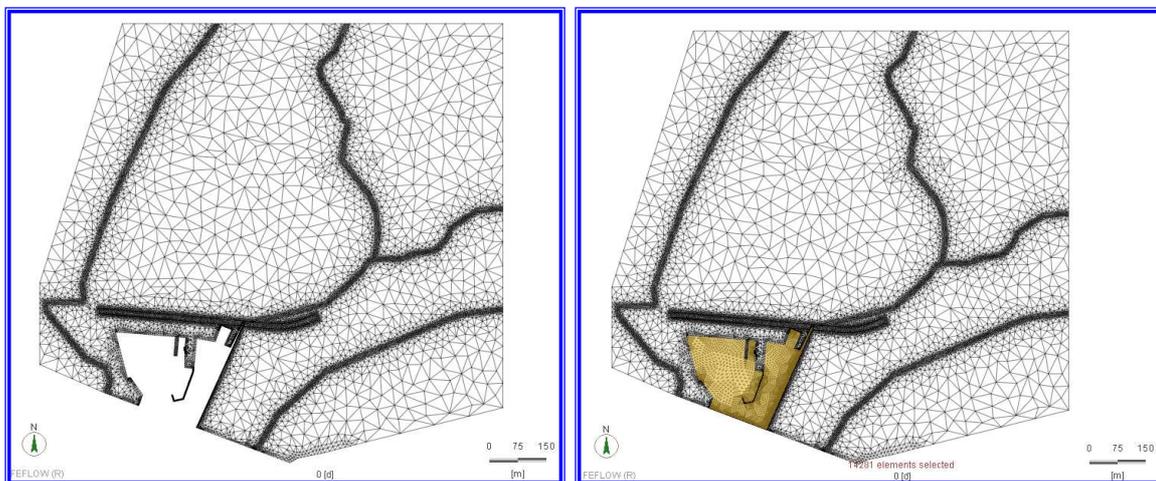


Figura 20 – Mesh di calcolo: a sinistra lo strato più superficiale, a destra gli strati profondi con evidenza del fondale marino in corrispondenza della futura colmata

Il *modello 3D* è costituito da **8 slice principali**: *slice 1* coincidente con il *PC*, *slice 2* a quota **0 m slm**, *slice 3* coincidente con la sommità dell'*unità A*, *slice 4* coincidente con la sommità dell'*unità B*, *slice 5* coincidente con la sommità dell'*unità C*, *slice 6* a quota **-28.80 m slm** (quota di posa delle palancole), *slice 7* coincidente con la sommità dell'*unità D*, *slice 8* a quota **-60 m slm**. Tra le slice principali sono state inserite delle *slice intermedie* ad una distanza di **2-5 m** a seconda della distanza tra una slice principale e l'altra.

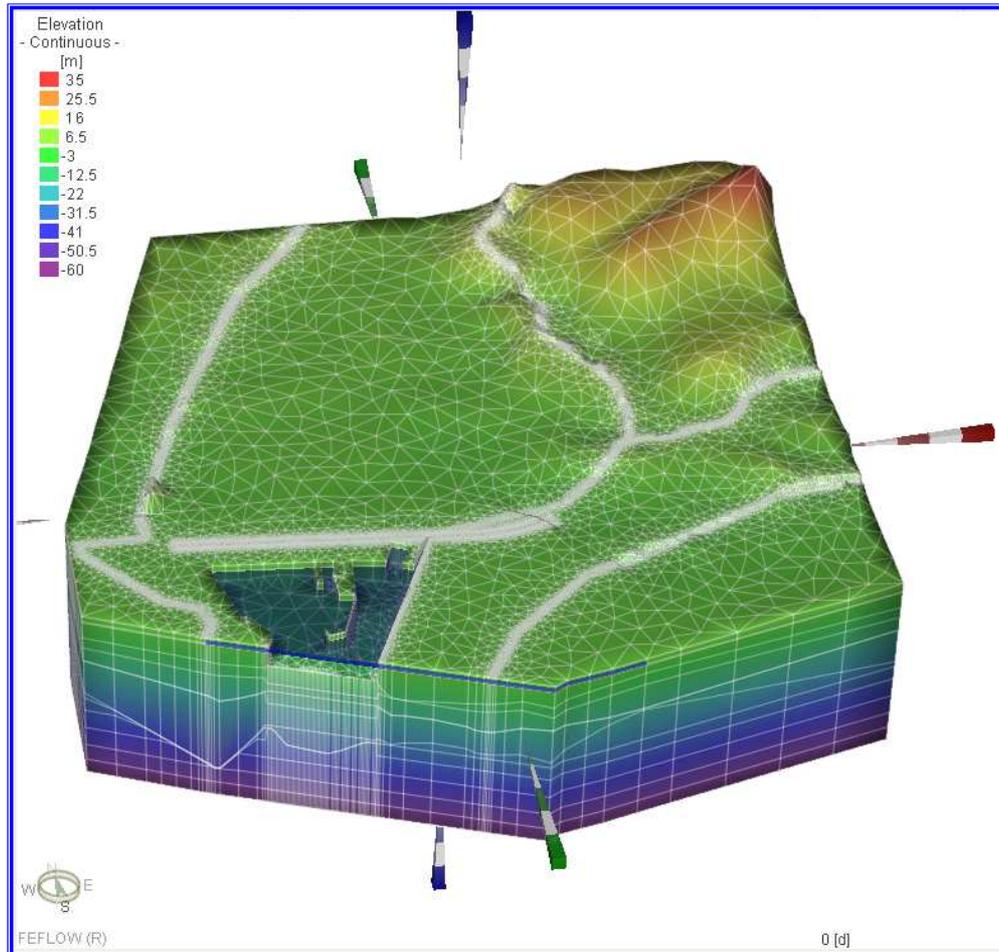


Figura 21 – Modello tridimensionale con evidenza della superficie del mare in corrispondenza del porto

### 8.1.2. Stratigrafia di riferimento

A partire quindi dai sondaggi riportati in Tabella 1, nella zona del porto nel modello è stata ricostruita la stratigrafia utilizzando una interpolazione lineare. Nelle zone a monte invece, più lontane dall’area di intervento e di cui non si disponevano informazioni di dettaglio, si è considerato un unico strato omogeneo.

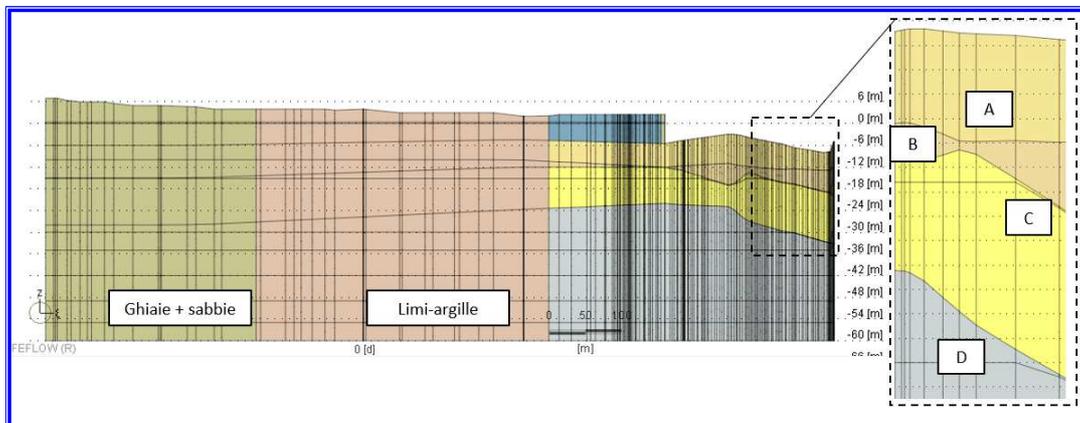


Figura 22 –Stratigrafia di riferimento per lo SDF

### 8.1.3. Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono state mantenute costanti nel tempo (regime stazionario): non si è quindi tenuto in conto delle oscillazioni del mare in quanto la loro entità risulta essere modesta e quindi trascurabile ( $\pm 10\text{cm}$ ). Inoltre, la scala temporale del fenomeno di oscillazione delle onde del mare è molto inferiore rispetto alla scala temporale del moto di filtrazione, rendendo i due fenomeni praticamente indipendenti l'uno dall'altro e per tale ragione si è scelto di mantenere la condizione di valle stazionaria. Le condizioni imposte sono quindi:

- **Condizione di monte** (in corrispondenza del *limite nord* del modello): si impone una condizione di carico costante (carico idrostatico) ricostruito a partire dalle piezometriche misurate nei piezometri posti più a monte. Si è quindi imposto un valore di  $h=3.4\text{ m slm}$ .
- **Condizione di valle** (in corrispondenza del *limite sud* del modello). Come suggerito dalla *Regione* durante la riunione con gli *Enti*, la condizione di valle è stata imposta considerando la diversa densità dell'acqua di mare rispetto a quella della falda.

Nella modellazione di problemi dipendenti dalla densità, come l'*intrusione di acqua salata*, la condizione al contorno (carico piezometrico) deve essere correlata alla densità del fluido effettiva dell'acqua salata  $\rho_s$ . Facendo riferimento al problema dell'intrusione di acqua salata schematizzato nella *Figura 23*, lo scopo è trovare una corrispondente condizione di carico idraulico da imporre sul lato mare del dominio del modello, dal momento che la variabile richiesta per le equazioni di flusso sotterraneo in *Flow* è il *carico idraulico*  $h^{20}$ .

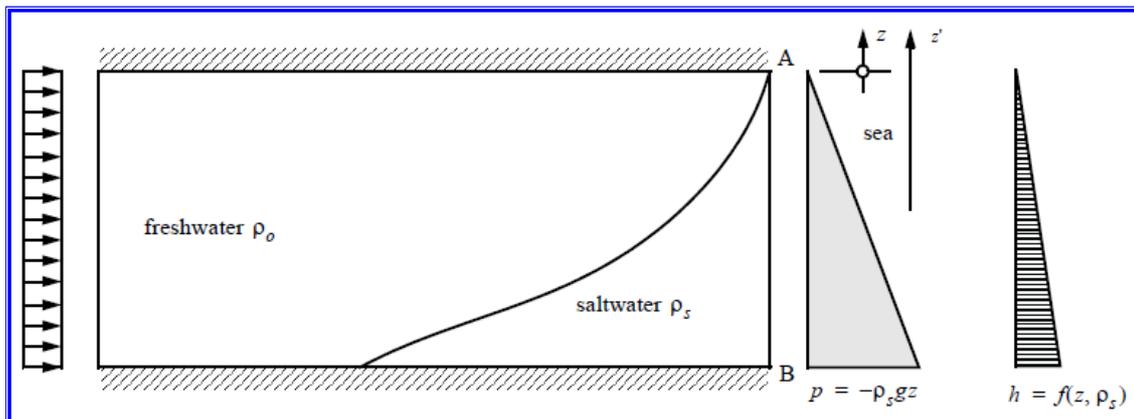


Figura 23 – Schema intrusione salina

Risulta quindi necessario tener conto della definizione specifica di potenziale:

$$h = z + \frac{p}{\rho_0 g}$$

<sup>20</sup> *About the formulation of hydraulic head boundary potential conditions for fluid density-dependent groundwater problems, H.-J. G. Diersch, WASY Institute for Water Resources Planning and Systems Research, Berlin, Germany, FeFlow White Papers Vol.1*

dove  $g$  accelerazione di gravità,  $\rho_0$  densità del fluido di riferimento. Nei problemi di intrusione salina la densità di riferimento è quella dell'acqua dolce. Il carico misurato in un piezometro, infatti, si riferisce al fluido presente nel piezometro stesso e quindi il potenziale misurato sarà relativo al fluido di salinità nota  $C$ :

$$h_s = z + \frac{p}{\rho_s g}$$

Con  $\rho_s$  funzione della salinità  $C$ . Moltiplicando e dividendo il primo termine dell'equazione precedente per  $\rho_0$  si ottiene:

$$h_s = z + \frac{p}{\rho_s g} = h_s = z + \frac{p}{\rho_0 g} \frac{\rho_0}{\rho_s}$$

Attraverso vari passaggi si arriva a riscrivere il carico piezometrico relativo al fluido di salinità  $C$  nella seguente forma più semplice:

$$h_s = -\alpha z \quad (1)$$

con

$$\alpha = \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0}$$

Considerando  $\rho_s = 1.029 \text{ kg/l}$  e  $\rho_0 = 1 \text{ kg/l}$ , si ottiene  $\alpha = 0.029$ .

In sintesi, si cerca di convertire il carico piezometrico dell'acqua marina in termini di acqua dolce equivalente. Ne deriva quindi che la condizione al contorno imposta al lato mare è:

- ✚ per  $z=0 \text{ m slm}$ ,  $h = 0 \text{ m slm}$
- ✚ per  $z=-60 \text{ m slm}$  (fondo del dominio lungo la verticale),  $h = 1.74 \text{ m slm}$
- ✚ i punti intermedi sono stati interpolati linearmente secondo la relazione (1)

Le condizioni imposte sono cautelative in quanto si ipotizza che tutto ciò che proviene da monte scarichi in mare; in realtà i due bordi sud (lateralmente ai pallini blu delle figure sottostanti) non sarebbero impermeabili, ma permetterebbero alla falda di proseguire il suo percorso verso sud.

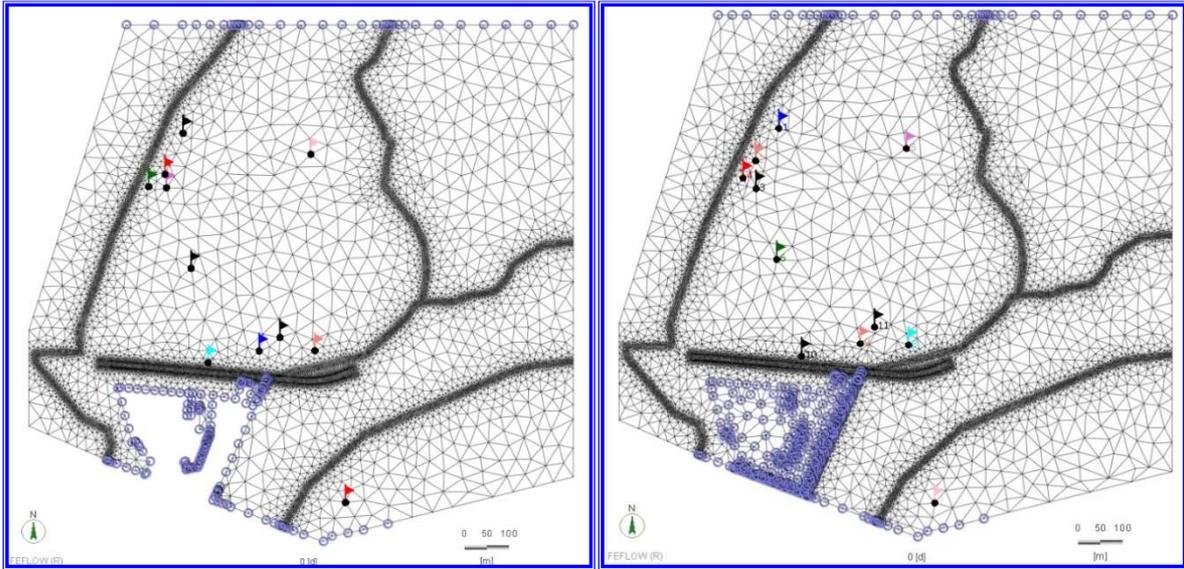


Figura 24 – Condizioni al contorno imposte: a sinistra lo strato più superficiale, a destra lo strato corrispondente al fondale marino

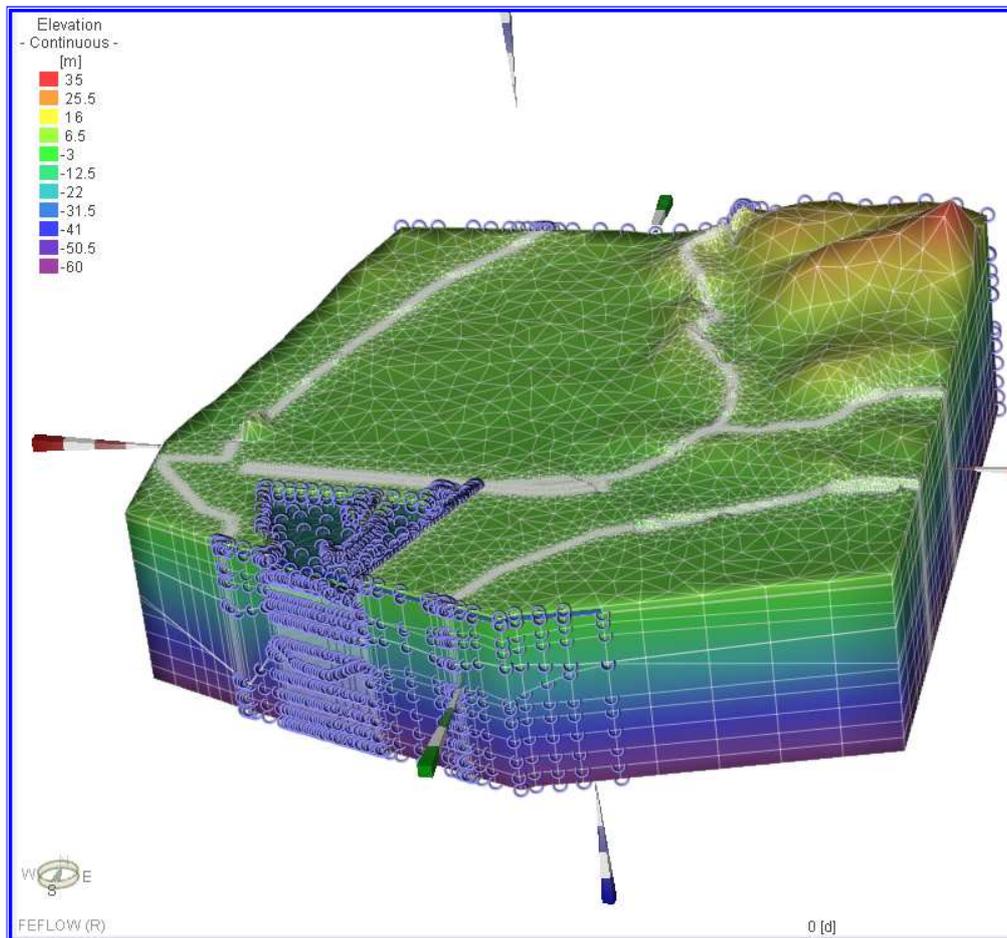


Figura 25 – Condizioni al contorno imposte: modello 3D

#### 8.1.4. Permeabilità utilizzate

Nella zona del porto, in corrispondenza dei sondaggi realizzati nell'ambito del **PFTE**, sono state definite le permeabilità verticali delle unità stratigrafiche principali: tali valori si assumono quindi come noti e fissi. Si assume inoltre che la permeabilità verticale misurata sia anche pari a quella orizzontale (mezzo isotropo). Si assume invece come incognita, e quindi come parametro di calibrazione, la permeabilità della zona intermedia del dominio, la quale influenza l'andamento qualitativo delle linee di carico subito a monte della zona del porto e determina la forte perdita di carico visibile nella ricostruzione delle isofreatiche. Alle palancole esistenti è stata associata una permeabilità di **1E-7 m/s**, ovvero due ordini di grandezza inferiori rispetto a quella tipica di palancole di nuova realizzazione. L'implementazione è stata fatta per evitare, in fase di progetto, di andare a sottostimare l'innalzamento di falda determinato dalla futura colmata. Si riassumono quindi nella tabella seguente le permeabilità utilizzate con evidenza del parametro di calibrazione.

Tabella 6

<i>Unità litostratigrafiche</i>	<i>K verticale e K orizzontale (m/s)</i>
<i>DA – R</i>	<i>1.00E-05</i>
<i>DF – A</i>	<i>2.30E-09</i>
<i>DAMC -B</i>	<i>3.40E-09</i>
<i>DAC – C</i>	<i>9.80E-10</i>
<i>DAS – D</i>	<i>1.00E-06</i>
<i>Ghiaie limose (zona nord del dominio)</i>	<i>1.00E-07</i>
<i>Palancole esistenti</i>	<i>1.00E-07</i>
<i>Zona intermedia del dominio</i>	<i>Parametro di calibrazione</i>

#### 8.1.5. Calibrazione

La fase di calibrazione del modello vede la ricerca, mediante opportune metodologie, dei valori ottimali dei parametri e/o delle variabili di input tali che la condizione di flusso modellata sia il più vicina possibile alla condizione di flusso osservata. Il parametro oggetto di calibrazione è il valore di permeabilità della zona intermedia del dominio.

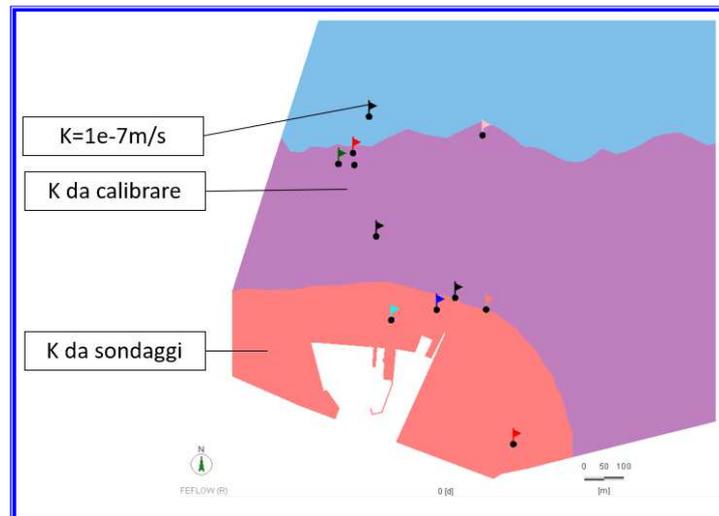


Figura 26– A sinistra ricostruzione della permeabilità nel modello

Seguendo una metodologia di tipo “*trial and error*” (Hill, 1998; Hill et al. 2000) la fase di *calibrazione* può essere così schematizzata:

1. *Scelta dei dati osservati da utilizzare come target: in questo caso sono stati scelti i valori di carico piezometrico nei punti di monitoraggio noti e le direzioni di flusso ;*
2. *Scelta di parametri rispetto al quale effettuare la calibrazione: in questo caso è stato scelto la permeabilità dello strato intermedio;*
3. *Assegnazione dei valori numerici dei parametri non soggetti a calibrazione, ovvero le condizioni al contorno (Par. 8.1.3);*
4. *Assegnazione dei valori numerici del parametro soggetto a calibrazione;*
5. *Confronto tra altezze piezometriche osservate e altezze piezometriche simulate;*
6. *Valutazione della bontà della calibrazione;*
7. *Se la calibrazione ottenuta è considerata non soddisfacente occorre effettuare una nuova calibrazione partendo dal passo 4.*

Gli strumenti, grafici e statistici, più adatti per considerare il modello soddisfacente sono stati i seguenti:

- ✚ *grafico di dispersione “valori osservati vs. valori simulati”. Una buona calibrazione si ha se i punti si dispongono approssimativamente lungo la retta con pendenza di 45° che identifica l’uguaglianza tra valori osservati e simulati;*
- ✚ *l’errore medio assoluto (inteso come la differenza tra valore misurato e calcolato) è vicino allo 0;*
- ✚ *il coefficiente di correlazione è circa pari a 1,*
- ✚ *le direzioni di flusso osservate sono riprodotte correttamente.*

### 8.1.6. Risultati

Un valore di  $K = 1E-8 \text{ m/s}$  per lo *strato intermedio* del dominio permette una buona rappresentazione sia del comportamento qualitativo in termini di direzioni di flusso che in termini di carico piezometrico. Nelle figure sottostanti si riportano le linee di carico e i vettori velocità ottenuti. Si nota in particolare come il modello rappresenti:

- ✚ *Il valore di carico medio registrato al porto di 0.2m slm*
- ✚ *La perdita di carico in corrispondenza della zona centrale del dominio pari a circa 3 m*
- ✚ *La direzione di flusso principale da nord a sud*

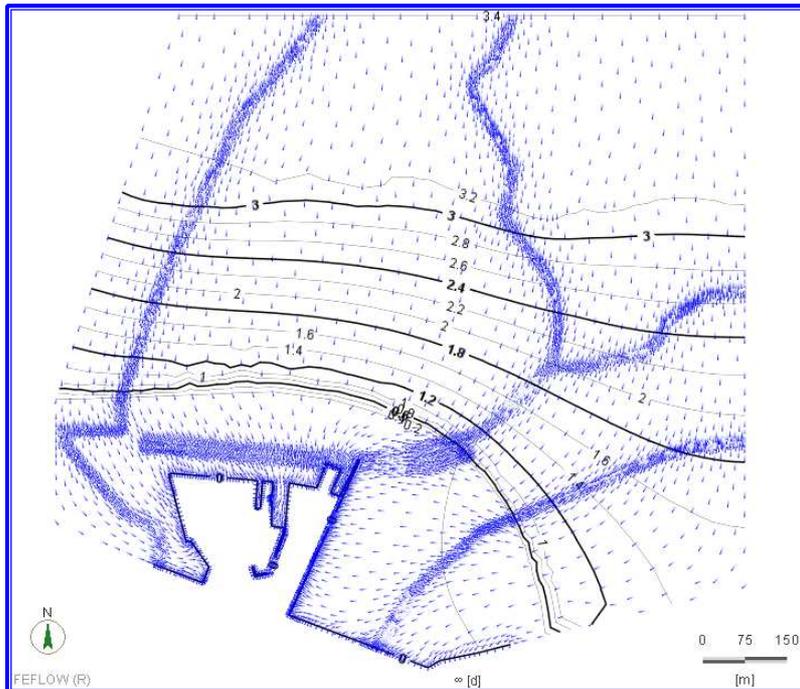
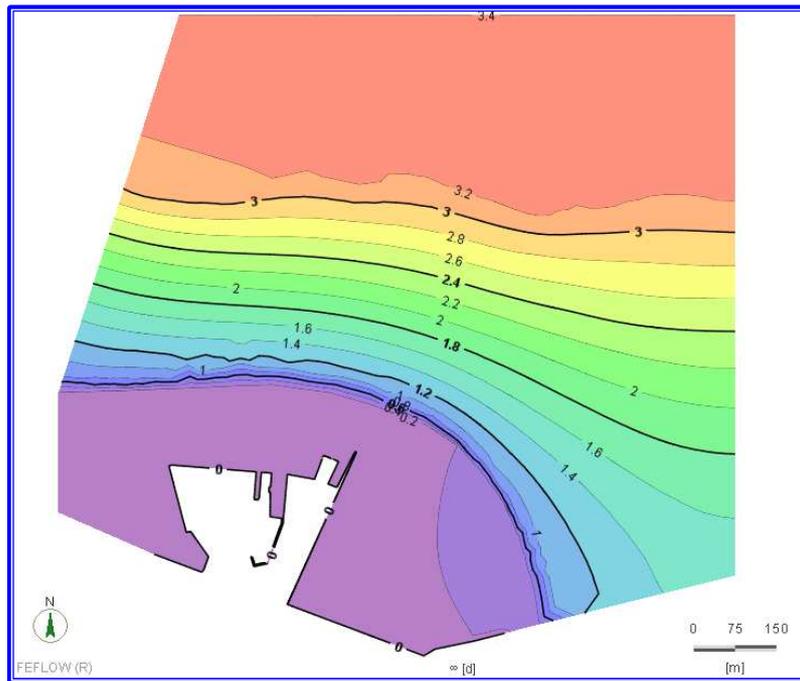


Figura 27- SDF: mappa di carico piezometrico sopra e mappa dei vettori velocità sotto (quota 0m slm)

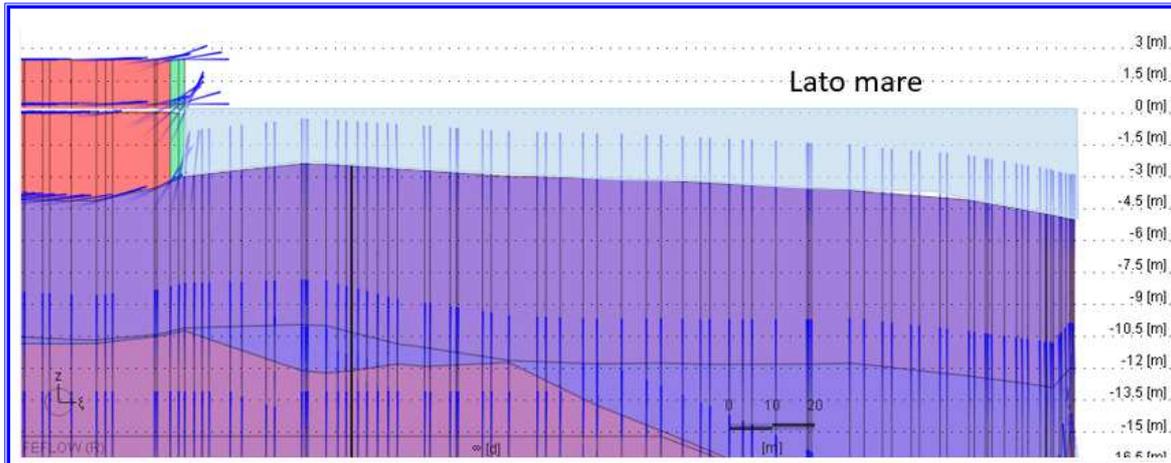
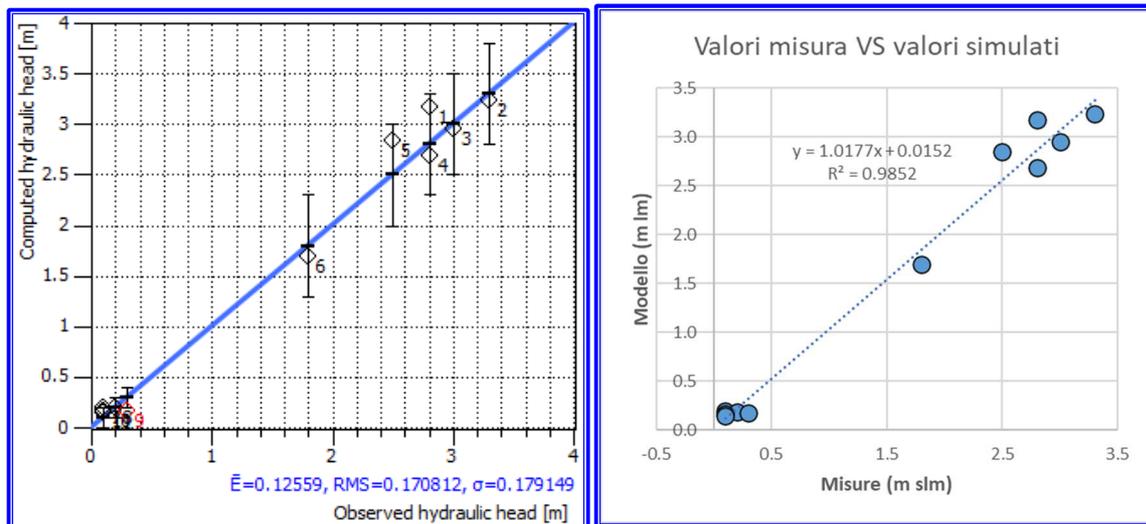


Figura 28- SDF: vettori velocità in sezione

In termini numerici *si ottiene una buona correlazione tra i dati osservati e misurati*: i punti si allineano su una retta avente *pendenza 1.01* e il *coefficiente di correlazione* è pari a *0.985*. L'*errore medio assoluto* è pari a *0.13 m*, la radice dell'*errore quadratico medio* è *prossimo a 0 (0.17)* e il *coefficiente di asimmetria  $\sigma$*  è *positivo* e pari a *0.18* (ciò significa che il modello tende a sovrastimare leggermente i valori di carico rispetto alle misure). *Nel complesso il modello numerico rappresenta bene il sistema così come schematizzato nel modello concettuale.*



### Calcolo del flusso netto lato mare

Sulla base quindi della **Figura 26**, il sistema può essere schematizzato come nella figura seguente. Il modello permette di estrapolare la portata attraverso il contorno sud del dominio definendo delle superfici di controllo. Sono stati quindi calcolati i flussi per i tratti:

- ✚ **AB**: ovvero ciò che esce dall'attuale superficie del porto a contatto con il mare;
- ✚ **BC**: ovvero ciò che esce dall'attuale fondale in corrispondenza della futura colmata.

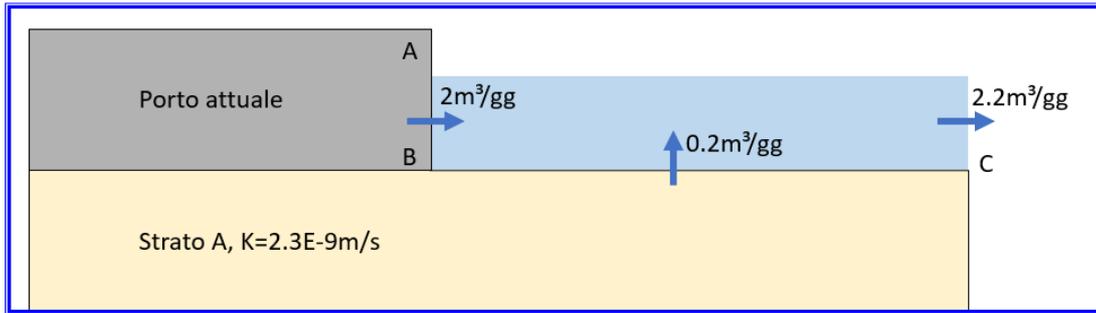


Figura 29- SDF: Flussi netti dalla falda, dal sedimento e complessivo verso mare

Nella figura sottostante si riporta il flusso totale in uscita sia dal perimetro delle future palancole di progetto (somma del tratto **AB** e **BC** della **Figura 29**) sia lateralmente ad esse, in corrispondenza delle palancole esistenti. Il flusso sulla verticale è stato calcolato fino alla quota dell'attuale fondale (circa **-5 m slm**).

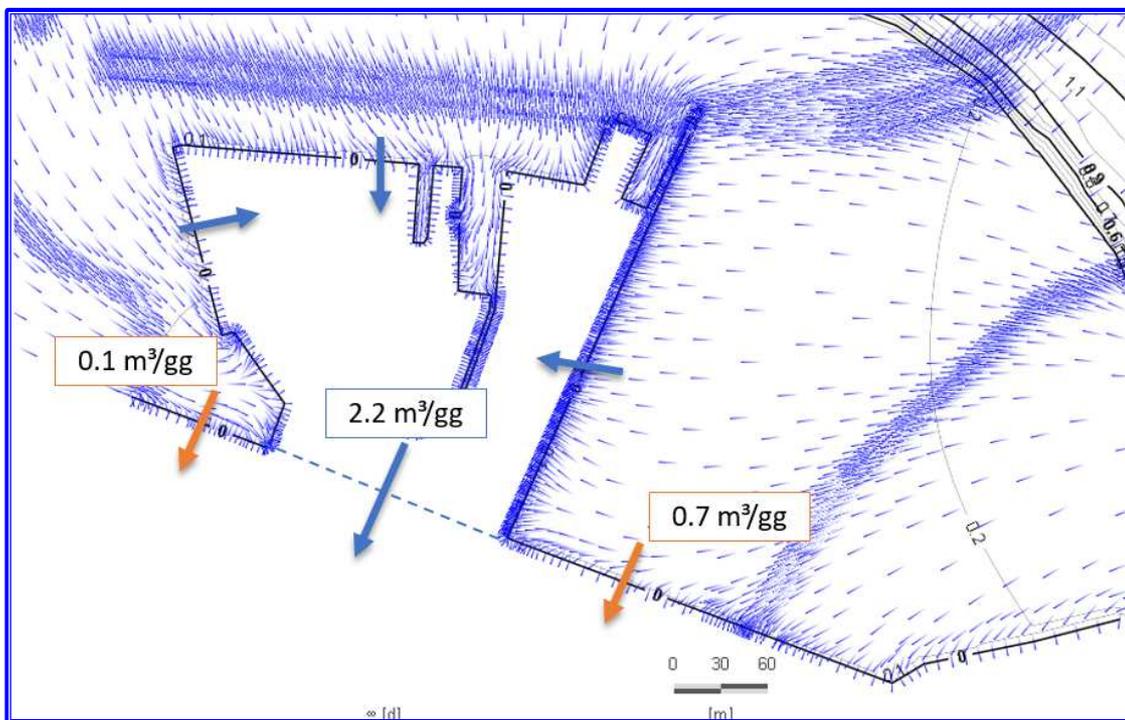


Figura 30- SDF: Flussi netti in uscita verso il mare fino alla quota del fondale attuale

### Intrusione salina

Il modello permette anche di studiare il fenomeno dell'intrusione salina, dando come output le curve di **isoconcentrazione** in termini planimetrici e lungo delle sezioni trasversali. **Si è imposta una concentrazione di sali pari a 33 g/l al bordo sud del dominio (lato mare) costante sulla verticale**. I risultati sono da interpretare in termini qualitativi e non quantitativi dal momento che non è stato possibile tarare il modello anche su questo aspetto non essendo disponibili dati di qualità nel piezometro al porto. L'analisi è però utile per poter fare un confronto tra lo stato di fatto e quello di progetto ed in particolare studiare il ruolo delle palancole nella riduzione del fenomeno dell'intrusione salina.

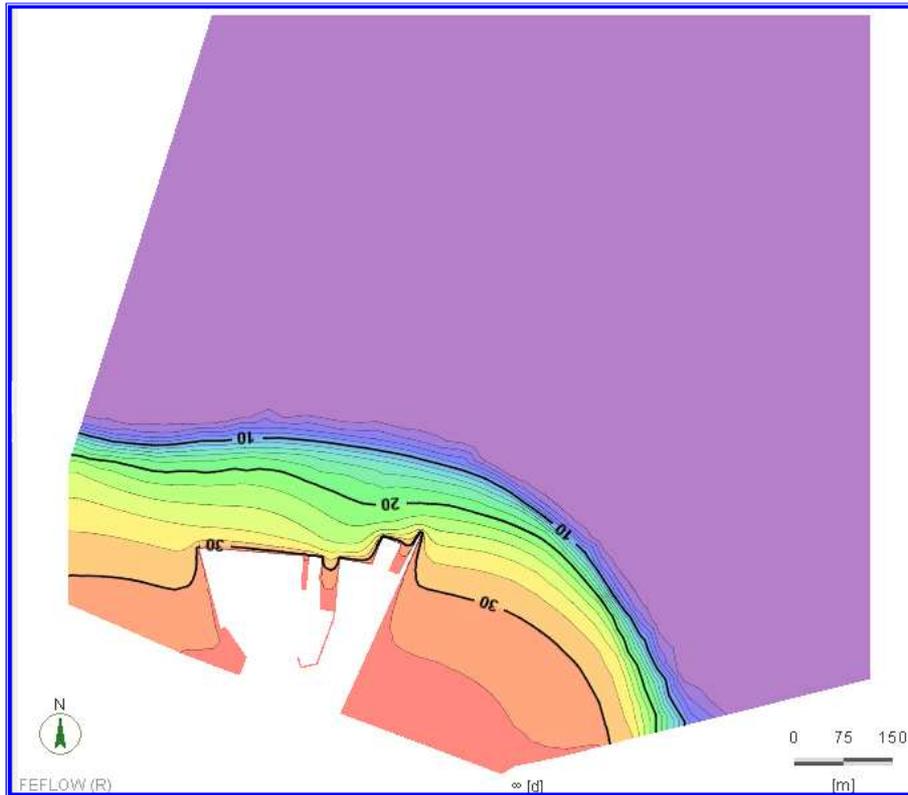


Figura 31- SDF: mappa di isoconcentrazione (g/l)

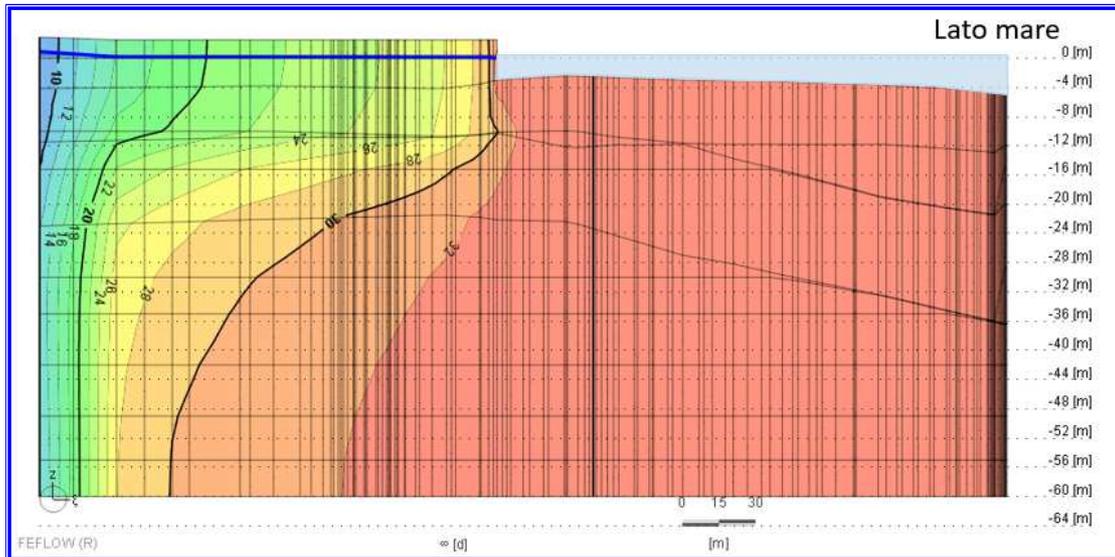


Figura 32- SDF: linee di isoconcentrazione (g/l)

## 8.2. Stato di Progetto

Per lo *Stato di Progetto (SDP)* sono state studiate e modellate tre possibili opzioni progettuali:

- ✚ **Opzione 1:** riempimento della colmata con materiale da cava (Par. 8.2.4);
- ✚ **Opzione 2:** riempimento della colmata con sedimenti provenienti da dragaggi (Par. 8.2.5);
- ✚ **Opzione 3:** realizzazione di un dreno a monte della colmata per limitare l'innalzamento della falda nell'area di intervento (Par. 8.2.6).

Nello specifico, la modellazione dello *Stato di Progetto* permette di:

- ✚ *determinare le eventuali variazioni in termini di carichi piezometrici e direzioni di flusso indotte dalla presenza della colmata e delle palancole;*
- ✚ *definire la portata in uscita dalle palancole;*
- ✚ *studiare l'effetto della diversa permeabilità del materiale di riempimento della colmata in termini di piezometria e portate*
- ✚ *studiare in termini qualitativi l'effetto dell'intervento nel contenimento dell'intrusione salina;*
- ✚ *studiare l'effetto di un eventuale dreno a monte della colmata*

### 8.2.1. Il dominio di calcolo e il modello 3D

Il dominio dello *SDP* è analogo a quello dello *SDF*, ma si è proceduto a riempire la colmata e ad inserire le nuove palancole lato mare.



Figura 33 – Dominio per le simulazioni dello stato di progetto

La *mesh di calcolo* e il *modello 3D* sono stati costruiti analogamente allo *SDF* e si mantengono le stesse permeabilità individuate in fase di calibrazione. Il *modello 3D* è costituito da *8 slice* principali: *slice 1* coincidente con il *PC*, *slice 2* a quota *0 m slm*, *slice 3* coincidente con la sommità dell'*unità A*, *slice 4* coincidente con la sommità dell'*unità B*, *slice 5* coincidente con la sommità dell'*unità C*, *slice 6* a quota *-28.80m slm* (quota di posa delle palancole), *slice 7* coincidente con la sommità dell'*unità D*, *slice 8* a quota *-60m slm*. Tra le *slice principali* sono state inserite delle *slice intermedie* ad una distanza di *2-5 m* a seconda della distanza tra una slice principale e l'altra.

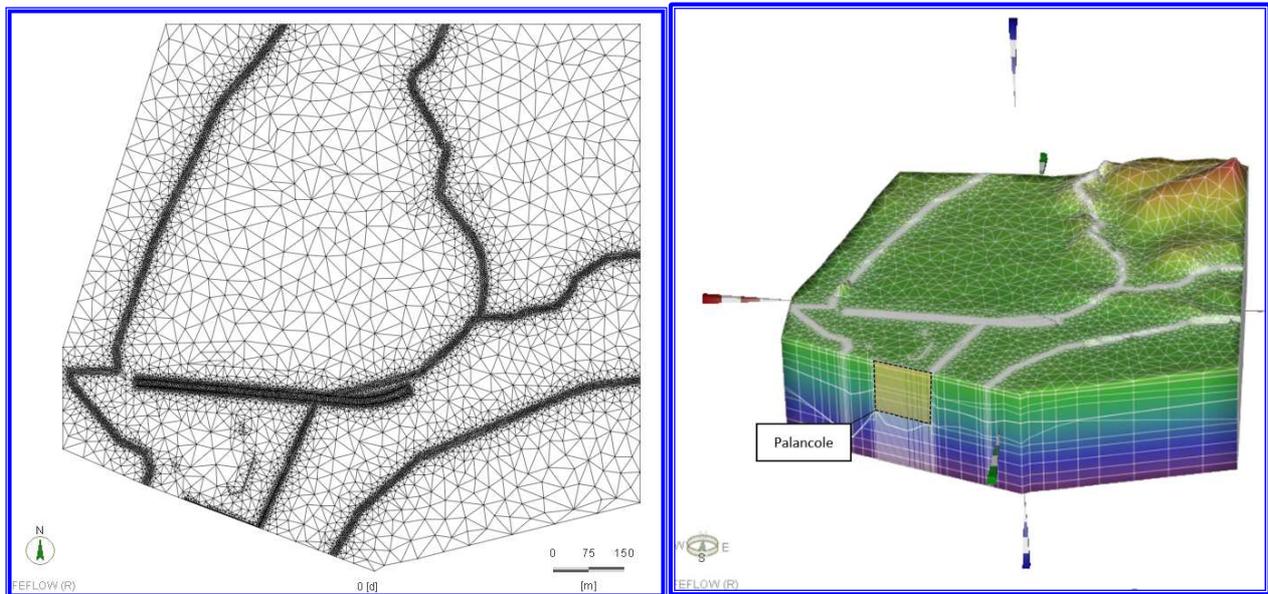


Figura 34 – Mesh di calcolo a sinistra e modello 3D a destra

### 8.2.2. Stratigrafia di riferimento

Rispetto allo *SDF*, nello stato di progetto, in corrispondenza della colmata, si è considerato:

- ✚ *Nuovo piano campagna alla quota +2.5 m slm*
- ✚ *Da +2.5 m slm fino alla quota del fondale esistente: riempimento con materiale di cava e/o, in parte, con altri sedimenti di dragaggio;*
- ✚ *A partire dalla quota del fondo è stata ricostruita la stratigrafia analoga allo SDF*

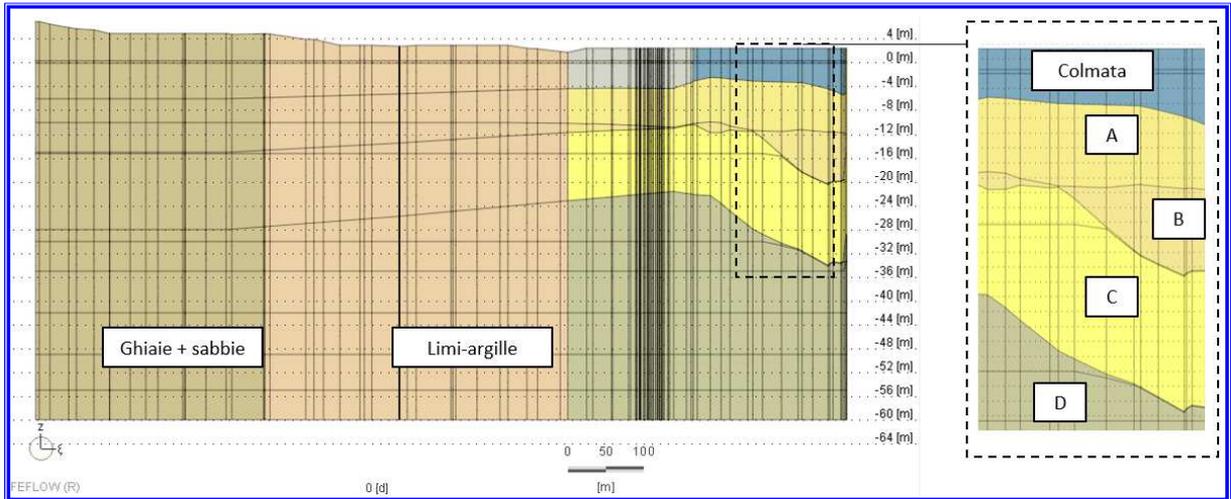


Figura 35 – Stratigrafia di riferimento per lo SDP

### 8.2.3. Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono analoghe allo *SDF*, ovvero:

- **Condizione di monte** (in corrispondenza del *limite nord del modello*):  $h=3.4 \text{ m slm}$ .
- **Condizione di valle**: per  $z = 0 \text{ m slm}$ ,  $h = 0 \text{ m slm}$ ; per  $z = -60 \text{ m slm}$  (fondo del dominio lungo la verticale),  $h = 1.74 \text{ m slm}$ ; i punti intermedi sono stati interpolati linearmente secondo la *relazione (1)*.

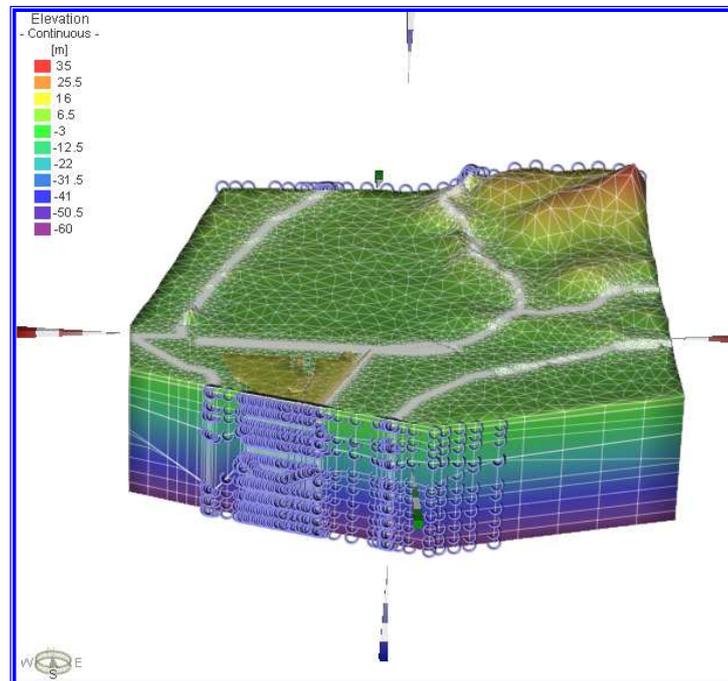


Figura 36 – Condizioni al contorno imposte per lo SDP

#### 8.2.4. *Opzione 1: riempimento della colmata con materiale da cava*

Lo *stato di progetto*, nell'opzione 1, è stato studiato facendo variare la permeabilità del materiale di riempimento della colmata e analizzando le differenze in termini di carico piezometrico rispetto allo *SDF*. È stato analizzato un intervallo di permeabilità del *materiale di riempimento della colmata, tipico di materiali grossolani e non coesivi*: in questo modo, anche dal punto di vista applicativo, per la scelta del tipo di materiale (cava) sarà possibile fornire un *range di permeabilità* adatte piuttosto che un singolo valore. I valori analizzati in particolare sono: *1E-3 m/s* e *1E-4 m/s*: si riportano, di seguito, i risultati a confronto.

#### Risultati

Si riporta nella *Figura 37* e nella *Figura 38* l'andamento delle isofreatiche ottenute dal modello per le diverse permeabilità studiate. La falda freatica risente della presenza delle palancole e del nuovo riempimento: per poter infatti vincere, oltre che l'effetto della diversa densità dell'acqua di mare, sia l'effetto di contenimento delle palancole esistenti e di quelle di progetto che il nuovo riempimento con materiale di cava, la falda deve necessariamente guadagnare carico. In particolare, nella zona del porto, si alza di circa *30 cm* rispetto allo *SDF*. Nella zona più lontana dalle palancole invece, la falda si *“riallinea”* a quella dello *SDF*.

All'interno della colmata, la falda si assesta intorno ad un valore di *0.4 m slm*, ovvero ad una profondità di *2.1 m* dal nuovo *PC*, posto a quota *+2.5 m slm*. In corrispondenza del restante dominio, le linee di carico sono analoghe a quelle dello *SDF*.

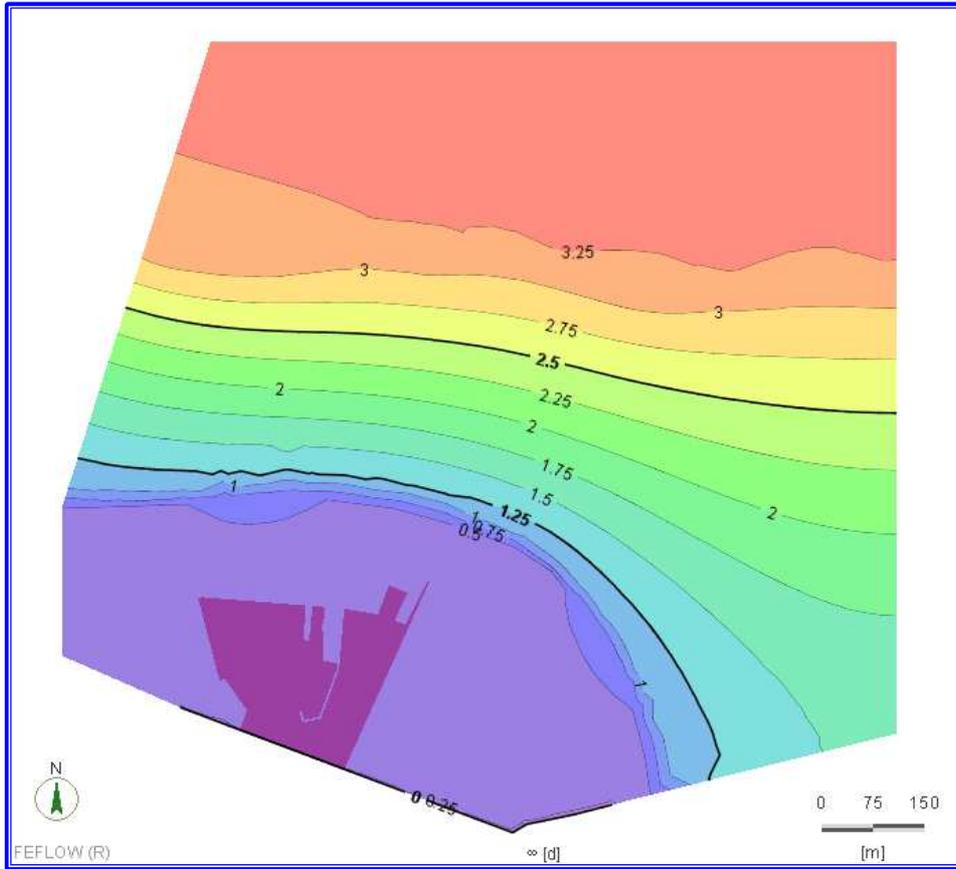


Figura 37 – SDP opzione 1: mappa di carico piezometrico –  $K$  colmata  $1E-3$  m/s

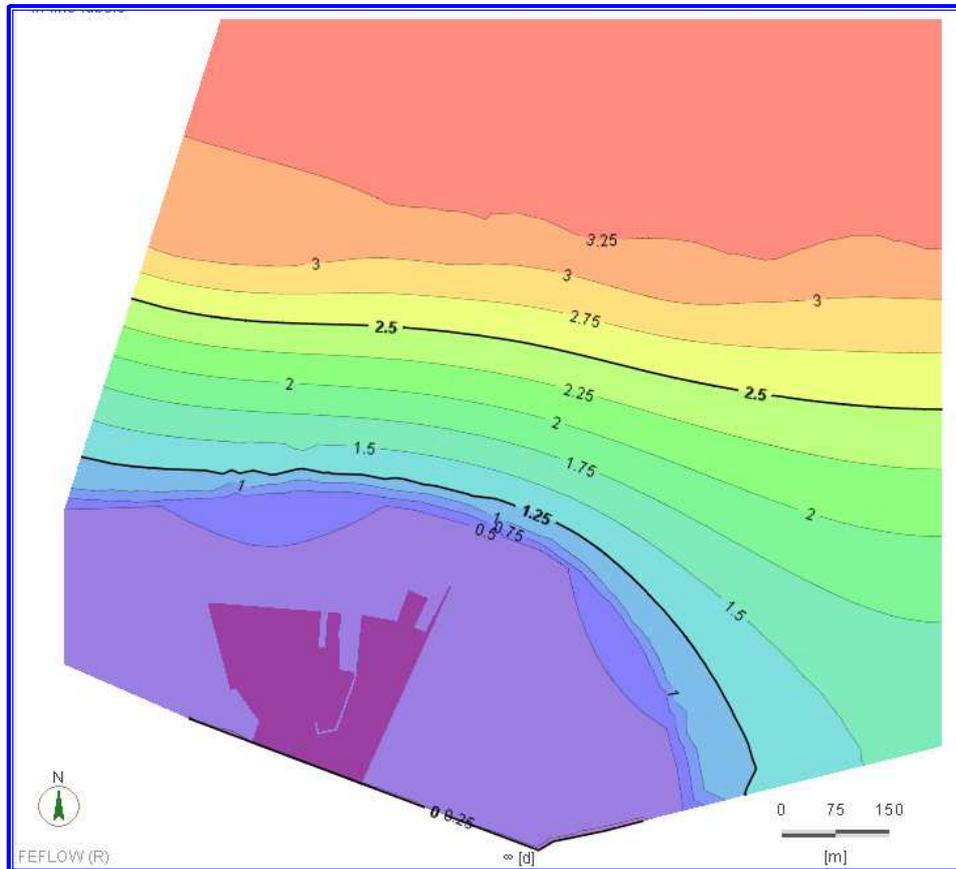


Figura 38 – SDP opzione 1: mappa di carico piezometrico –  $K$  colmata  $1E-4$  m/s

La colmata quindi, in termini di carico piezometrico, influenza solo la zona circostante l'intervento. Questo si nota confrontando l'andamento della falda nello **SDP** rispetto allo **SDF**, lungo la **sezione 1 nord-sud** riportate in **Figura 33**. Si riporta quindi nelle due figure sottostanti il carico piezometrico e la differenza di carico tra lo **SDF** e lo **SDP** lungo la sezione. Si nota come nella zona di valle del dominio, ovvero in corrispondenza del porto, la falda nello **SDP** si alza di massimo **30 cm**, mentre allontanandosi dalla zona di intervento le differenze tra **SDP** e **SDF** si riducono gradualmente, fino a diventare praticamente impercettibili (inferiori a **5 cm**) già a **600 m** di distanza dal mare, ovvero dalle palancole di progetto. L'andamento della superficie libera della falda non risulta quindi essere particolarmente influenzato dalla tipologia di materiale presente nella colmata, ma piuttosto dalla presenza delle palancole di nuova realizzazione e dalla loro bassissima permeabilità.

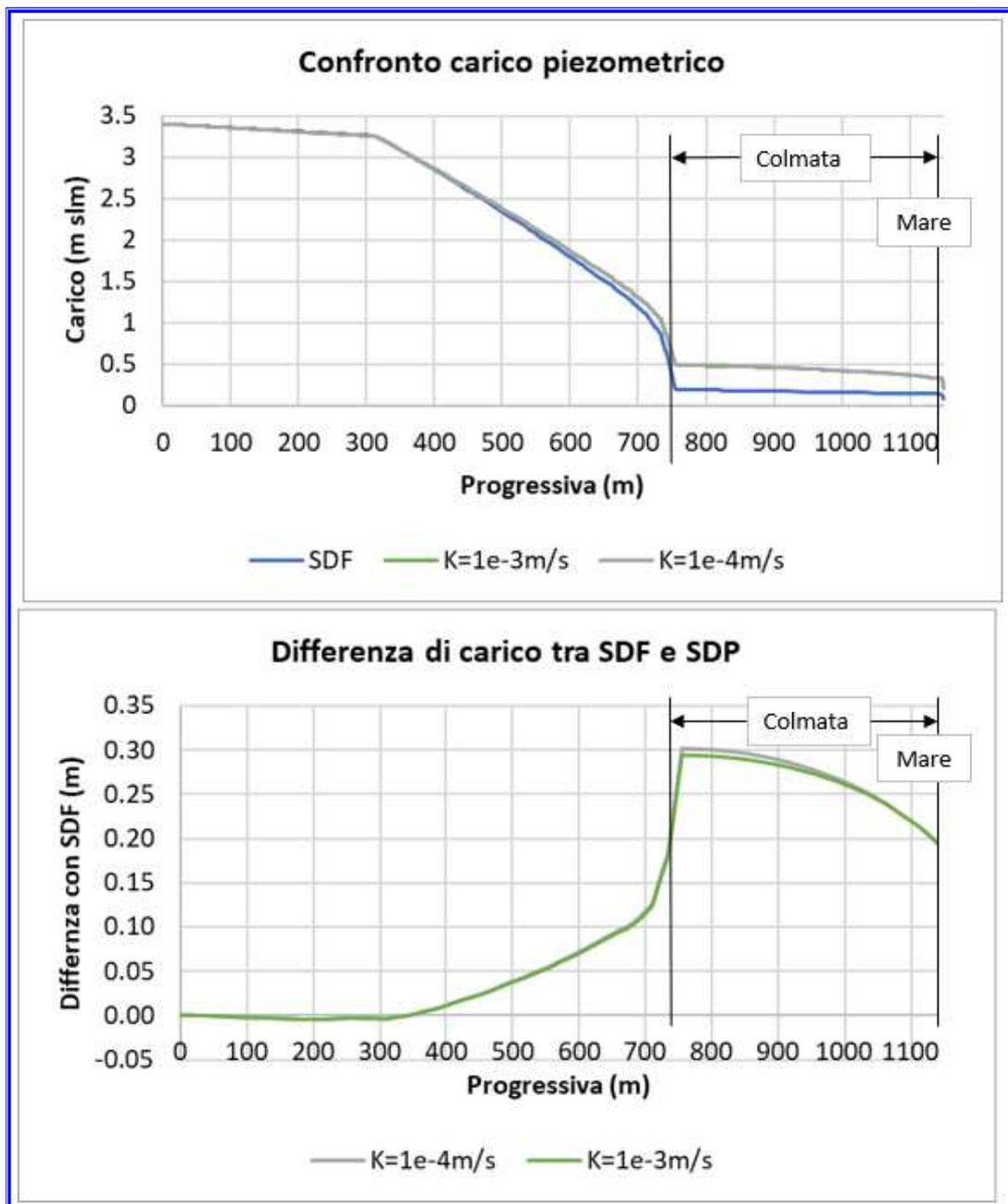


Figura 39 - Confronto tra SDF e SDP opzione 1 in termini di carico piezometrico

Dal punto di vista planimetrico, a scala di dominio non si rilevano particolari modifiche in termini di direzioni di flusso rispetto allo *SDF*. Il flusso tende in modo analogo allo *SDF* a dirigersi *da nord verso il mare*, nonostante la presenza delle palancole e della nuova colmata. Localmente, invece, nell'intorno dell'area di intervento, il flusso proveniente da *nord-ovest* e da *nord-est*, tende a non attraversare la colmata, ma piuttosto a scorrere parallelamente ad essa.

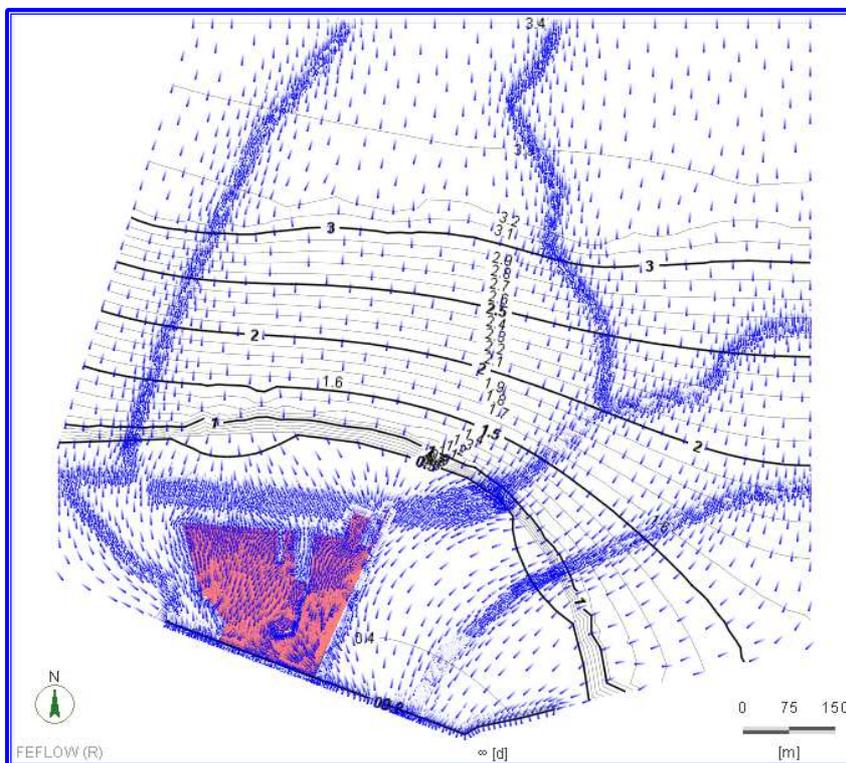


Figura 40 – SDP opzione 1: mappa dei vettori velocità –  $K$  colmata  $1E-3$  m/s

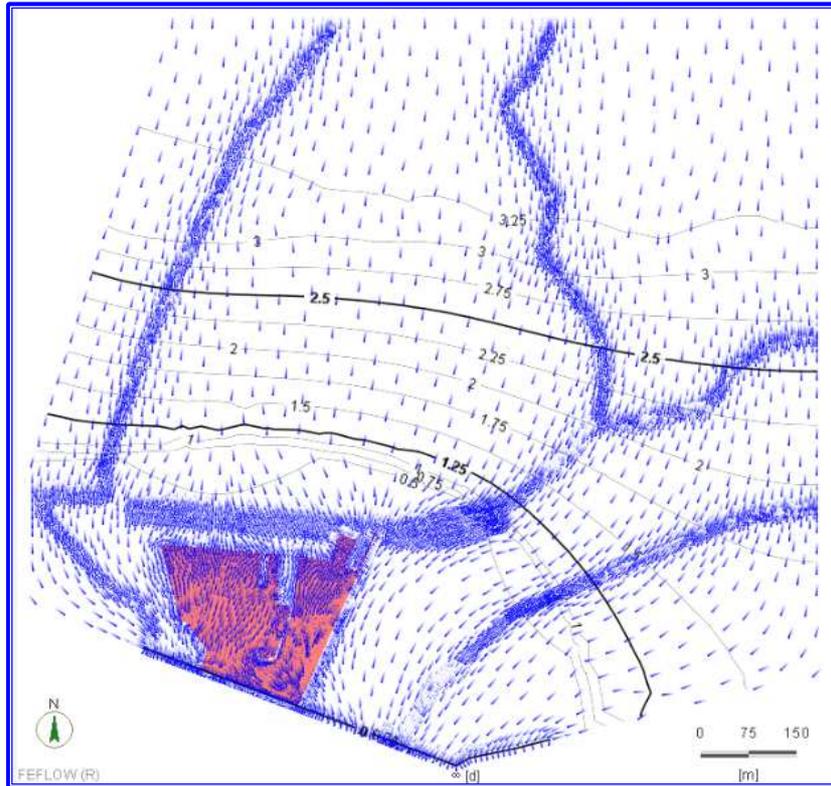


Figura 41- SDP opzione 1: mappa dei vettori velocità –  $K$  colmata  $1E-4$  m/s

Le maggiori differenze in termini di direzioni di flusso si notano in sezione: come mostra la **Figura 32**, a differenza dello **SDF**, ora il flusso non tende più ad uscire dal fondale, ma tende a mantenersi parallelo ad esso, uscendo dalle palancole poste all'estremità.

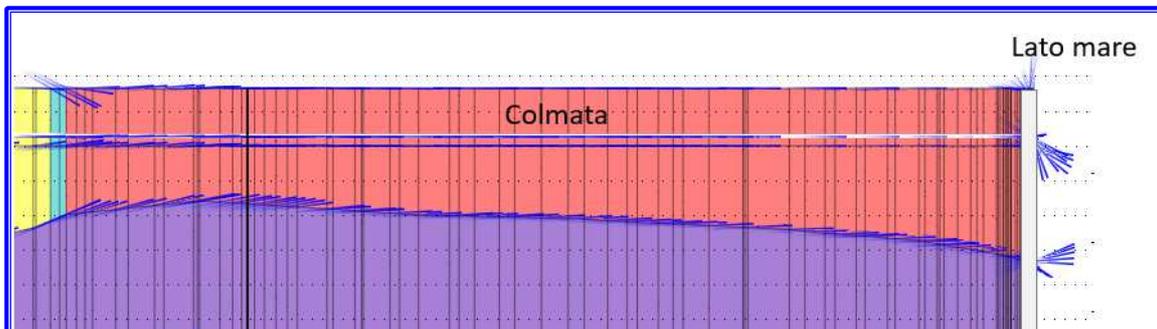


Figura 42- SDP opzione 1: vettori velocità in sezione

### Calcolo del flusso netto lato mare

Analogamente a quanto fatto per lo **SDF**, sulla base della **Figura 32**, il sistema può essere schematizzato come nella figura seguente.

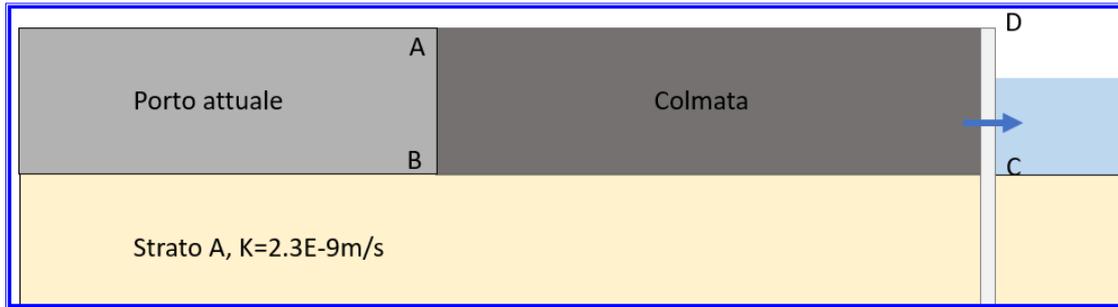


Figura 43 – Schematizzazione dei flussi in uscita per lo SDP

Sono stati quindi calcolati i flussi netti per il tratto **DC** ovvero *ciò che esce dalle palancole a partire dalla quota di sommità fino alla quota di dragaggio di progetto (-15m slm)*. Si riportano, nella tabella seguente, i valori di *portata netta* in uscita dalle palancole di progetto a confronto con quelli dello **SDF**.

Tabella 7 – SDP opzione 1: portate nette attraverso i tratti analizzati

Tratto	SDF	K colmata 1E-3 m/s	K colmata 1E-4 m/s
	Portate nette in m <sup>3</sup> /g		
DC	-2.2 (somma del tratto AB e BC)	-0.1	-0.1

Analizzando i numeri di **Tabella 7**, si possono fare le seguenti considerazioni:

- ✚ *La presenza della colmata e delle palancole di progetto riduce effettivamente il flusso in uscita verso il mare: in particolare per il tratto DC, per tutta la superficie della colmata lato mare, il flusso passa da circa 2 m<sup>3</sup>/g per lo SDF a 0.1 m<sup>3</sup>/g per lo stato di progetto. Si ha quindi una riduzione di quasi 10 volte rispetto a ciò che esce attualmente.*
- ✚ *La presenza delle palancole invece in corrispondenza degli strati componenti il fondale non determina variazioni rispetto allo SDF: ciò dovuto al fatto che le palancole hanno di fatto la stessa permeabilità degli strati in cui sono infisse e per tale ragione esse, in regime stazionario, non rappresentano una vera e propria discontinuità idraulica.*

Il resto della portata proveniente da monte viene deviato dalla presenza della colmata e delle palancole di progetto. Infatti, il flusso che prima tendeva a dirigersi verso il mare (cfr. **Figura 30**) ora tende ad uscire lateralmente alla colmata (*freccie arancioni in Figura 44*Figura 59). I flussi in uscita sono stati calcolati fino alla quota di dragaggio prevista dal **PTFE (-15 m slm)**.

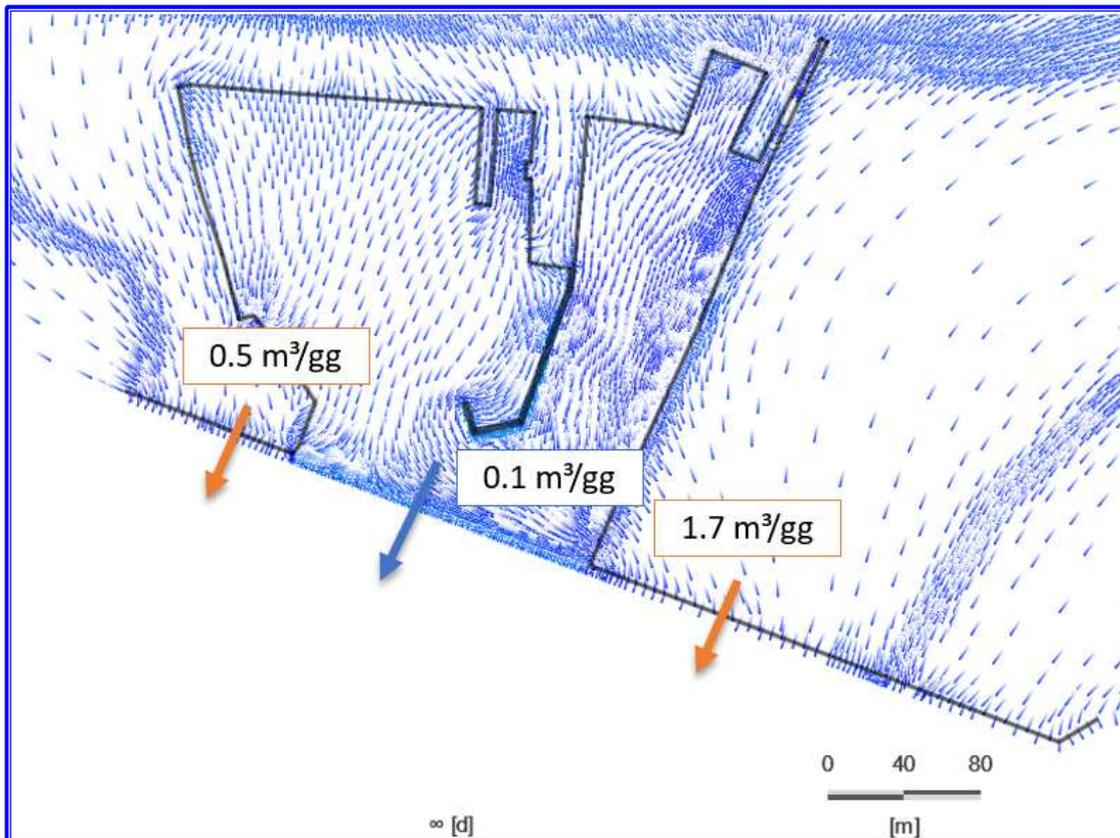


Figura 44 – SDP opzione 1: flussi netti in uscita verso il mare

### Intrusione salina

Le palancole e la futura colmata rappresentano un ostacolo anche dal lato mare: esse, infatti, permettono di ridurre l'intrusione di acqua marina. Si riporta, in planimetria, l'andamento delle *linee di isoconcentrazione di sale in g/l*.

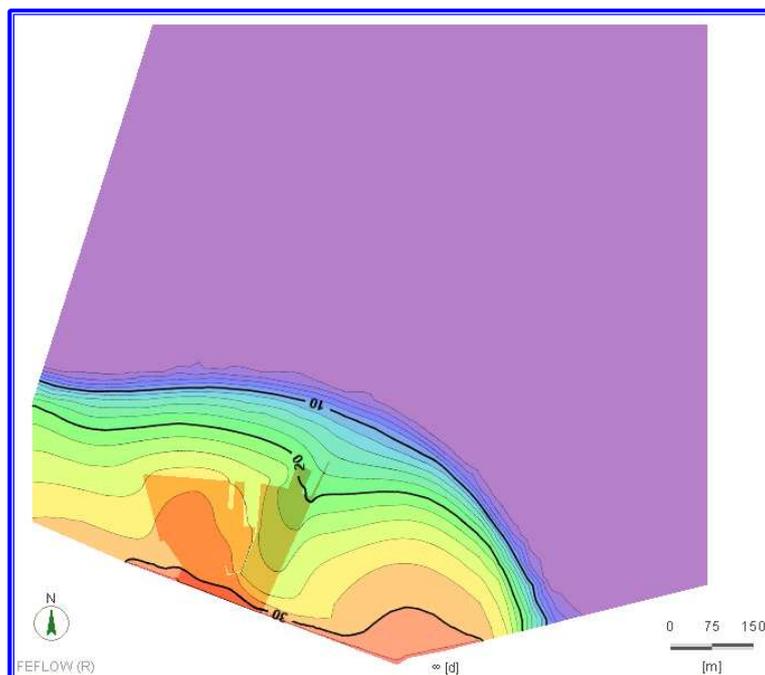


Figura 45 - SDP opzione 1: mappa di isoconcentrazione (g/l) – K colmata 1E-3 m/s

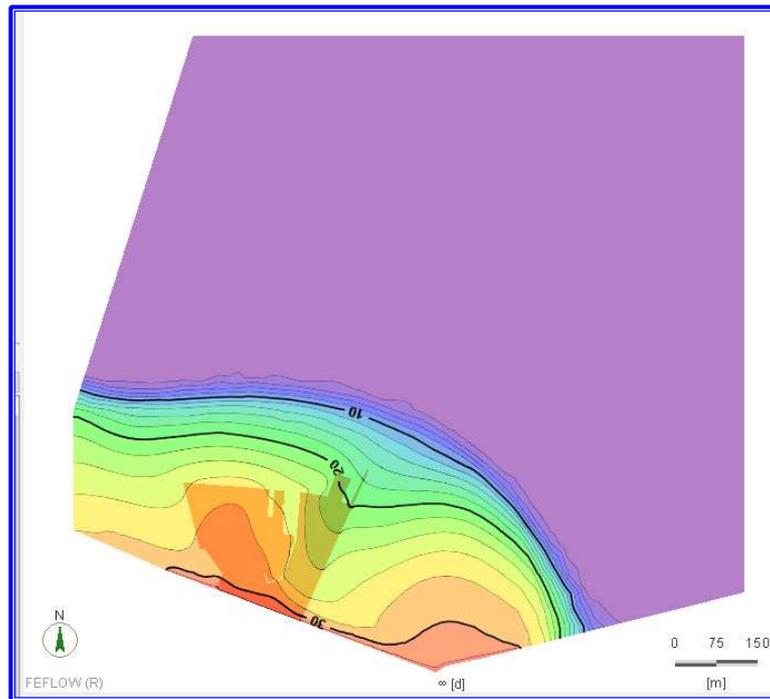


Figura 46 - SDP opzione 1: mappa di isoconcentrazione (g/l) – K colmata  $1E-4$  m/s

Si riporta, nelle figure seguenti, l'andamento della concentrazione lungo la sezione 1 (cfr. Figura 25) alla quota 0 m s.l.m.

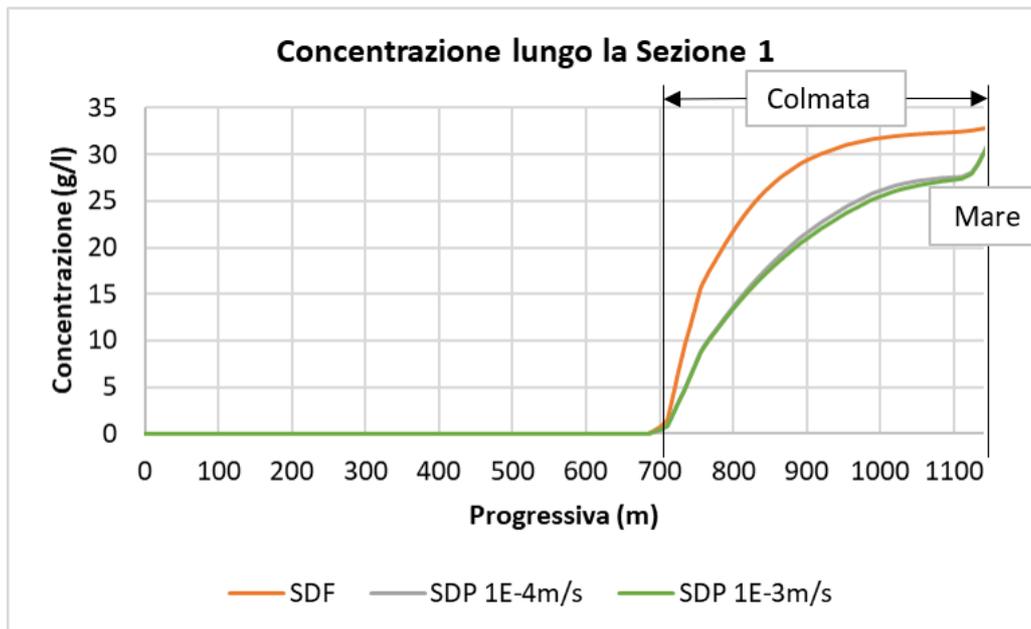


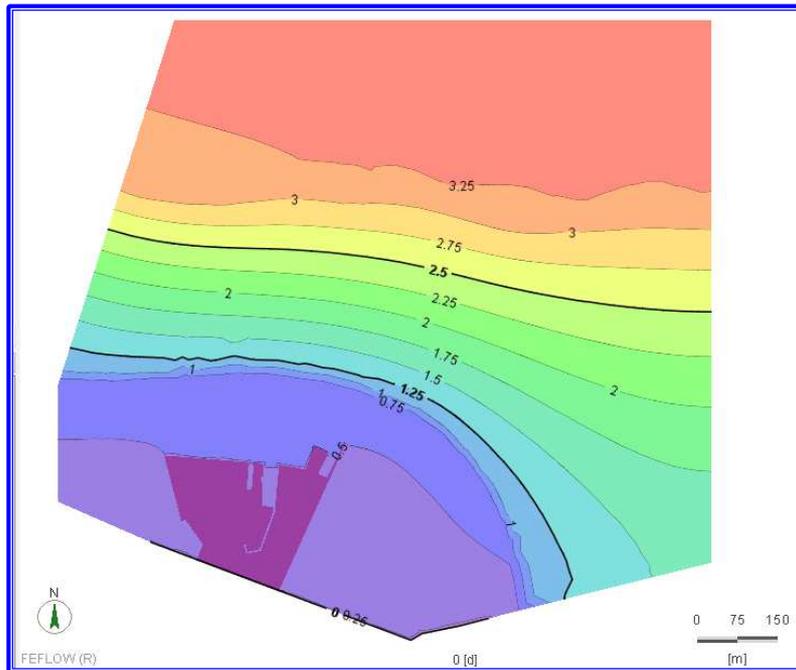
Figura 47- SDP opzione 1: andamento della concentrazione di sali (g/l) lungo la sezioni 1 al variare della K della colmata

### 8.2.5. Opzione 2: riempimento con sedimenti provenienti dai dragaggi

Lo *Stato di Progetto*, nell'*Opzione 2*, è stato studiato considerando una permeabilità del materiale di riempimento tipico dei *sedimenti di dragaggio*, pari a  $1E-5$  m/s, e analizzando le differenze in termini di carico piezometrico rispetto allo *SDF*.

Come indicato in premessa, i sedimenti di dragaggio che potranno essere refluiti in colmata dovranno essere *conformi al refluito così come previsto dal D.M. 173/16*.

Anche in questo caso la falda deve necessariamente guadagnare del carico piezometrico affinché riesca ad attraversare tutti gli ostacoli a bassa permeabilità, ovvero sia le palancole esistenti che la colmata riempita con sedimenti che le nuove palancole di progetto. In questo caso quindi l'isofreatica a **0.5 m slm**, che nel caso dell'opzione 1 di progetto si disponeva subito a monte della zona del porto, in questo caso si pone subito a monte della colmata.



*Figura 48 – SDP opzione 2: mappa delle isofreatiche*

Anche dal punto di vista dei vettori velocità, ovvero delle direzioni di flusso, a scala di dominio la falda si dirige sempre in direzione del mare. Localmente invece, nell'intorno dell'area di intervento, il flusso proveniente da **nord-ovest** e da **nord-est** tende a non attraversare la colmata, ma piuttosto a scorrere parallelamente ad essa.

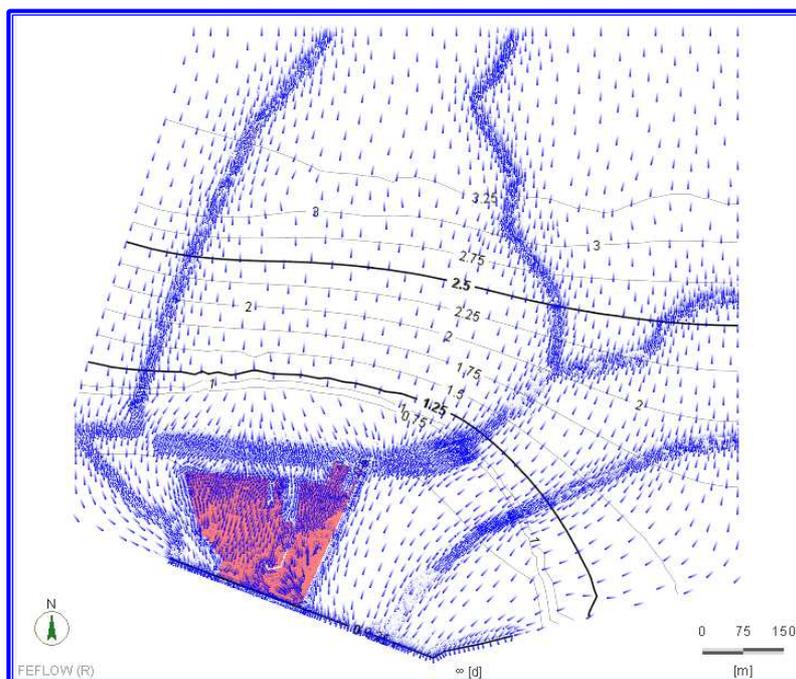


Figura 49 – SDP opzione 2: mappe dei vettori velocità

In questo caso l'innalzamento della falda, dovuto principalmente alla presenza delle *palancole di progetto*, è pari a circa **35 cm** rispetto allo *SDF*. Analogamente ai casi precedenti, l'influenza delle opere di progetto è percettibile, ma comunque contenuta, e limitata alla zona del porto.

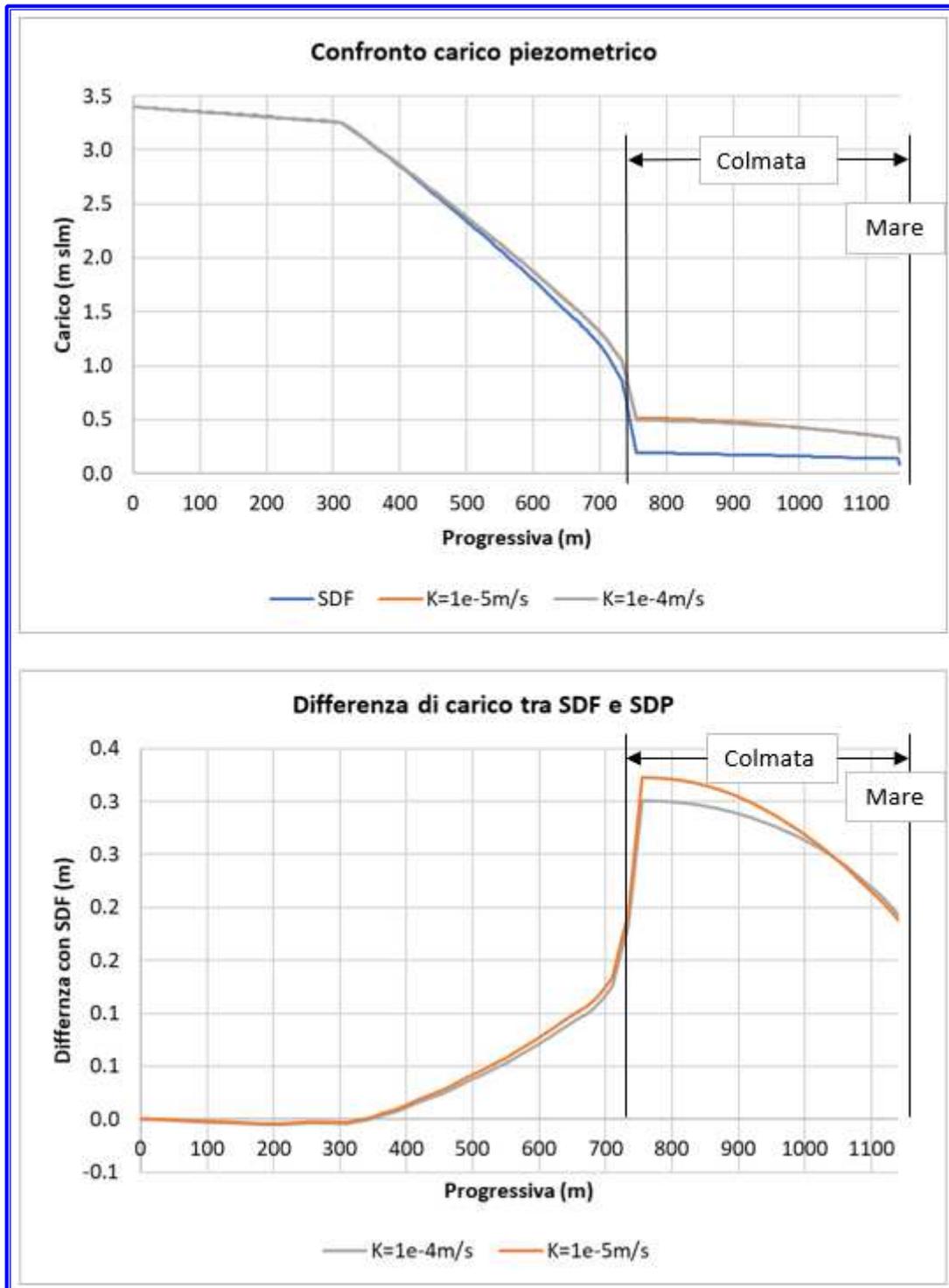


Figura 50 –Confronto tra SDF e SDP opzione 2 in termini di carico piezometrico

### Calcolo del flusso netto lato mare

Analogamente a quanto fatto per lo *SDF* e per l'*opzione 1* dello *SDP*, sulla base della *Figura 43* si è calcolato il flusso netto in uscita *dalle palancole a partire dalla quota di sommità fino alla quota di dragaggio di progetto (-15 m slm)*. Anche in questo caso, il flusso uscente è dell'ordine del  $0.1 \text{ m}^3/\text{g}$ , ovvero più di dieci volte inferiore rispetto allo *SDF*.

Il flusso di falda rimanente proveniente da monte, analogamente allo *SDP* opzione 1, viene deviato dalla presenza delle palancole di progetto e fuoriesce lateralmente ad esse (*freccette arancioni in Figura 51*).

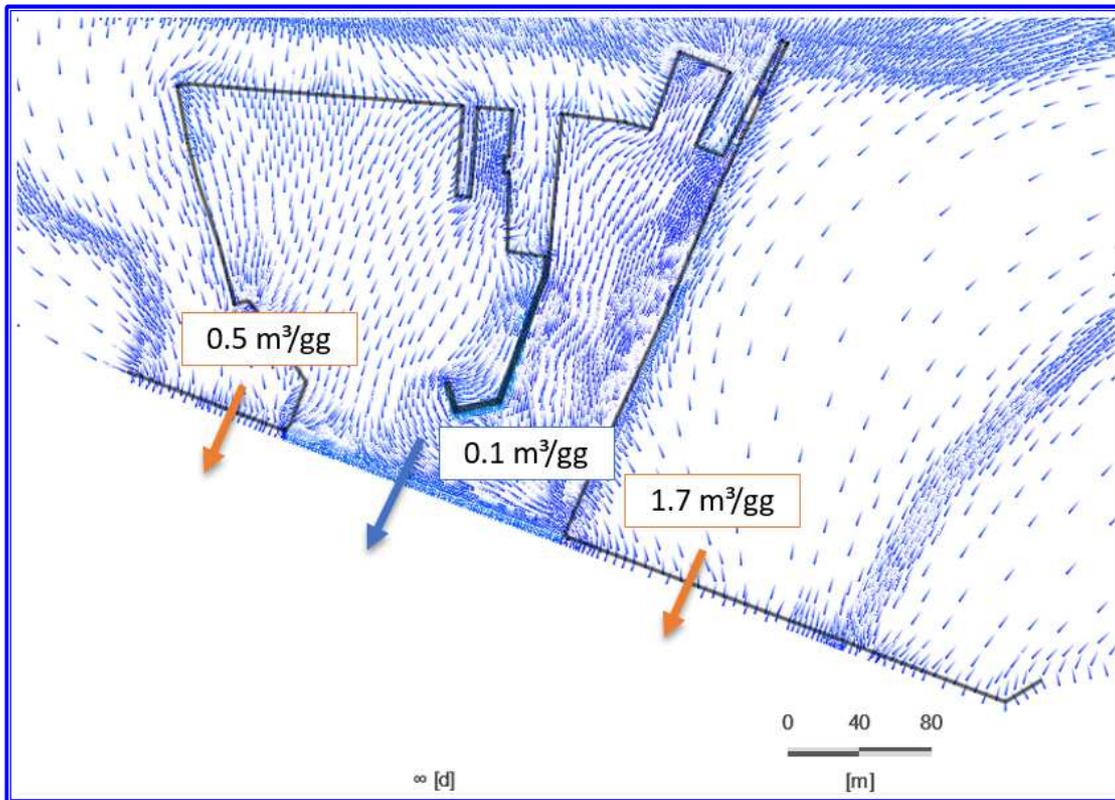


Figura 51– *SDP* opzione 2: flussi netti in uscita verso il mare

### Intrusione salina

Si ha, anche in questo caso, una riduzione dell'ingresso di acqua marina verso la terraferma, lievemente più marcata rispetto al caso di riempimento della colmata con materiale di cava.

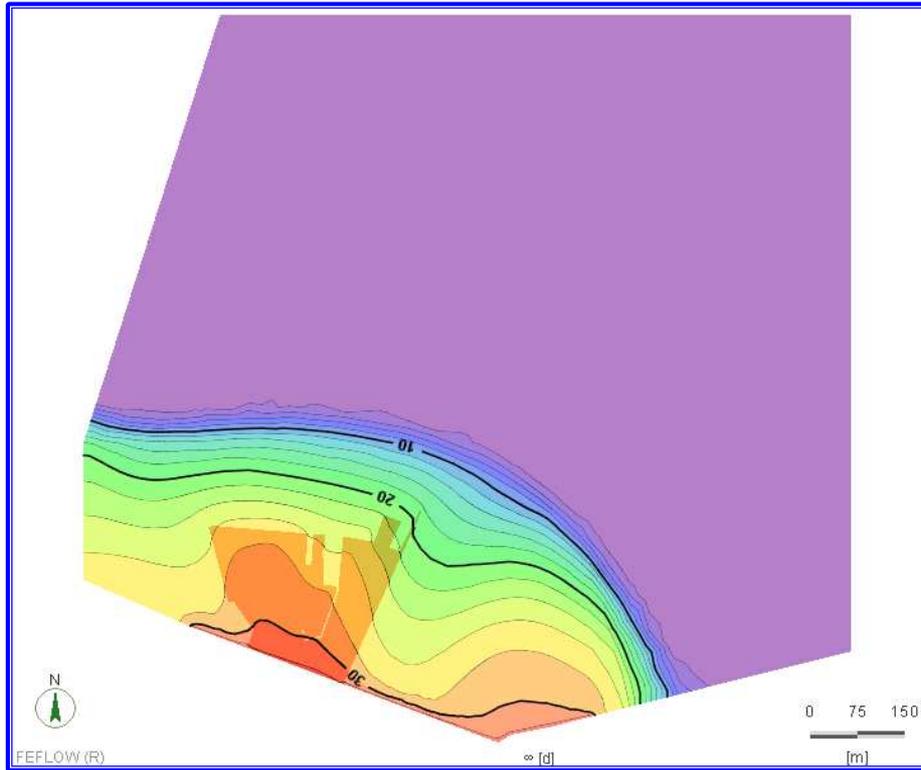


Figura 52 – SDP opzione 2: mappa delle linee di isoconcentrazione (g/l)

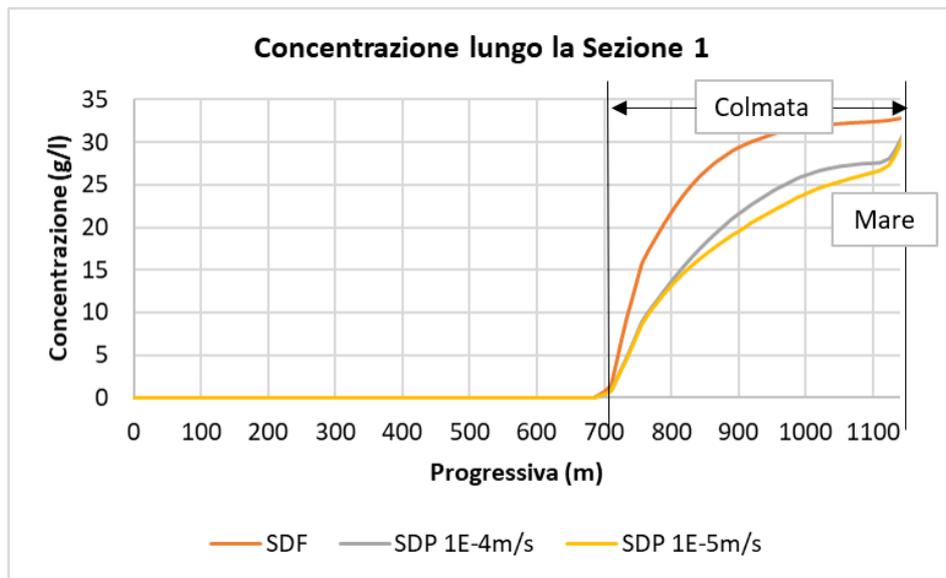
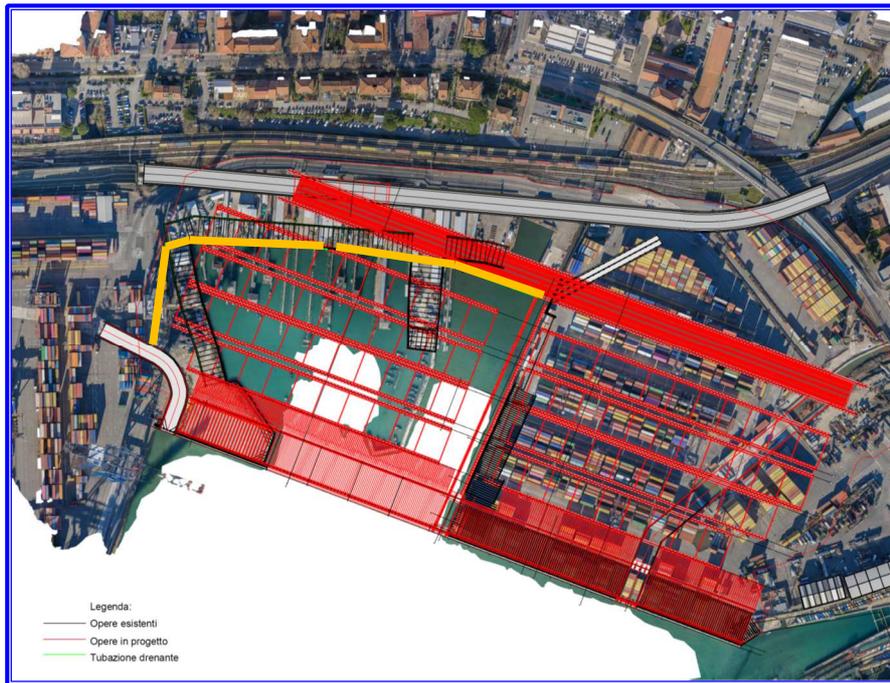


Figura 53 – SDP opzione 2: andamento della concentrazione di sali (g/l) lungo la sezioni 1

### 8.2.6. *Opzione 3: realizzazione di un dreno a monte della colmata*

Lo *Stato di Progetto*, nell'*opzione 3*, è stato studiato considerando una permeabilità del materiale di riempimento pari a  $1E-5 \text{ m/s}$  (quindi un riempimento totale con *sedimenti marini*) e al fine di ridurre per quanto possibile l'innalzamento della falda dovuta al solo riempimento della colmata e delle nuove palancole di progetto, si è inserito un dreno orizzontale, disposto a monte della nuova colmata, ma a valle delle palancole esistenti. Tale ubicazione risulta l'unica possibile considerando tutte le interferenze presenti nell'area di intervento.



*Figura 54- - Ubicazione del dreno di progetto*

A livello di modello, il dreno viene schematizzato imponendo ai nodi interessati una condizione al contorno detta di *seepage face*, che prevede di imporre il carico piezometrico *uguale alla quota geodetica*, imponendo di fatto che la pressione sia uguale a  $0 \text{ kPa}$ . A tale condizione è associata una "*constrain condition*", ossia un vincolo che consente l'instaurarsi di una portata uscente dal modello, ma non entrante. Il dreno è stato quindi posto alla quota di  $0.3 \text{ m slm}$ . Nella figura seguente si riportano le linee equipotenziali e i vettori velocità.

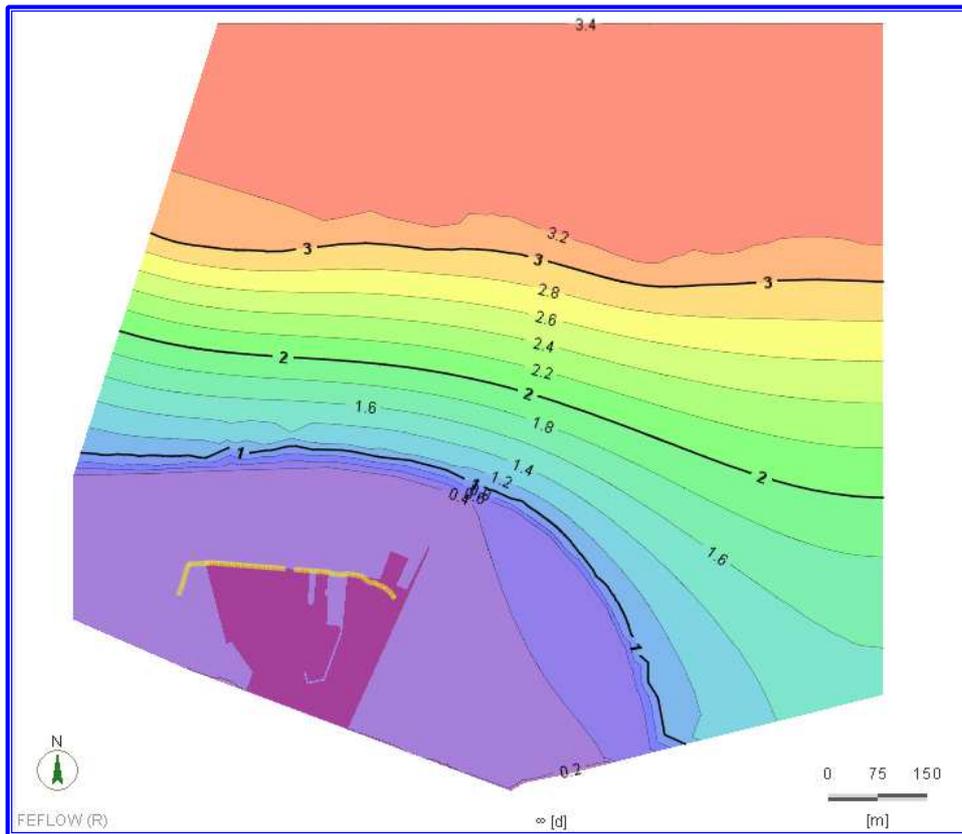


Figura 55 – SDP opzione 3: linee a carico costante

Nella successiva figura si nota, in particolare, come le linee di flusso vengano in parte intercettate dal dreno (linea gialla), in parte mentre altre, più distanti, non ne risentano della presenza.

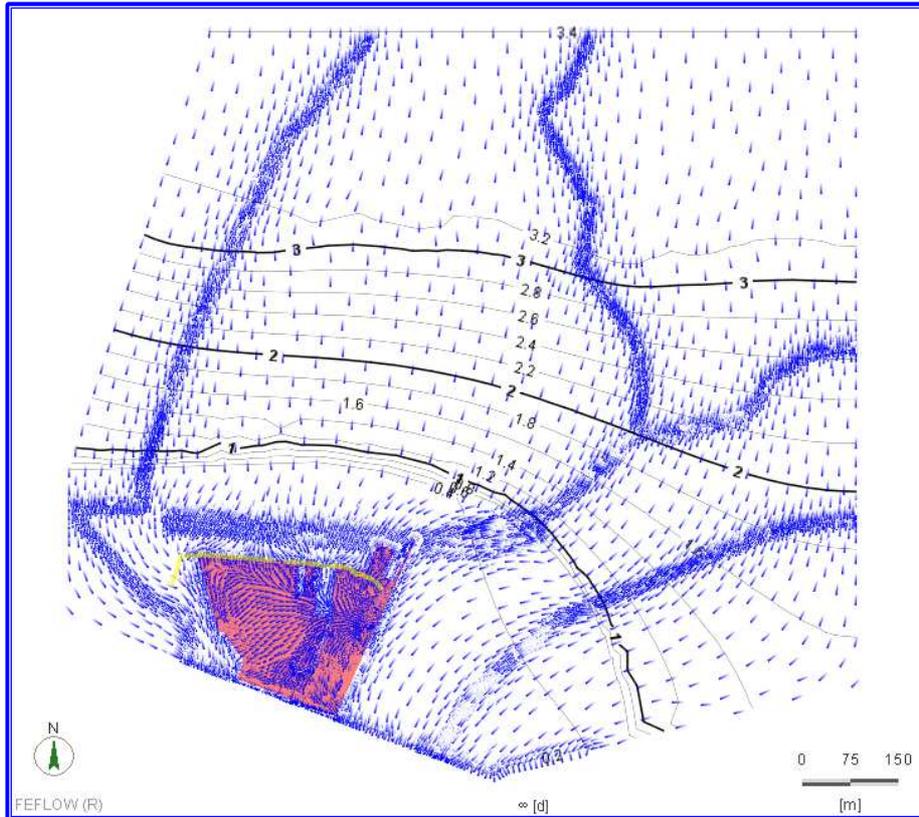


Figura 56 – SDP opzione 3: vettori velocità

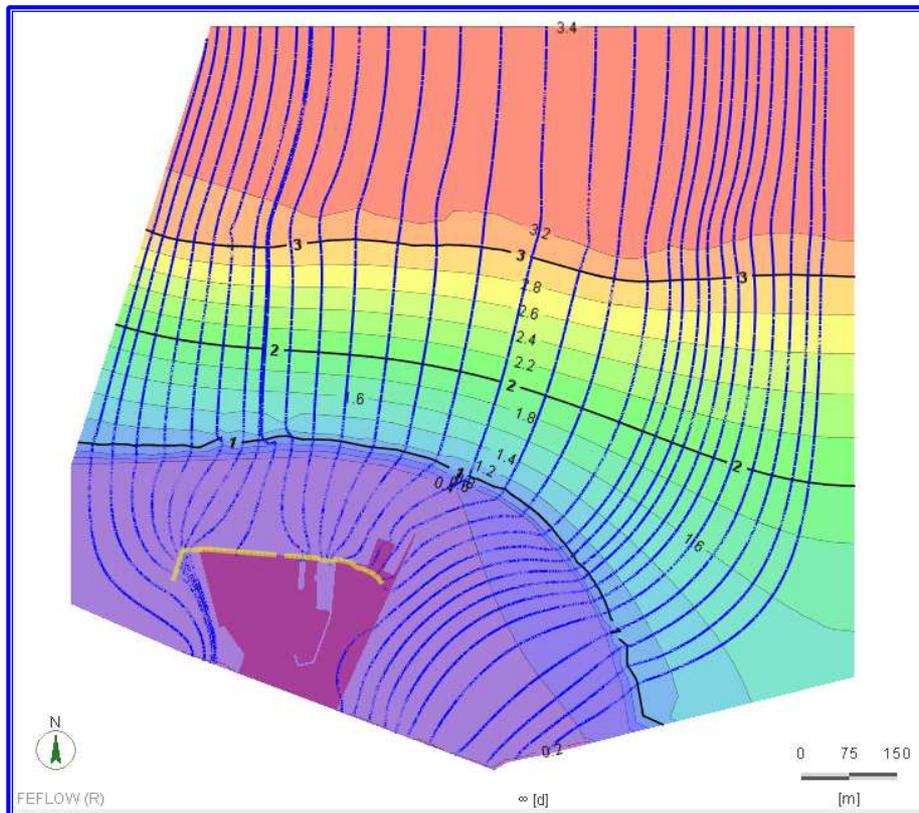


Figura 57 – SDP opzione 3: linee di flusso

Il dreno determina quindi una riduzione dell'innalzamento di falda, la quale è richiamata per quanto possibile dal dreno stesso. L'innalzamento netto di carico piezometrico in corrispondenza del porto passa quindi dai precedenti **30-35 cm** (da **0.2 m slm** a **0.5 m slm per le configurazioni di progetto opzione 1 e opzione 2**) a **20 cm** (da **0.2 m slm** a **0.4 m slm**). Ciò è ben visibile nell'immagine seguente.

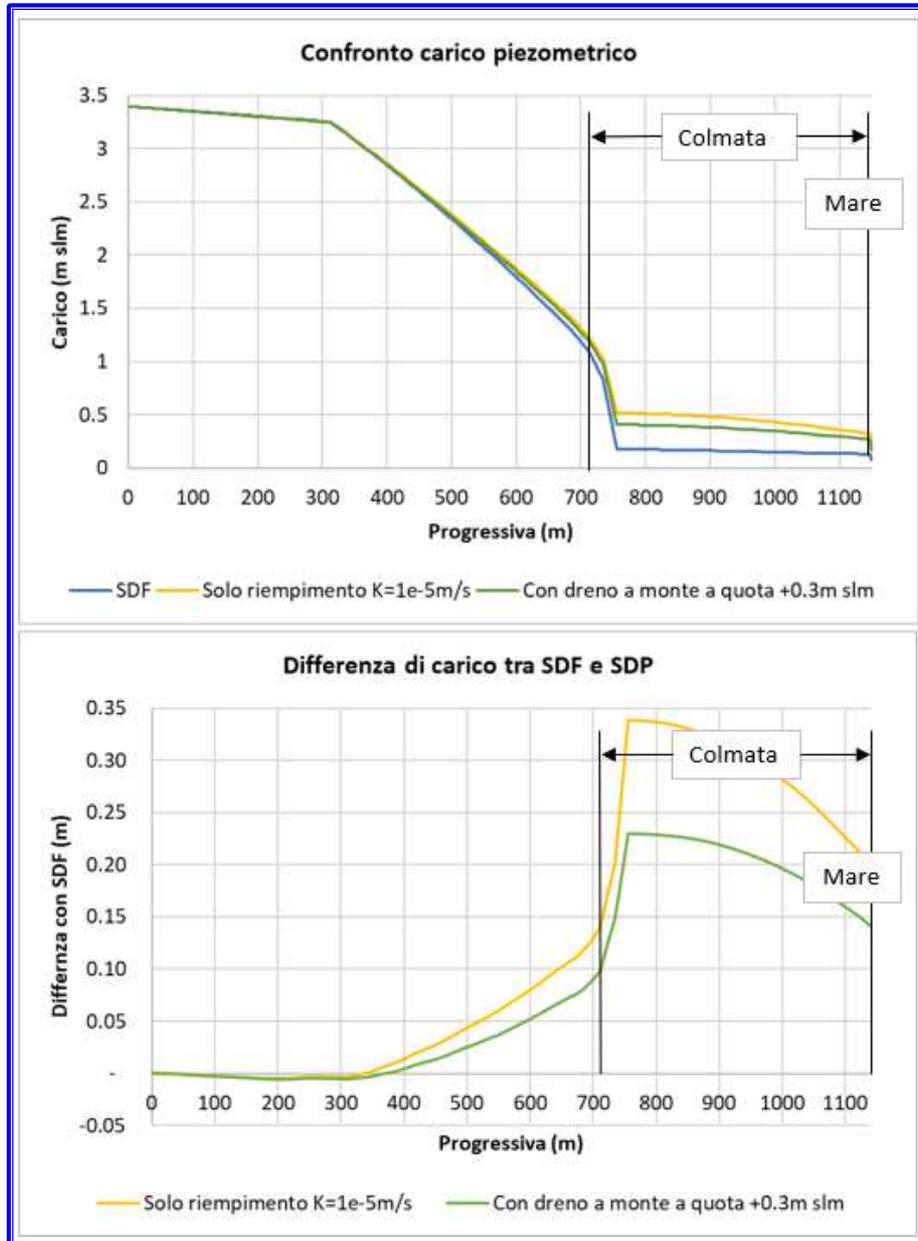


Figura 58 – Confronto tra SDF e SDP opzione 3 in termini di carico piezometrico

Per permettere l'abbassamento della falda, il dreno deve essere in grado di consentire l'asportazione di una portata di **0.9 m<sup>3</sup>/g**. L'abbassamento della falda e la variazione delle linee di flusso, determina anche una **riduzione del flusso in uscita dalle palancole di progetto, che passa dai circa 2.2 m<sup>3</sup>/g dello SDF a 0.05 m<sup>3</sup>/g nello SDP con il dreno, ovvero praticamente trascurabile. Analogamente alle opzioni 1 e 2, il restante flusso di falda proveniente da monte fuoriesce lateralmente alla colmata (freccie arancioni in Figura 59)**Figura 59).

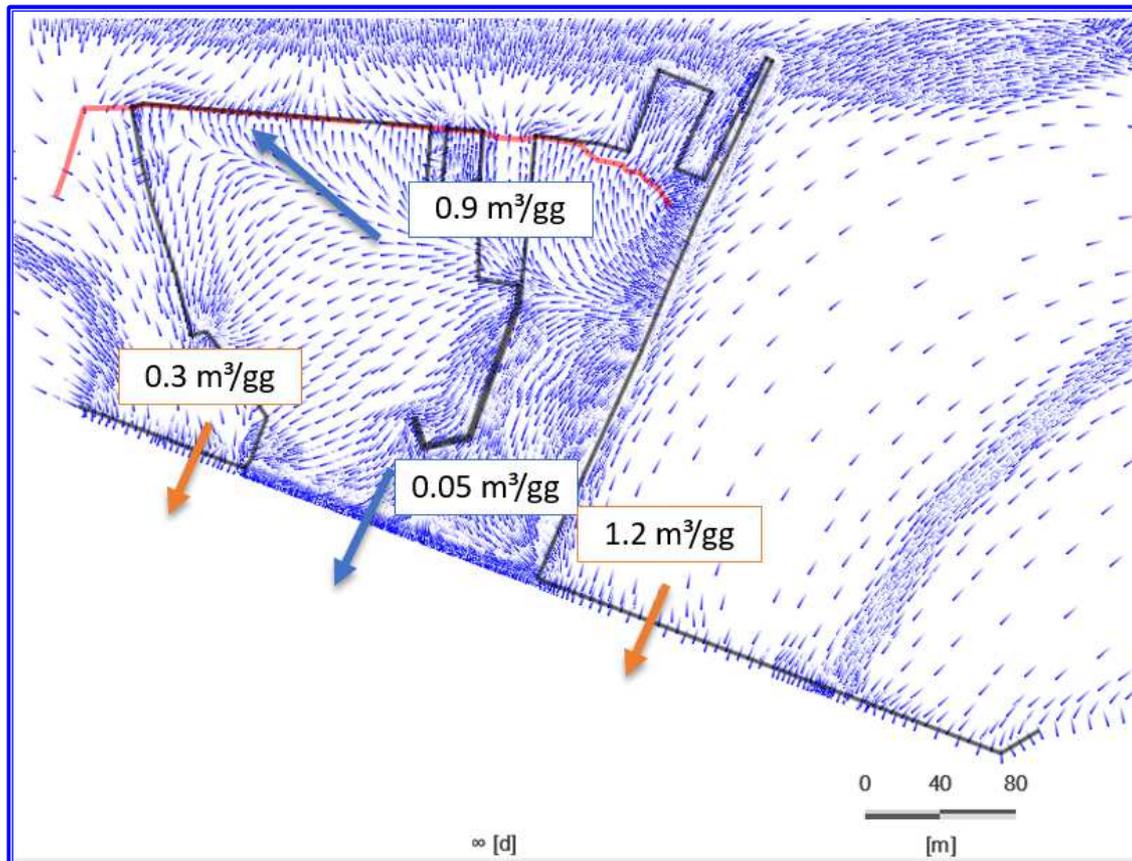


Figura 59 – SDP opzione 3: flussi netti in uscita verso il mare

### 8.2.7. Verifica dei flussi in uscita dalla colmata nel caso di aumento del gradiente della falda

Sulla base dei dati disponibili il **gradiente medio** della falda ottenuto è pari a **0.003**, calcolato dal rapporto tra la differenza di carico piezometrico tra monte (**+3.4 m slm**) e valle (**0 m slm**) e la distanza tra monte e valle pari a circa **1 km**. Tuttavia, data la limitatezza dei dati che hanno portato alla definizione delle condizioni al contorno del modello, si è analizzata una situazione **“ideale”** più estrema in termini di gradiente piezometrico, ipotizzando che esso sia pari a **0.004**, ovvero ipotizzando che la condizione al contorno di monte sia pari a **+4 m slm**. Si ritiene che tale incremento sia sufficiente per simulare una situazione **“estrema”**: **un carico piezometrico di monte maggiore porterebbe infatti ad una fuoriuscita della falda dal piano campagna** in alcuni punti del dominio essendo il piano campagna nella zona intermedia pari a circa **3-4 m slm**. Lo scopo dell’analisi è verificare quale sia l’effetto indotto da un aumento del gradiente sui flussi in uscita dal limite di valle del modello e sul carico piezometrico nella zona di intervento. La simulazione è stata condotta nella configurazione di cui all’**Opzione 3** di cui al paragrafo precedente, ovvero in presenza del dreno a monte della colmata.

La **Figura 60** mostra l’andamento del carico piezometrico in planimetria mentre la **Figura 61** mostra l’andamento della falda lungo la **Sezione 1** da **nord** a **sud** del dominio. **Si può notare che l’aumento della condizione al contorno di monte abbia influenza solamente nella parte nord e intermedia del dominio**: l’incremento di carico viene quindi dissipato prima di arrivare nella zona del porto. È infatti la condizione di

valle, sia in termini di carico imposto che in termini di permeabilità utilizzate (dei terreni limoso argillosi presenti nell'area del porto), ad influenzare maggiormente l'andamento della falda, e conseguentemente i flussi in uscita, nella zona dell'intervento.

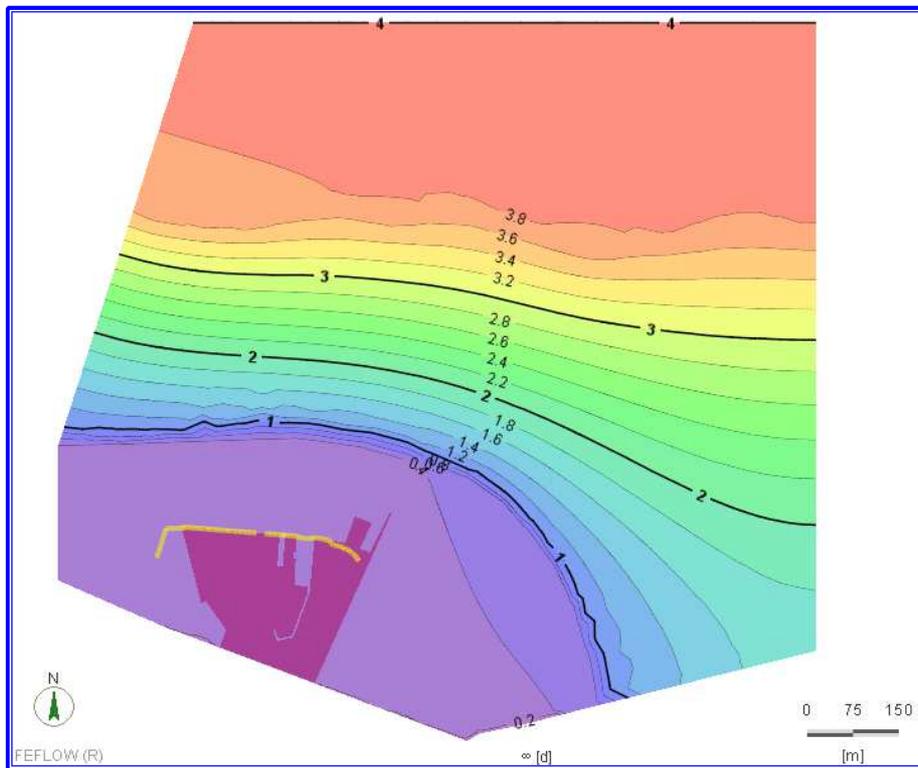


Figura 60 – Andamento delle isofreatiche con aumento del gradiente della falda

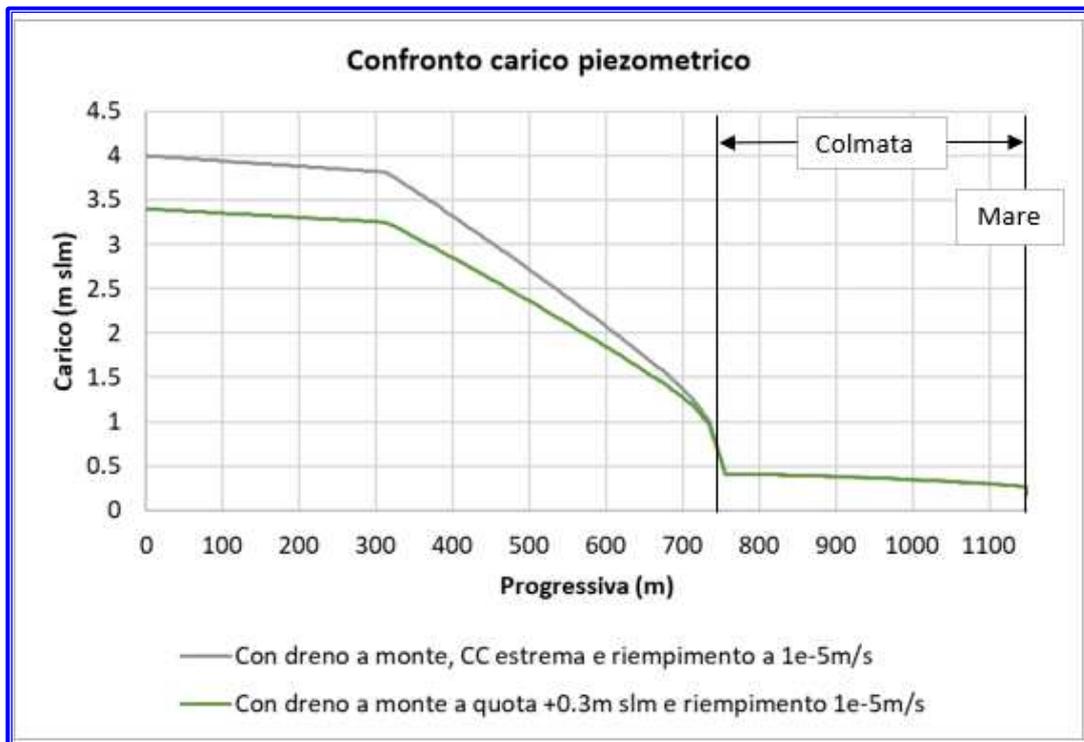


Figura 61 – Confronto in termini di carico piezometrico

*Anche in termini di flusso non si rilevano particolari differenze rispetto agli scenari analizzati precedentemente*; in particolare:

- ✚ *in ingresso al dreno la portata passa dai precedenti 0.93 m<sup>3</sup>/g a 0.95 m<sup>3</sup>/g;*
- ✚ *in uscita dalle palancole di progetto il flusso è pari a 0.05 m<sup>3</sup>/g;*
- ✚ *in uscita lateralmente alla colmata il flusso è pari a 0.3 m<sup>3</sup>/g a sinistra e 1.22 m<sup>3</sup>/g a destra.*

I valori ottenuti sono quindi sostanzialmente identici con quanto emerso nelle condizioni di progetto analizzate nei paragrafi precedenti. Quindi, ***un aumento del gradiente idraulico e in particolare della condizione al contorno di monte*** (ipotizzando fisso il livello del mare in condizioni stazionarie) ***non determina significative variazioni rispetto a quanto ottenuto negli scenari di progetto precedentemente analizzati***. I flussi in uscita e l'andamento del carico piezometrico nell'intorno dell'area di intervento risultano quindi influenzati dal livello del mare, che comunque è mantenuto fisso in condizioni stazionarie, e prevalentemente dalla conducibilità idraulica del materiale di riempimento della colmata e delle palancole di progetto. La condizione di monte, quindi, influenza principalmente la parte intermedia del dominio piuttosto che la zona dell'intervento.

### 8.3. *Considerazioni finali sui risultati del modello*

- ✚ *La presenza delle palancole e della nuova colmata non determina una significativa variazione delle direzioni di flusso e del carico piezometrico: nel caso di riempimento della colmata con materiale di cava le maggiori variazioni (30 cm rispetto allo stato attuale) si verificano nell'intorno dell'area di intervento;*
- ✚ *Con il solo riempimento della colmata con materiali aventi una permeabilità tipica dei sedimenti di dragaggio, si ottiene un aumento in termini di quota piezometrica della falda rispetto allo SDF di circa 35 cm, circoscritto alla zona del porto;*
- ✚ *In termini di portata netta in uscita lato mare lungo le palancole di progetto: il range di permeabilità del materiale componente la colmata, ma soprattutto la presenza delle palancole, permettono di ridurre la portata in uscita del 95% rispetto allo stato di fatto;*
- ✚ *L'innalzamento della falda può essere ridotto introducendo un dreno posto a monte della colmata e posto ad una quota di 0.3 m slm: tale dreno permette di ridurre l'innalzamento della falda di circa un terzo, ovvero da 35 cm (in assenza di dreno) a 20 cm.*
- ✚ *Il flusso in uscita dalla colmata è pari nello SDF a 2,2 m<sup>3</sup>/g, nello SDP pari a 0,1 m<sup>3</sup>/g (opzione 1 e 2), e nello SDP con dreno il flusso si dimezza ed è pari a 0,05 m<sup>3</sup>/g;*
- ✚ *Nello SDF si è stimato il contributo del flusso della falda in uscita dal fondale verso le acque soprastanti pari a 0,2 m<sup>3</sup>/g, 1/10 del flusso complessivo derivante dalla falda.*
- ✚ *Per lo SDP si può ritenere quindi che si possa cautelativamente mantenere lo stesso rapporto, anche se il comportamento dei flussi della falda nello SDP farebbe supporre un rapporto anche inferiore (per la presenza della palancole e del materiale di riempimento).*

## 9. **CONSIDERAZIONI SUL MONITORAGGIO**

Per analogia con quanto già monitorato da **ARPAL** negli anni passati si suggerisce, per il **Piano di Monitoraggio Ambientale** di progetto, di eseguire **campionamenti delle acque marine** nelle stazioni più prossime all'area di intervento: **PP020, PP030, PP048**. In tali stazioni dovranno essere monitorate le concentrazioni di **IC>12** e **PCB**, avendo cura di avviare tale monitoraggio prima dell'inizio della realizzazione delle opere.

Per quanto riguarda il **monitoraggio della falda** a monte della colmata si suggerisce di monitorare esclusivamente i livelli di soggiacenza in corrispondenza di uno o più piezometri tra quelli più vicini alla colmata, per valutare l'efficienza del dreno.

## 10. CONCLUSIONI

L'analisi dei dati di caratterizzazione ambientale

- ✚ Le concentrazioni puntuali dei sedimenti sul fondo della colmata presentano alcuni superamenti delle CSC<sup>21</sup> per IC>12 e PCB (superamento per destinazione d'uso industriale).
- ✚ Le concentrazioni sorgente, calcolate con UCL al 95%, sull'intero spessore di 2 m di sedimenti caratterizzati, sono inferiori a quelle per suolo ad uso industriale (IC>12 = 632,4 mg/Kg; PCB = 308,8 µg/Kg).
- ✚ Le concentrazioni di IC e PCB nelle acque interstiziali della colmata, calcolate dalla concentrazione sorgente, sono risultate pari a: IC>12 = 6,911 mg/L; PCB = 2,16 E-4 mg/L. Le concentrazioni nelle acque soprastanti sono note essere 1-2 ordini di grandezza inferiori rispetto alle acque interstiziali.

Sulla base di questi risultati *si potrebbe già concludere con impatto nullo lo studio di potenziale rischio indotto dai sedimenti del fondo della colmata per le acque soprastanti*. Si sottolinea che *impatto nullo* è valutato *in assenza di palancole* che ancor più limitano la diffusione verso l'ambiente esterno. Ciò nonostante, è stato applicato un *modello 3D* per definire le forzanti idrauliche e portate diffusive in gioco, anche con il fine di valutare possibili interazioni con la falda in ingresso da monte.

- ✚ La presenza delle palancole e della nuova colmata non determina una significativa variazione delle direzioni di flusso e del carico piezometrico: le maggiori variazioni (35 cm rispetto allo stato attuale, si verificano nell'area di intervento e le variazioni sono imputabili alla permeabilità dei materiali di riempimento che verranno utilizzati;
- ✚ In termini di portata netta in uscita lato mare lungo le palancole di progetto: il range di permeabilità del materiale componente la colmata, ma soprattutto la presenza delle palancole, permettono di ridurre la portata in uscita del 95% rispetto allo stato di fatto. In particolare, per il tratto DC<sup>22</sup> il flusso passa da circa 2 m<sup>3</sup>/g per lo stato di fatto a 0.1 m<sup>3</sup>/g per lo stato di progetto senza dreno e pari a 0,05 m<sup>3</sup>/g con il dreno.

Dal momento che l'obiettivo del presente studio è quello di valutare il potenziale rischio che i sedimenti presenti sul fondo della colmata inducono all'ambiente circostante, viene di seguito effettuata la stima del possibile contributo della matrice sedimento. Per far ciò, si tralasciano fenomeni di diluizione che inevitabilmente avvengono con le acque soprastanti, fenomeni di degradazione/adsorbimento/diagenetici all'interfaccia acqua sedimento e si ipotizza che i sedimenti rilascino le concentrazioni di *IC>12* e *PCB* presenti nelle acque interstiziali all'infinito (anche se, come visto, le *concentrazioni sorgente* sono già entro i limiti e i superamenti puntuali sono di per sé limitati). Si tralascia anche l'effetto di *capping* che

<sup>21</sup> *Concentrazioni Soglia di Contaminazione per terreni ad uso industriale, Colonna B, tabella 1 dell'Allegato 5 alla Parte Quarta, Titolo V, del D.Lgs. 152/06.*

<sup>22</sup> *Ovvero ciò che esce dalle palancole a partire dalla quota di sommità fino al fondale attuale.*

i materiali che verranno refluiti sopra i sedimenti andranno a determinare (da dati di letteratura si stima possano di fatto quasi annullare il flusso in uscita dalle acque interstiziali). *Nella valutazione che segue si estremizza quindi il flusso in uscita dalle acque interstiziali considerando che fluiscono direttamente nelle acque di colmata e da queste al mare.* E' di fatto un'estremizzazione della realtà fatta per fornire una stima molto cautelativa.

Occorre quindi valutare il flusso in uscita dalla colmata dato dal solo flusso dal fondale, che è quello che determina il potenziale rischio. Come indicato nel capitolo precedente per lo *SDF (Figura 29)*, si può cautelativamente ritenere come invariato il contributo relativo derivante dal fondale e quindi ponendo in *SDP* il flusso dal fondale e in uscita dalla colmata pari a *0,01 m<sup>3</sup>/g* (ovvero *1/10* del complessivo) lungo tutte le palancole di progetto fino alla quota di dragaggio di *-15m slm*.

Con le premesse sopra indicate, con una *concentrazione di IC>12* nelle *acque interstiziali* pari a *6,9 mg/L* ed un *flusso* di *0.01 m<sup>3</sup>/g* lungo tutta la superficie della colmata lato mare (*166 m x 15 m = 2.490 m<sup>2</sup>*), in un giorno verrebbero rilasciati *69 mg/g di IC>12*, corrispondenti a circa *28 µg m<sup>-2</sup> g<sup>-1</sup>*, un *flusso trascurabile* considerato che si diluisce a mare e che il reale contributo derivante dal sedimento è molto inferiore. Con lo stesso principio, si ottiene per i *PCB* un *flusso* di *2 µg/g*, corrispondenti a *0,8 ng m<sup>-2</sup> g<sup>-1</sup>*, un flusso trascurabile considerato che si diluisce a mare.

*In presenza di dreno tali flussi, già trascurabili seppur massimizzati per tutte le considerazioni sopra esposte, si dimezzano ulteriormente diventando pari a circa 35 mg/gg, corrispondenti a 14 µg m<sup>-2</sup> gg<sup>-1</sup> per gli Idrocarburi C>12, e 1 µg/gg, corrispondenti a 0,4 ng m<sup>-2</sup> gg<sup>-1</sup>, per i PCB.*

*Importante infine sottolineare che i flussi sopra indicati, oltre che essere estremizzati in modo cautelativo, si riferiscono a contaminanti che sono soggetti a degradazione e che nel tempo sono destinati a diminuire.*

**ALLEGATO 1**

**Elaborazione statistica con Software ProuCL 5.1 per la valutazione dell'UCL utilizzando diverse curve di distribuzione**

**IDROCARBURI >12**

**UCL Statistics for Uncensored Full Data Sets**

User Selected Options  
Date/Time of Computation ProUCL 5.112/01/2022 11:19:15  
From File per UCLS.xls  
Full Precision OFF  
Confidence Coefficient 95%  
Number of Bootstrap Operations 2000

**Idrocarburi C>12**

**General Statistics**

Total Number of Observations	57,00	Number of Distinct Observations	57,00
		Number of Missing Observations	0
Minimum	11,77	Mean	472,8
Maximum	5598	Median	227,6
SD	825,2	Std. Error of Mean	109,3
Coefficient of Variation	1,746	Skewness	4,660

**Normal GOF Test**

Shapiro Wilk Test Statistic	0,534	<b>Shapiro Wilk GOF Test</b>	
5% Shapiro Wilk P Value	0	Data Not Normal at 5% Significance Level	
Lilliefors Test Statistic	0,288	<b>Lilliefors GOF Test</b>	
5% Lilliefors Critical Value	0,117	Data Not Normal at 5% Significance Level	
<b>Data Not Normal at 5% Significance Level</b>			
<b>Assuming Normal Distribution</b>			
<b>95% Normal UCL</b>		<b>95% UCLs (Adjusted for Skewness)</b>	
95% Student's-t UCL	655,6	95% Adjusted-CLT UCL (Chen-1995)	724,6
		95% Modified-t UCL (Johnson-1978)	666,8
<b>Gamma GOF Test</b>			
A-D Test Statistic	0,864	<b>Anderson-Darling Gamma GOF Test</b>	
5% A-D Critical Value	0,799	Data Not Gamma Distributed at 5% Significance Level	
K-S Test Statistic	0,115	<b>Kolmogorov-Smirnov Gamma GOF Test</b>	
5% K-S Critical Value	0,123	Detected data appear Gamma Distributed at 5% Significance Level	
<b>Detected data follow Appr. Gamma Distribution at 5% Significance Level</b>			
<b>Gamma Statistics</b>			
k hat (MLE)	0,683	k star (bias corrected MLE)	0,659
Theta hat (MLE)	692,1	Theta star (bias corrected MLE)	717,6
nu hat (MLE)	77,87	nu star (bias corrected)	75,10
MLE Mean (bias corrected)	472,8	MLE Sd (bias corrected)	582,4
		Approximate Chi Square Value (0,0500)	56,14
Adjusted Level of Significance	0,0458	Adjusted Chi Square Value	55,72
<b>Assuming Gamma Distribution</b>			
<b>95% Approximate Gamma UCL (use when n&gt;=50)</b>	<b>632,4</b>	<b>95% Adjusted Gamma UCL (use when n&lt;50)</b>	<b>637,2</b>

**Lognormal GOF Test**

Shapiro Wilk Test Statistic	0,965
5% Shapiro Wilk P Value	0,203
Lilliefors Test Statistic	0,122
5% Lilliefors Critical Value	0,117

**Shapiro Wilk Lognormal GOF Test**

Data appear Lognormal at 5% Significance Level

**Lilliefors Lognormal GOF Test**

Data Not Lognormal at 5% Significance Level

**Data appear Approximate Lognormal at 5% Significance Level**

**Lognormal Statistics**

Minimum of Logged Data	2,466
Maximum of Logged Data	8,630

Mean of logged Data	5,271
SD of logged Data	1,422

**Assuming Lognormal Distribution**

95% H-UCL	944,5
95% Chebyshev (MVUE) UCL	1075
99% Chebyshev (MVUE) UCL	1791

90% Chebyshev (MVUE) UCL	900,8
97,5% Chebyshev (MVUE) UCL	1316

**Nonparametric Distribution Free UCL Statistics**

**Data appear to follow a Discernible Distribution at 5% Significance Level**

**Nonparametric Distribution Free UCLs**

95% CLT UCL	652,5
95% Standard Bootstrap UCL	653,2
95% Hall's Bootstrap UCL	1399
95% BCA Bootstrap UCL	781,1
90% Chebyshev(Mean, Sd) UCL	800,7
97,5% Chebyshev(Mean, Sd) UCL	1155

95% Jackknife UCL	655,6
95% Bootstrap-t UCL	811,1
95% Percentile Bootstrap UCL	650,4
95% Chebyshev(Mean, Sd) UCL	949,2
99% Chebyshev(Mean, Sd) UCL	1560

**Suggested UCL to Use**

95% Approximate Gamma UCL	632,4
---------------------------	-------

When a data set follows an approximate (e.g., normal) distribution passing one of the GOF test  
 When applicable, it is suggested to use a UCL based upon a distribution (e.g., gamma) passing both GOF tests in ProUCL

Note: Suggestions regarding the selection of a 95% UCL are provided to help the user to select the most appropriate 95% UCL.  
 Recommendations are based upon data size, data distribution, and skewness.

These recommendations are based upon the results of the simulation studies summarized in Singh, Maichle, and Lee (2006).  
 However, simulations results will not cover all Real World data sets; for additional insight the user may want to consult a statistician.

### SOMMATORIA PCB

#### UCL Statistics for Uncensored Full Data Sets

User Selected Options  
 Date/Time of Computation ProUCL 5.112/01/2022 11:41:43  
 From File per UCLS.xls  
 Full Precision OFF  
 Confidence Coefficient 95%  
 Number of Bootstrap Operations 2000

#### Somma PCB

<b>General Statistics</b>			
Total Number of Observations	57,00	Number of Distinct Observations	57,00
		Number of Missing Observations	0
Minimum	0,446	Mean	246,5
Maximum	7312	Median	37,97

SD	1040	Std. Error of Mean	137,8
Coefficient of Variation	4,220	Skewness	6,195
<b>Normal GOF Test</b>			
Shapiro Wilk Test Statistic	0,244	<b>Shapiro Wilk GOF Test</b>	
5% Shapiro Wilk P Value	0	Data Not Normal at 5% Significance Level	
Lilliefors Test Statistic	0,429	<b>Lilliefors GOF Test</b>	
5% Lilliefors Critical Value	0,117	Data Not Normal at 5% Significance Level	
<b>Data Not Normal at 5% Significance Level</b>			
<b>Assuming Normal Distribution</b>			
<b>95% Normal UCL</b>		<b>95% UCLs (Adjusted for Skewness)</b>	
95% Student's-t UCL	476,9	95% Adjusted-CLT UCL (Chen-1995)	593,9
		95% Modified-t UCL (Johnson-1978)	495,7
<b>Gamma GOF Test</b>			
A-D Test Statistic	6,321	<b>Anderson-Darling Gamma GOF Test</b>	
5% A-D Critical Value	0,851	Data Not Gamma Distributed at 5% Significance Level	
K-S Test Statistic	0,258	<b>Kolmogorov-Smirnov Gamma GOF Test</b>	
5% K-S Critical Value	0,127	Data Not Gamma Distributed at 5% Significance Level	
<b>Data Not Gamma Distributed at 5% Significance Level</b>			
<b>Gamma Statistics</b>			
k hat (MLE)	0,349	k star (bias corrected MLE)	0,342
Theta hat (MLE)	706,5	Theta star (bias corrected MLE)	720,3
nu hat (MLE)	39,77	nu star (bias corrected)	39,01
MLE Mean (bias corrected)	246,5	MLE Sd (bias corrected)	421,3
		Approximate Chi Square Value (0,0500)	25,70
Adjusted Level of Significance	0,0458	Adjusted Chi Square Value	25,42

<b>Assuming Gamma Distribution</b>			
95% Approximate Gamma UCL (use when n>=50))	374,1	95% Adjusted Gamma UCL (use when n<50)	378,2
<b>Lognormal GOF Test</b>			
Shapiro Wilk Test Statistic	0,968	<b>Shapiro Wilk Lognormal GOF Test</b>	
5% Shapiro Wilk P Value	0,277	Data appear Lognormal at 5% Significance Level	
Lilliefors Test Statistic	0,0938	<b>Lilliefors Lognormal GOF Test</b>	
5% Lilliefors Critical Value	0,117	Data appear Lognormal at 5% Significance Level	
<b>Data appear Lognormal at 5% Significance Level</b>			
<b>Lognormal Statistics</b>			
Minimum of Logged Data	-0,807	Mean of logged Data	3,579
Maximum of Logged Data	8,897	SD of logged Data	1,652
<b>Assuming Lognormal Distribution</b>			
95% H-UCL	289,7	90% Chebyshev (MVUE) UCL	254,0
95% Chebyshev (MVUE) UCL	308,8	97,5% Chebyshev (MVUE) UCL	385,0
99% Chebyshev (MVUE) UCL	534,5		
<b>Nonparametric Distribution Free UCL Statistics</b>			
<b>Data appear to follow a Discernible Distribution at 5% Significance Level</b>			
<b>Nonparametric Distribution Free UCLs</b>			
95% CLT UCL	473,1	95% Jackknife UCL	476,9
95% Standard Bootstrap UCL	478,4	95% Bootstrap-t UCL	2510
95% Hall's Bootstrap UCL	1538	95% Percentile Bootstrap UCL	498,3
95% BCA Bootstrap UCL	672,2		
90% Chebyshev(Mean, Sd) UCL	659,8	95% Chebyshev(Mean, Sd) UCL	847,0

97,5% Chebyshev(Mean, Sd) UCL 1107

99% Chebyshev(Mean, Sd) UCL 1617

**Suggested UCL to Use**

95% H-UCL 289,7

Note: Suggestions regarding the selection of a 95% UCL are provided to help the user to select the most appropriate 95% UCL.

Recommendations are based upon data size, data distribution, and skewness.

These recommendations are based upon the results of the simulation studies summarized in Singh, Maichle, and Lee (2006). However, simulations results will not cover all Real World data sets; for additional insight the user may want to consult a statistician.

**ProUCL computes and outputs H-statistic based UCLs for historical reasons only.**

**H-statistic often results in unstable (both high and low) values of UCL95 as shown in examples in the Technical Guide.**

**It is therefore recommended to avoid the use of H-statistic based 95% UCLs.**

**Use of nonparametric methods are preferred to compute UCL95 for skewed data sets which do not follow a gamma distribution.**