

**MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI**

**UFFICIO DEL GENIO CIVILE  
PER LE OPERE MARITTIME  
DI TRIESTE**

**PIANO DI CARATTERIZZAZIONE  
DELLA CASSA DI COLMATA  
NEL PORTO DI MONFALCONE**



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DI TRIESTE  
Dipartimento di Geoscienze



**DiGeo**  
www.geoscienze.units.it

---

Dipartimento di Geoscienze - Via Edoardo Weiss 2, 34128 Trieste ITALY  
Segreteria Tel. +39 040 558 2045/2246; Fax 2048 P. Iva 00211830328 - Cod. Fisc. 80013890324

**TRIESTE - GIUGNO 2010**



## PIANO DI CARATTERIZZAZIONE DELLA CASSA DI COLMATA NEL PORTO DI MONFALCONE

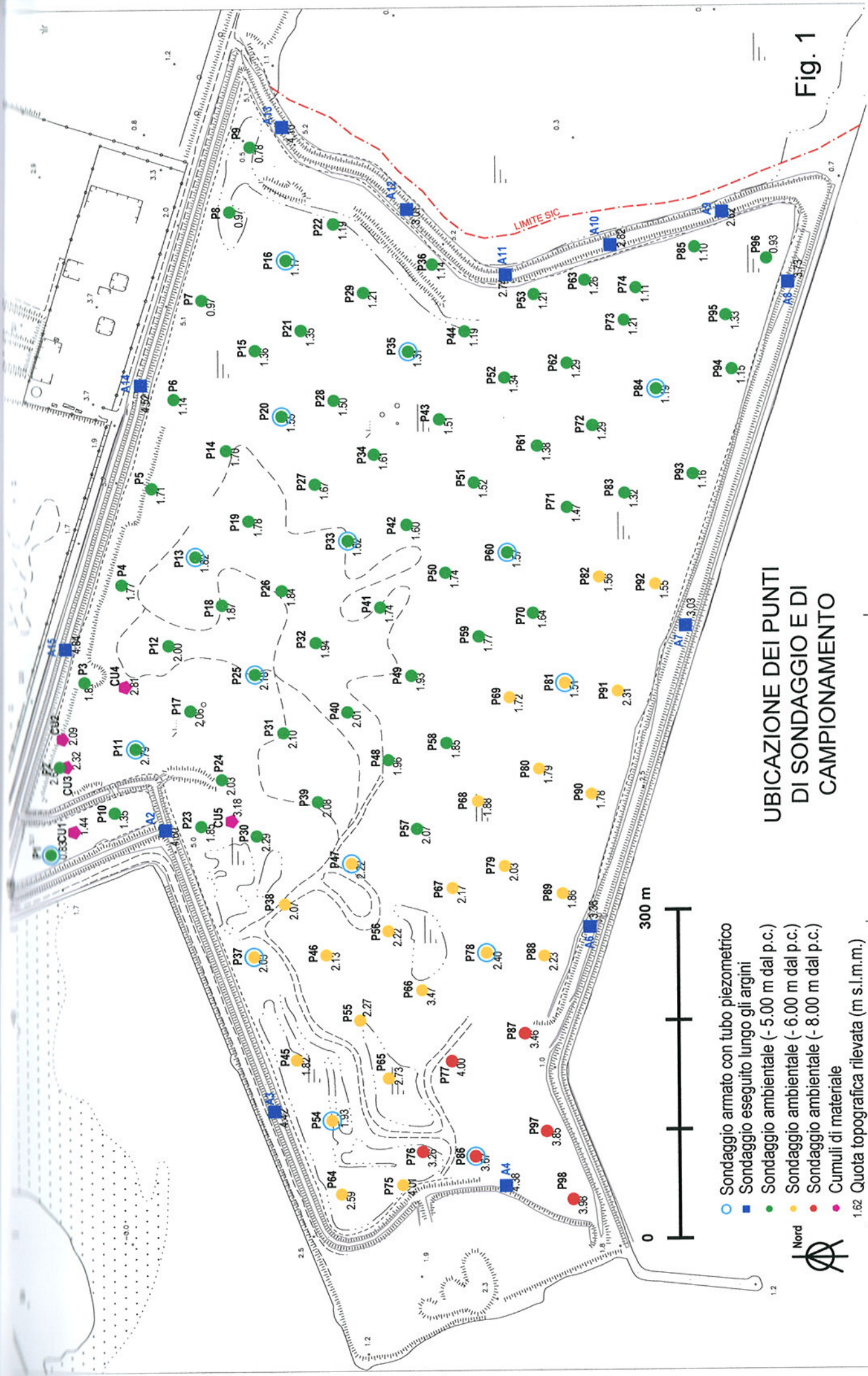
### 1. PREMESSA

L'Ufficio del Genio Civile Opere Marittime di Trieste, in data 22 aprile 2004, ha affidato al Dipartimento di Scienze Geologiche Ambientali e Marine dell'Università di Trieste - DISGAM (attualmente Dipartimento di Geoscienze - DIGEO) l'incarico per una collaborazione tecnico-scientifica relativa alla elaborazione del piano di caratterizzazione della cassa di colmata del Porto di Monfalcone (Fig. 1).

Il piano, mediante la programmazione e l'esecuzione di una serie di indagini, era volto alla definizione del tipo, grado ed estensione dell'eventuale inquinamento dei sedimenti e delle acque sotterranee del sito in esame in base al Decreto Legislativo del 3 aprile 2006, n. 152.

Il piano, approvato dalla Regione Friuli Venezia Giulia, Direzione Regionale dell'Ambiente con nota n° ALP. 9 3166-GO/RIP/I del 23.01.2004, è basato su una campagna di prospezioni geognostiche, con prelievo di campioni di terreno e di acqua di falda sui quali sono state eseguite le analisi di laboratorio, finalizzate all'accertamento di sostanze potenzialmente inquinanti presenti. I lavori in campo sono iniziati l'1/9/2009 e sono terminati il 20/10/2009.

Fig. 1



**UBICAZIONE DEI PUNTI  
DI SONDAGGIO E DI  
CAMPIONAMENTO**

- Sondaggio armato con tubo piezometrico
  - Sondaggio eseguito lungo gli argini
  - Sondaggio ambientale (- 5.00 m dal p.c.)
  - Sondaggio ambientale (- 6.00 m dal p.c.)
  - Sondaggio ambientale (- 8.00 m dal p.c.)
  - Cumuli di materiale
- 1.62 Quota topografica rilevata (m s.l.m.m.)





Le società e gli enti che hanno partecipato al lavoro di campagna sono le seguenti: il DISGAM, mediante sopralluoghi e controlli, ha seguito le indagini; i sondaggi sono stati effettuati dalla società PROTER di Santa Giustina (BL); la società GEOSYNTECH di Trieste (ditta incaricata delle attività di indagine ambientale) ha curato la georeferenziazione dei punti di sondaggio, ha collaborato alle operazioni di perforazione, di prelievo e preparazione dei campioni per le analisi di laboratorio, ha compilato i log stratigrafici; la società THEOLAB di Volpiano (TO) ha curato la preparazione e la spedizione al laboratorio dei campioni ed ha eseguito le analisi. Tutte le operazioni sono state condotte con la supervisione dell'ARPA (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia) del Dipartimento di Gorizia che ha anche preparato ed analizzato i campioni prelevati per la loro validazione.

Per quanto riguarda le procedure e i risultati delle indagini effettuate in campo e delle analisi di laboratorio si rimanda alle dettagliate relazioni tecniche della PROTER ("Lavori di esecuzione di indagini per la caratterizzazione dei sedimenti in attuazione al piano di caratterizzazione approvato dalla regione Friuli-Venezia Giulia con decreto ALP. 8/2981/GO/BSI/20 del 7/12/2006 - CIG 007748891C") e della THEOLAB ("Attività di esecuzione di analisi di sedimenti in attuazione al piano di caratterizzazione approvato dalla regione Friuli Venezia Giulia con decreto n. ALP. 8/2981/GO/BSI/20 del 07/12/2006").

Qui di seguito, dopo una breve descrizione sintetica del lavoro complessivo eseguito, vengono presentate le conclusioni risultanti dai dati ottenuti.



## **2. DESTINAZIONI D'USO DEL SITO**

L'area della cassa di colmata ricade per la quasi totalità nella p.c. 1176/1 e in piccolissima parte nella p.c. 1176/2 del F.M. 11-14 del C.C. di Monfalcone.

Il certificato di destinazione urbanistica delle particelle evidenzia che il PRGC (approvato con D.P.G.R. 052/Pres. del 1/3/2000 ed entrato in vigore il 23/3/2000) classifica la p.c. 1176/1 in Zona Omogenea L1-N1 e la p.c. 1176/2 in zona D1 a-b.

Quindi, poiché la destinazione d'uso del sito ricade nelle predette categorie del Piano Regolatore di pertinenza, i risultati delle analisi chimiche effettuate sono state confrontate con le concentrazioni limite accettabili per i siti ad uso commerciale o industriale, previsti dal Decreto Legislativo 152/06.



### 3. INDAGINI ESEGUITE IN CAMPO

Le procedure operative relative ai sondaggi, ai prelievi dei campioni e alle analisi di laboratorio sono state eseguite con le modalità previste dai “Metodi Ufficiali di analisi chimica del suolo”, pubblicati dal Ministero delle Politiche Agricole e Forestali con D.M. 13 settembre 1999, dal “Piano di caratterizzazione ambientale”, dal Capitolato Tecnico di gara e dal Protocollo Operativo di campionamento, quest’ultimo definito nell’incontro tecnico di coordinamento svoltosi in data 25.08.2009 al quale hanno partecipato il Genio Civile Opere Marittime, il DISGAM, l’ARPA, la GEOSYNTECH, la PROTER e il THEOLAB.

Le operazioni di campionamento dei terreni e delle acque di falda sono state effettuate dal personale della PROTER e della GEOSYNTECH, con la collaborazione degli operatori della THEOLAB, in presenza dei funzionari dell’A.R.P.A. di Gorizia.

Per ubicare i sondaggi, all’interno della cassa e sugli argini, e i punti di campionamento nei cosiddetti “cumuli” di materiali vari situati nel settore nord-occidentale del sito, mediante stazione GPS in metodologia RTK è stato eseguito un rilievo topografico in coordinate assolute Gauss-Boaga riferito al caposaldo “VM01” presente all’interno del porto di Monfalcone. Le coordinate dei punti d’indagine sono indicate in tabella nella “Relazione conclusiva” presentata dalla PROTER. Le ubicazioni planimetriche nell’ambito della cassa sono riportate nella Fig. 1. Le sigle identificative sono numeri preceduti da lettere: i sondaggi contrassegnati con la lettera “P” sono stati eseguiti all’interno della Cassa, quelli con la lettera “A” sono stati eseguiti in corrispondenza degli argini. Infine, la sigla “CU” identifica i punti dei cumuli campionati.



### 3.1 PRELIEVO DEI CAMPIONI DI TERRENO

Il piano di caratterizzazione, come già detto, è stato elaborato in base alle norme del DM 471/99 e, soprattutto, del D. LGS. 152/2006, secondo le quali i numeri e le modalità dei campionamenti dipendono dall'estensione della zona in esame e poiché questa è pari a 410.000 mq circa, sono stati programmati 98 sondaggi meccanici, posizionati in coppie all'interno dei riquadri di una maglia di 91 m di lato (Fig. 1).

Per avere la certezza di penetrare, e quindi campionare, il sedimento naturale a fondo pozzo, è stato necessario spingere i carotaggi, a seconda dei casi, fino a profondità comprese tra 5 e 8 m. Complessivamente sono stati eseguiti 67 sondaggi profondi 5 m, 25 sondaggi profondi 6 m e 6 sondaggi profondi 8 m. Le colonne stratigrafiche dei sondaggi sono riportate nella "Relazione conclusiva" della PROTER.

I campioni di sedimento destinati alle analisi di laboratorio sono stati prelevati alle seguenti profondità rispetto al piano campagna (Fig. 1).

In 47 sondaggi 3 campioni a -0,5 m, -1,5 m e a fondo pozzo.

In 47 sondaggi 4 campioni a -0,5 m, -1,5 m, -2,5 m e a fondo pozzo.

In 4 sondaggi 5 campioni a -0,5 m, -1,5 m, -2,5 m, -3,5 m e a fondo pozzo.

I campioni di terreno, opportunamente prelevati e conservati, sono stati successivamente sottoposti ad analisi di laboratorio allo scopo di verificare le concentrazioni degli analiti (composti inorganici, composti organici e altre sostanze) per confrontarle con i limiti dell'All. 5 – Tab. 1 - Parte IV - Titolo V del D. LGS. 152/2006.

In particolare, come risulta specificato nella "Relazione conclusiva" della PROTER, dai materiali prelevati nel corso della perforazione, disposti nelle cassette catalogatrici, sono stati preparati i campioni destinati alla determinazione dei composti volatili.

Il materiale così campionato è stato confezionato all'interno di un contenitore (*Vial*) da 20 cc, sigillato e conservato in frigo a temperatura inferiore a 4°C.



Dalle cassette catalogatrici, nell'intorno del punto medio di campionamento del "Vial", è stata prelevata una sezione di carota di spessore variabile in relazione al quantitativo necessario per la conduzione delle analisi previste. Ogni campione prelevato è stato preventivamente sottoposto ad omogeneizzazione; la procedura è consistita nella selezione preventiva del materiale a granulometria maggiore di 2 cm, con successiva quartatura e suddivisione del materiale residuo utile alla formazione di tre aliquote, rispettivamente denominate aliquota "A", destinata alle analisi svolte dal laboratorio THEOLAB, aliquota "B" riservata alle analisi di validazione sul 10% del totale dei campioni prelevati da parte dell'A.R.P.A. e aliquota "C" per le eventuali analisi in contraddittorio. I campioni così formati sono stati sigillati in contenitori decontaminati di vetro, conservati in box frigo termoisolati a temperatura di 4 °C in attesa della loro spedizione al laboratorio.

Le spedizioni sono state effettuate alla conclusione di ogni singola giornata di campionamento, consentendo così al laboratorio di condurre le analisi entro le 72 ore successive al prelievo.

A completamento delle indagini sui terreni, particolare attenzione è stata rivolta ai cumuli presenti nel settore nord-occidentale della cassa, risultato dello sversamento di materiali vari in prossimità dell'ingresso del sito (Fig 1). Per individuare le loro caratteristiche, nel corso di un sopralluogo, in accordo con l'ARPA sono state prescelte 5 aree rappresentative della natura di questi materiali. All'interno, in un quadrato di 5 m di lato, sono stati prelevati 10 sub-campioni per la formazione di un campione medio. Per questi 5 prelievi sono state seguite le stesse procedure di conservazione e di analisi applicate ai campioni di terreno dei sondaggi.

I sub-campioni sono stati prelevati in corrispondenza dei vertici del quadrato, del punto medio di ogni lato ed in prossimità delle intersezioni delle diagonali. Il campione omogeneizzato e quartato, è stato confezionato in tre diverse aliquote con le modalità già descritte.





Infine, in corrispondenza di 4 dei 16 sondaggi eseguiti lungo gli argini sono stati prelevati campioni indisturbati destinati al laboratorio geotecnico per la determinazione della permeabilità a carico costante in cella triassiale. Per il prelievo è stato utilizzato un campionatore a pareti sottili tipo Shelby.

### **3.2 PRELIEVO DEI CAMPIONI DI ACQUA DI FALDA**

In corrispondenza di 16 fori di sondaggio dei 98 eseguiti all'interno della cassa sono stati posti in opera tubi piezometrici microfessurati per il controllo del livello della falda e per il prelievo di campioni di acqua (Fig. 1).

Operativamente (cfr. "Relazione conclusiva" presentata dalla PROTER), dopo l'esecuzione della misura del livello dell'acqua, in ognuno dei 16 piezometri è stato prelevato un campione per la determinazione di tutti gli analiti dell'All. 5 - Tab. 2 - Parte IV - Titolo V del D. Lgs. 152/06. Le quote del prelievo variano da +0,17 a -2,33 m rispetto al l.m.m.

Successivamente allo spurgo di acqua pari ad almeno 3 volte il volume contenuto nel piezometro, sono stati effettuati i campionamenti mediante una pompa elettrica sommergibile prelevando una quantità di liquido sufficiente alla formazione di un'aliquota. Le aliquote rappresentative dei controcampioni di validazione prelevate dall'A.R.P.A. sono state prelevate da 4 piezometri scelti nell'ambito dei 16 presenti nell'area di indagine.

All'inizio delle operazioni di campionamento è stata avvinata tutta la vetreria utilizzata. Per le procedure di filtrazione e stabilizzazione, sono state adottate le indicazioni fornite dal laboratorio. Infine, i campioni sono stati riposti in contenitori coibentati e mantenuti a temperatura di circa 4° C, e successivamente avviati a laboratorio per l'esecuzione delle analisi entro le 72 ore successive alla loro formazione.



### **3.3 MISURE DI PERMEABILITÀ DEI TERRENI SOTTOSTANTI GLI ARGINI**

Per definire le caratteristiche di permeabilità dei terreni, in corrispondenza degli argini sono stati eseguiti 14 sondaggi, spinti sino alla profondità di 7 m dal p.c. (Fig. 1). In 10 di questi fori sono state effettuate prove tipo Lefranc a carico variabile. Nei 4 sondaggi rimanenti, mediante campionatori a pareti sottili tipo *Shelby*, è stato prelevato un campione indisturbato per le prove di permeabilità in cella triassiale del laboratorio geotecnico. I valori di permeabilità, espressi in m/s, sono presentati nelle pagine seguenti in Tab. 5.

### **3.4 MISURE DI SALINITÀ DELLE ACQUE DI FALDA**

La salinità delle acque di falda è stata determinata *in situ* in corrispondenza dei piezometri installati nei sondaggi. I valori rilevati, misurati in  $\mu\text{S}/\text{cm}-25\text{-C}$ , successivamente sono stati ricalcolati in unità g/l e presentati nelle pagine seguenti in Tab. 4,



#### 4. ANALISI DI LABORATORIO

##### 4.1 ANALISI CHIMICHE DEI CAMPIONI DI TERRENO

Le analisi chimiche sui campioni di terreno prelevati nei sondaggi e nei “cumuli” sono state effettuate dalla ditta THEOLAB. Qui di seguito si fornisce una brevissima descrizione sulle tecniche adottate in laboratorio; per maggiori dettagli sull’esecuzione si rimanda alla relazione della THEOLAB.

##### *IDROCARBURI TOTALI:*

Sono stati determinati mediante tecnica FT-IR su campione essiccato e vagliato a 2 mm, con estrazione in solvente e successiva purificazione dell’estratto su Florisil. È stato utilizzato il metodo EPA 8440 con taratura in gasolio.

##### *METALLI:*

Per tutti i parametri è stata utilizzata la tecnica ICP/MS; per quanto riguarda la preparazione, si è proceduto con mineralizzazione in microonde con acido nitrico concentrato.

##### *PCB:*

Sono stati determinati mediante tecnica ECD, con quantificazione mediante miscele Aroclor (Aroclor 1016, 1221, 1232, 1242, 1248, 1254 e 1260).

##### *COMPOSTI VOLATILI ALOGENATI:*

E’ stata utilizzata la tecnica GC/MS P&T.



#### *COMPOSTI SEMIVOLATILI:*

Per IPA e pesticidi è stata utilizzata tecnica GC/MS.

Laddove richiesto, nei campioni di terreno l'amianto è stato ricercato come amianto totale e non come fibre libere, mediante diffrattometria a raggi X (XRD) o mediante I.R. Trasformata di Fourier (FTIR), indicando la procedura analitica utilizzata.

Il parametro cianuri è stato ricercato come "cianuri totali", secondo quanto indicato con Nota dell'I.S.S. Prot. n° 26619 IA/12 del 19.05.2003.

Le analisi sui campioni di terreno sono state effettuate sulla frazione granulometrica passante al vaglio 2 mm e ad essa soltanto riferiti i dati analitici di confronto con i limiti tabellari definiti dal D. Lgs 152/06. I limiti di rilevabilità sono stati esplicitati e sono risultati circa 10 volte inferiori rispetto i limiti del D. Lgs 152/06.

I risultati analitici finali sono stati espressi "sul totale e sul secco a 105", secondo il D. Lgs 152/06, con riferimento ai limiti della Colonna B.

#### **4.2 ANALISI CHIMICHE DEI CAMPIONI DI ACQUA DI FALDA**

Le analisi chimiche sui campioni di acqua di falda sono state effettuate dalla ditta THEOLAB, alla cui relazione si rimanda per i dettagli sulle tecniche adottate in laboratorio.

Si precisa che le analisi sui campioni di acqua prelevati nei 16 piezometri hanno riguardato gli analiti di cui all'Allegato 5 - Tabella 2 - Colonna B - Parte IV - Titolo V del D. Lgs. 152/06, inclusi diossine e furani (PCDD/PCDF). Il parametro cianuri è stato ricercato come "cianuri totali", secondo quanto indicato con Nota dell'I.S.S. Prot. n° 26619 IA/12 del 19.05.2003.



### 4.3 ANALISI GRANULOMETRICHE E ANALISI DEL CONTENUTO DI CARBONATO DI CALCIO NEI CAMPIONI DI TERRENO

Sui 354 campioni di terreno prelevati nella cassa è stata eseguita l'analisi granulometrica, mediante setacciatura a umido per le frazioni più grossolane e pipetta per le frazioni più fini.

La classificazione granulometrica utilizzata è riportata nella seguente Tab. 1:

|                          |                 |
|--------------------------|-----------------|
| argilla                  | <0,002 mm       |
| limo fine                | 0,002 - 0,02 mm |
| limo grosso              | 0,02 - 0,06 mm  |
| sabbia fine e molto fine | 0,06 - 0,2 mm   |
| sabbia media             | 0,2 - 0,5 mm    |
| sabbia grossa            | 0,5 - 1,0 mm    |
| sabbia molto grossa      | 1,0 - 2,0 mm    |
| ghiaia                   | >2,0 mm         |

Inoltre, mediante calcimetro, è stata eseguita la determinazione del contenuto di carbonato di calcio nei campioni.

### 4.4 ANALISI GEOTECNICHE DEI CAMPIONI DI TERRENO

In corrispondenza dei sondaggi A3, A7, A11 e A15, eseguiti sugli argini, mediante campionatori a pareti sottili tipo Shelby, sono stati prelevati 4 campioni indisturbati destinati al laboratorio geotecnico per l'esecuzione di prove di permeabilità in cella triassiale.



## 5. RISULTATI DELLE INDAGINI

### 5.1 CARATTERISTICHE CHIMICHE DEI TERRENI

In base alle analisi eseguite su 349 campioni di terreno, prelevati nei 98 sondaggi e nei 5 “cumuli” (cfr. relazione THEOLAB), risulta che le caratteristiche chimiche dei terreni rientrano pienamente nei limiti indicati nell’Allegato 5 - Tabella 1 - Colonna B - Parte IV - Titolo V del D.Lgs 152/06.

### 5.2 CARATTERISTICHE CHIMICHE DELLE ACQUE DI FALDA

I risultati mostrano che tutti i 16 campioni di acqua di falda prelevati nei piezometri non sono conformi ai limiti della 152/06 (cfr. per i dettagli la relazione THEOLAB).

In Tab. 2 sono riportati i valori limite imposti dalla legge per i contenuti delle acque di falda, gli analiti risultati fuori norma e, dei singoli campioni, i valori eccedenti i limiti, evidenziati in colore.

In particolare, gli analiti che superano i limiti sono complessivamente 13: *solfiti, manganese, PCB, ferro, boro, nichel, arsenico, piombo, benzo(a)pirene, benzo(g,h,i)perilene, 1,2,3-tricloropropano, 1,2-dibromoetano, cloroformio*, distribuiti in vario modo nell’ambito dei 16 campioni.

In particolare, sono 4 gli analiti fuori norma presenti in tutti i 16 campioni esaminati: *solfiti, 1,2,3-tricloropropano, 1,2-dibromoetano e manganese*. Valori non conformi di boro e di ferro caratterizzano rispettivamente 14 e 13 dei 16 campioni esaminati, mentre i restanti 7 analiti interessano un numero nettamente inferiore di campioni (da 7 a 2).

Il campione che presenta il maggior numero di analiti fuori norma (10) è quello prelevato nel sondaggio P1 (posto all’estremità nord-occidentale della cassa), in subordine con 9 analiti fuori norma, troviamo i campioni dei sondaggi P13, P20 e P33 (posti nella parte centro-settentrionale della cassa); quelli meno

Tabella 2

**ANALITI FUORI LIMITE NELLE ACQUE DI FALDA**  
(in colore giallo i campioni aventi valori eccedenti la normativa vigente)

| Analita   | solfati |            | arsenico |    | ferro |     | manganese |    | nichel |    | piombo |    | boro |      | PCB       |      | 1,2,3-tricloropropano |       | 1,2-dibromoetano |       | cloroformio |      | benzo[a]pirene |      | benzo[g,h,i]perilene |      |
|-----------|---------|------------|----------|----|-------|-----|-----------|----|--------|----|--------|----|------|------|-----------|------|-----------------------|-------|------------------|-------|-------------|------|----------------|------|----------------------|------|
|           | µg/l    | Limite Max | µg/l     | 10 | µg/l  | 200 | µg/l      | 50 | µg/l   | 20 | µg/l   | 10 | µg/l | 1000 | µg/l      | 0.01 | µg/l                  | 0.001 | µg/l             | 0.001 | µg/l        | 0.15 | µg/l           | 0.01 | µg/l                 | 0.01 |
| <b>1</b>  | 1340000 |            | 16.3     |    | 2470  |     | 2650      |    | 74.7   |    | 0.28   |    | 1960 |      | 0.011200  |      | <0.0312               |       | <0.0263          |       | 0.0810      |      | 0.0133         |      | 0.00675              |      |
| <b>11</b> | 2010000 |            | 5.47     |    | 3790  |     | 2430      |    | 40.5   |    | 0.46   |    | 3030 |      | 0.000457  |      | <0.0312               |       | <0.0263          |       | <0.0244     |      | 0.0144         |      | 0.00825              |      |
| <b>13</b> | 5160000 |            | 9.66     |    | 7990  |     | 3860      |    | 48.7   |    | 0.28   |    | 6390 |      | <0.000508 |      | <0.0312               |       | <0.0263          |       | <0.0244     |      | 0.0191         |      | 0.0139               |      |
| <b>16</b> | 4140000 |            | 15.8     |    | 1600  |     | 2380      |    | 39.3   |    | 0.35   |    | 7070 |      | <0.000508 |      | <0.0312               |       | <0.0263          |       | <0.0244     |      | 0.00371        |      | 0.00282              |      |
| <b>20</b> | 1090000 |            | 13.1     |    | 336   |     | 1670      |    | 20.6   |    | 37.80  |    | 6730 |      | <0.000508 |      | <0.0312               |       | <0.0263          |       | <0.0244     |      | 0.00371        |      | 0.00282              |      |
| <b>25</b> | 654000  |            | 11.2     |    | 78    |     | 703       |    | 16.0   |    | 0.34   |    | 916  |      | <0.000508 |      | <0.0312               |       | <0.0263          |       | <0.0244     |      | 0.00371        |      | 0.0112               |      |
| <b>33</b> | 4660000 |            | 15.6     |    | 5680  |     | 2630      |    | 65.6   |    | 18.00  |    | 6480 |      | <0.000508 |      | <0.0312               |       | <0.0263          |       | <0.0244     |      | 0.00371        |      | 0.00282              |      |
| <b>35</b> | 2550000 |            | 4.05     |    | 3720  |     | 1910      |    | 19.2   |    | <0.21  |    | 3650 |      | <0.000508 |      | <0.0312               |       | <0.0263          |       | <0.0244     |      | 0.00371        |      | 0.00282              |      |
| <b>37</b> | 1480000 |            | 14.7     |    | 390   |     | 500       |    | 3.5    |    | 0.53   |    | 1860 |      | <0.000508 |      | <0.0312               |       | <0.0263          |       | <0.0244     |      | <0.00185       |      | <0.00141             |      |
| <b>47</b> | 2350000 |            | 3.35     |    | 1920  |     | 1910      |    | 7.8    |    | 0.31   |    | 3690 |      | <0.000508 |      | <0.0312               |       | <0.0263          |       | <0.0244     |      | <0.00185       |      | <0.00141             |      |
| <b>54</b> | 3120000 |            | 6.33     |    | 444   |     | 515       |    | 7.3    |    | 0.37   |    | 3470 |      | <0.000508 |      | <0.0312               |       | <0.0263          |       | <0.0244     |      | <0.00185       |      | <0.00141             |      |
| <b>60</b> | 3550000 |            | 1.3      |    | 21.9  |     | 334       |    | 6.8    |    | 0.27   |    | 4300 |      | <0.000508 |      | <0.0312               |       | <0.0263          |       | <0.0244     |      | 0.00371        |      | 0.00282              |      |
| <b>78</b> | 721000  |            | 1.98     |    | 1700  |     | 194       |    | 1.8    |    | <0.21  |    | 5050 |      | 0.011500  |      | <0.0312               |       | <0.0263          |       | 0.1740      |      | <0.00185       |      | <0.00141             |      |
| <b>81</b> | 2780000 |            | 11.6     |    | 5870  |     | 431       |    | 5.2    |    | 0.37   |    | 4940 |      | <0.000508 |      | <0.0312               |       | <0.0263          |       | <0.0244     |      | <0.00185       |      | <0.00141             |      |
| <b>84</b> | 3430000 |            | 2.1      |    | 446   |     | 207       |    | 8.6    |    | <0.21  |    | 2910 |      | <0.000508 |      | <0.0312               |       | <0.0263          |       | <0.0244     |      | 0.00371        |      | 0.00282              |      |
| <b>86</b> | 402000  |            | 3.07     |    | 169   |     | 320       |    | 2.2    |    | 0.22   |    | 379  |      | <0.000508 |      | <0.0312               |       | <0.0263          |       | 0.1770      |      | <0.00185       |      | <0.00141             |      |



contaminati sono i campioni dei sondaggi P60 e P86, con soli 5 analiti fuori norma.

Le distribuzioni areali dei tenori di questi analiti sono riportate nelle Figure dalla 5.2.1 alla 5.2.11. Si precisa che non sono state presentate le carte del *1,2,3-tricloropropano* e del *1,2-dibromoetano*, in quanto in tutti i campioni le analisi hanno rilevato valori inferiori ai limiti della rilevabilità strumentale (rispettivamente <0,0312 e <0,0263 µg/l).

In conclusione, risulta evidente la non conformità rispetto alla norma in vigore di tutti i campioni di acqua di falda della cassa, prelevati per le analisi.

In base all'andamento delle concentrazioni risulta che i tenori maggiori sono stati rilevati nelle parti settentrionali della cassa. In particolare, si fa riferimento ai grafici dell'*arsenico*, del *boro*, del *manganese*, del *nicel*, del *benzo(a)pirene* e, in maniera un po' meno evidente, il *ferro*. Distribuzioni a "spot", caratterizzate da piccole aree con valori elevati interessano il *benzo(g,h,i)perilene*, il *cloroformio*, il *piombo* e il *PCB*. I *solfati* si presentano con valori ovunque fuori norma, con le maggiori concentrazioni nelle parti orientali. Infine, si può notare che proprio nel settore settentrionale è ubicato il piezometro P13, caratterizzato dai valori fuori norma più elevati.

### 5.3 SALINITÀ DELLE ACQUE DI FALDA

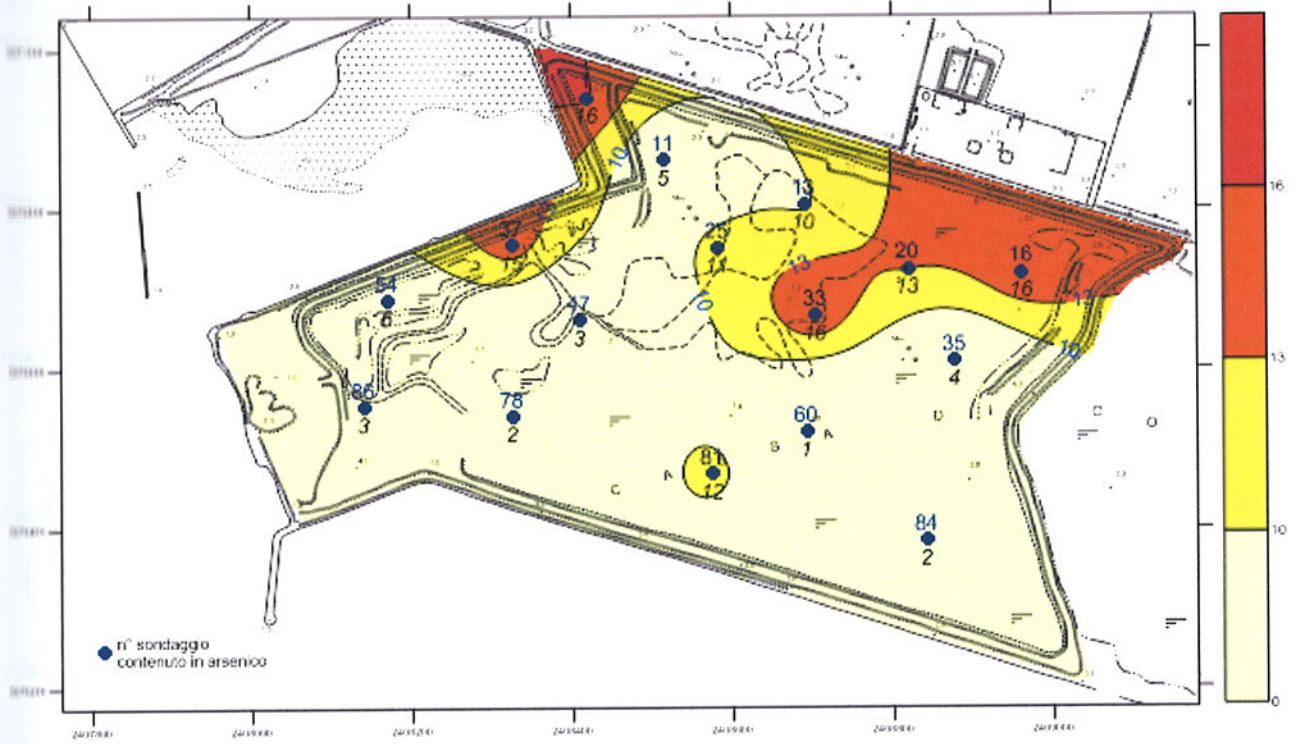
I valori della salinità delle acque di falda, ricalcolati e trasformati in g/l, sono presentati nella Tab. 3 e, in pianta, nella Fig. 5.3.1.

Tabella 3  
SALINITÀ DELL'ACQUA

| SOND              | 1   | 11   | 13   | 16   | 20   | 25  | 33   | 35   | 37  | 47   | 54   | 60   | 78   | 81   | 84   | 86  |
|-------------------|-----|------|------|------|------|-----|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|-----|
| SALINITÀ<br>(g/l) | 7.2 | 17.8 | 19.3 | 20.0 | 26.0 | 1.4 | 25.9 | 22.2 | 7.0 | 14.7 | 13.3 | 10.8 | 26.2 | 22.2 | 10.2 | 0.6 |

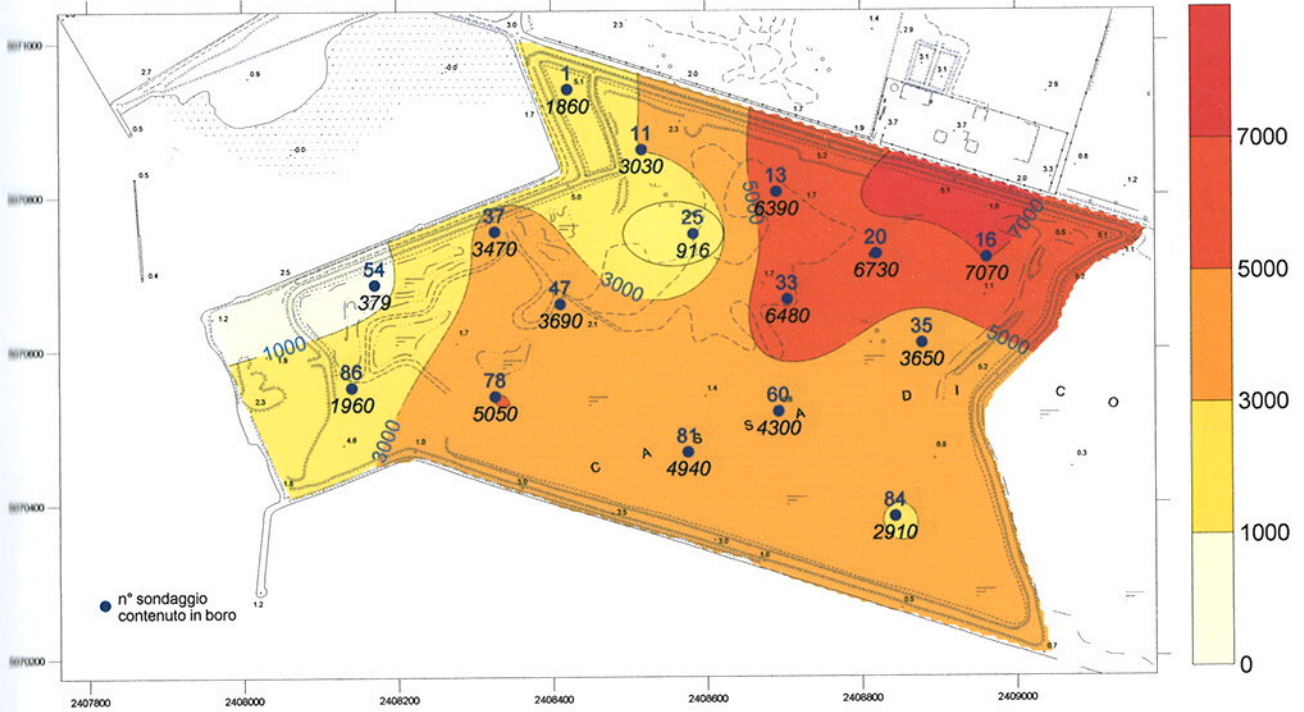


**Arsenico nelle acque di falda  
(valore limite 10 µg/l)**



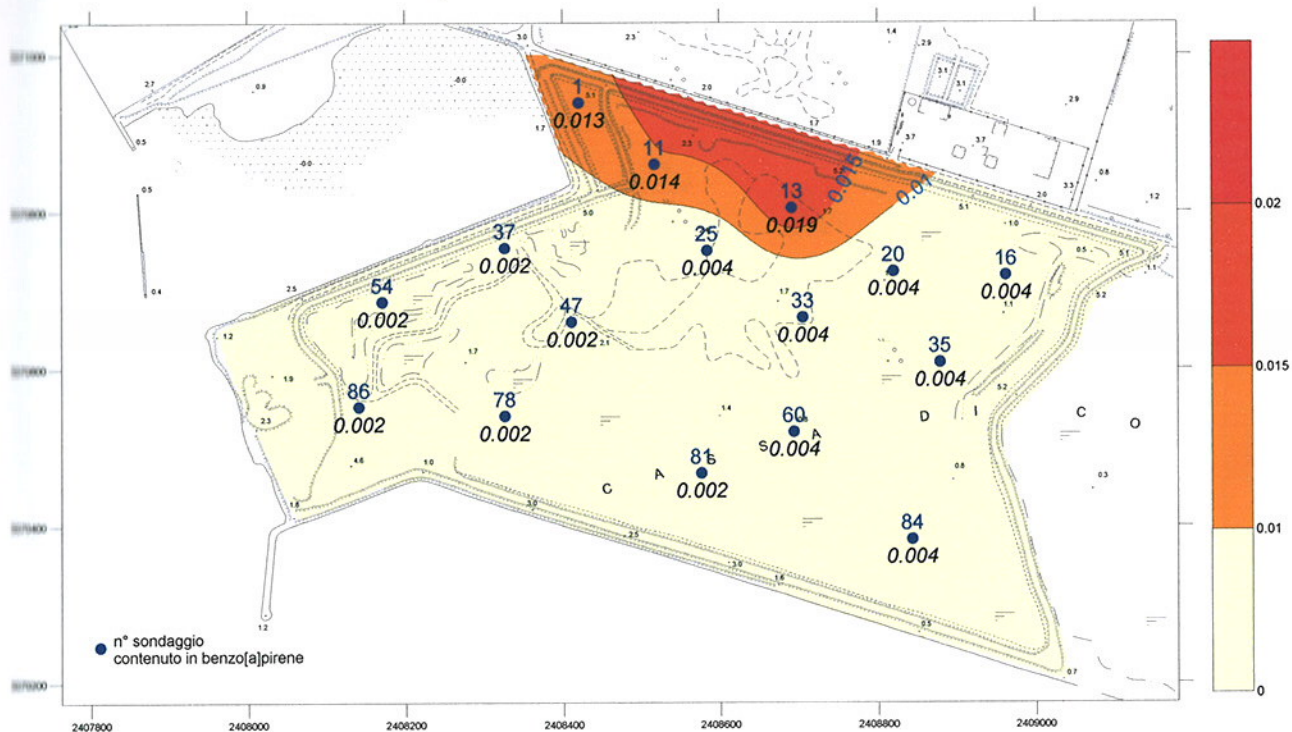
**Fig. 5.2.1**

**Boro nelle acque di falda  
(valore limite 1000 µg/l)**



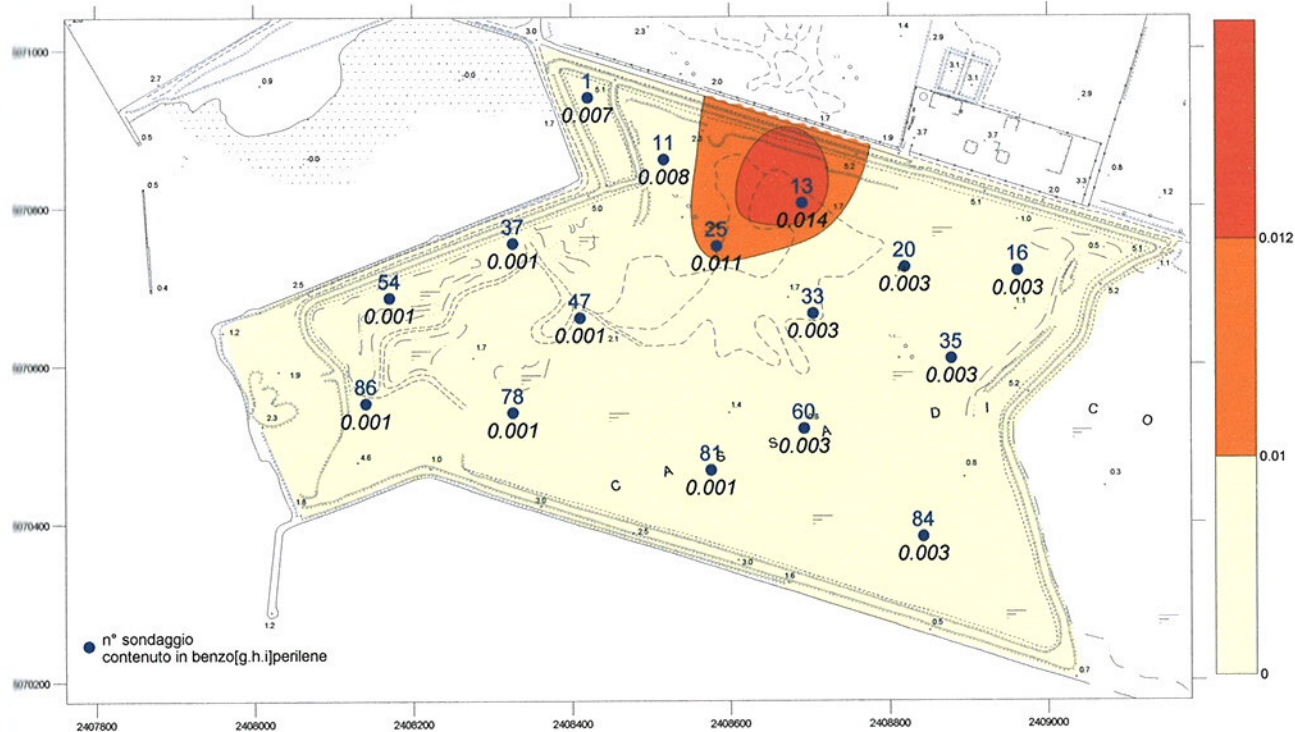
**Fig. 5.2.2**

**Benzo[a]pirene nelle acque di falda  
(valore limite 0.01 µg/l)**



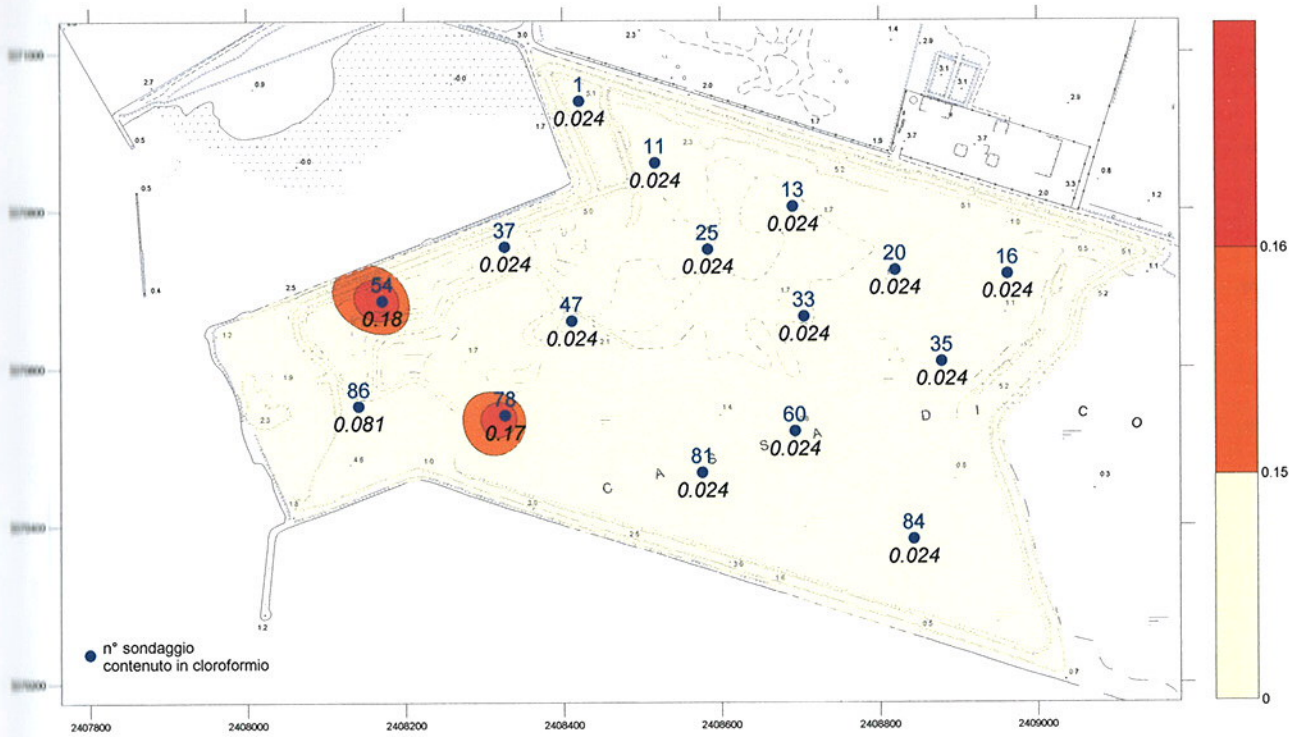
**Fig. 5.2.3**

**Benzo[g,h,i]perilene nelle acque di falda  
(valore limite 0.01 µg/l)**



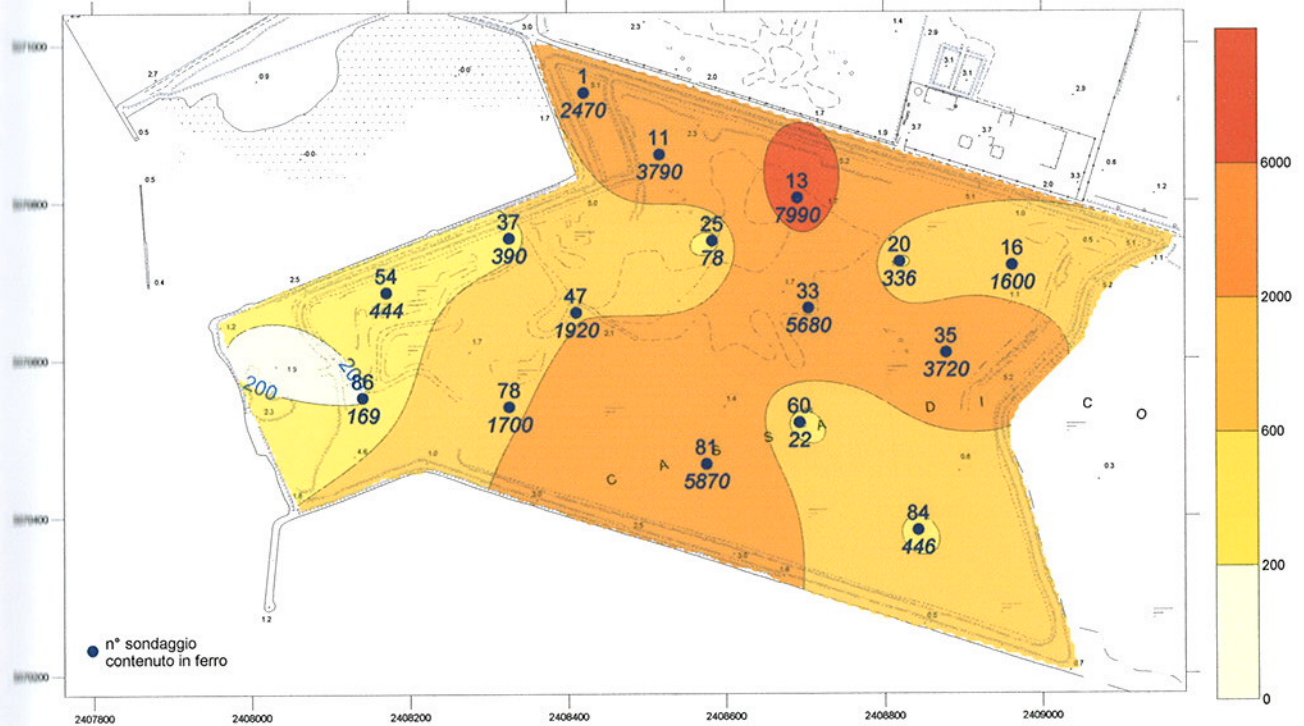
**Fig. 5.2.4**

**Cloroformio nelle acque di falda  
(valore limite 0.15 µg/l)**



**Fig. 5.2.5**

**Ferro nelle acque di falda  
(valore limite 200 µg/l)**



**Fig. 5.2.6**

**Manganese nelle acque di falda  
(valore limite 50 µg/l)**

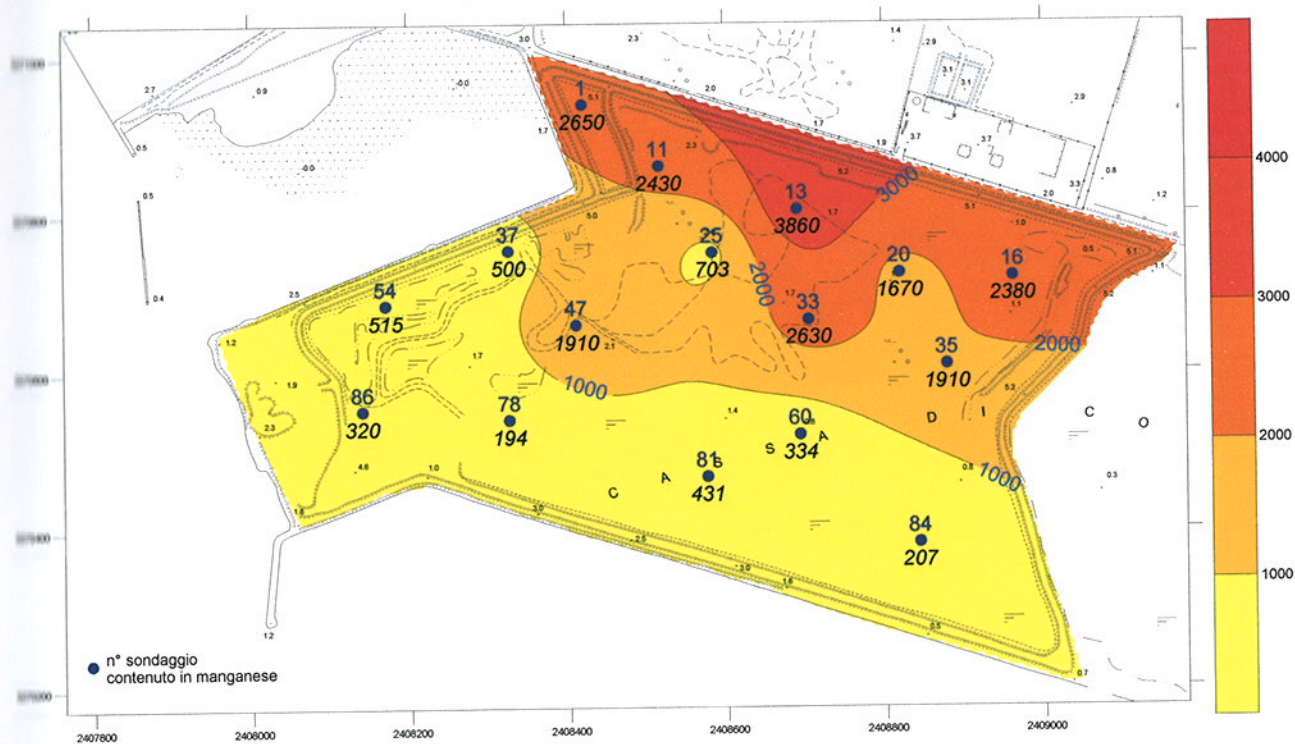


Fig. 5.2.7

**Nichel nelle acque di falda  
(valore limite 20 µg/l)**

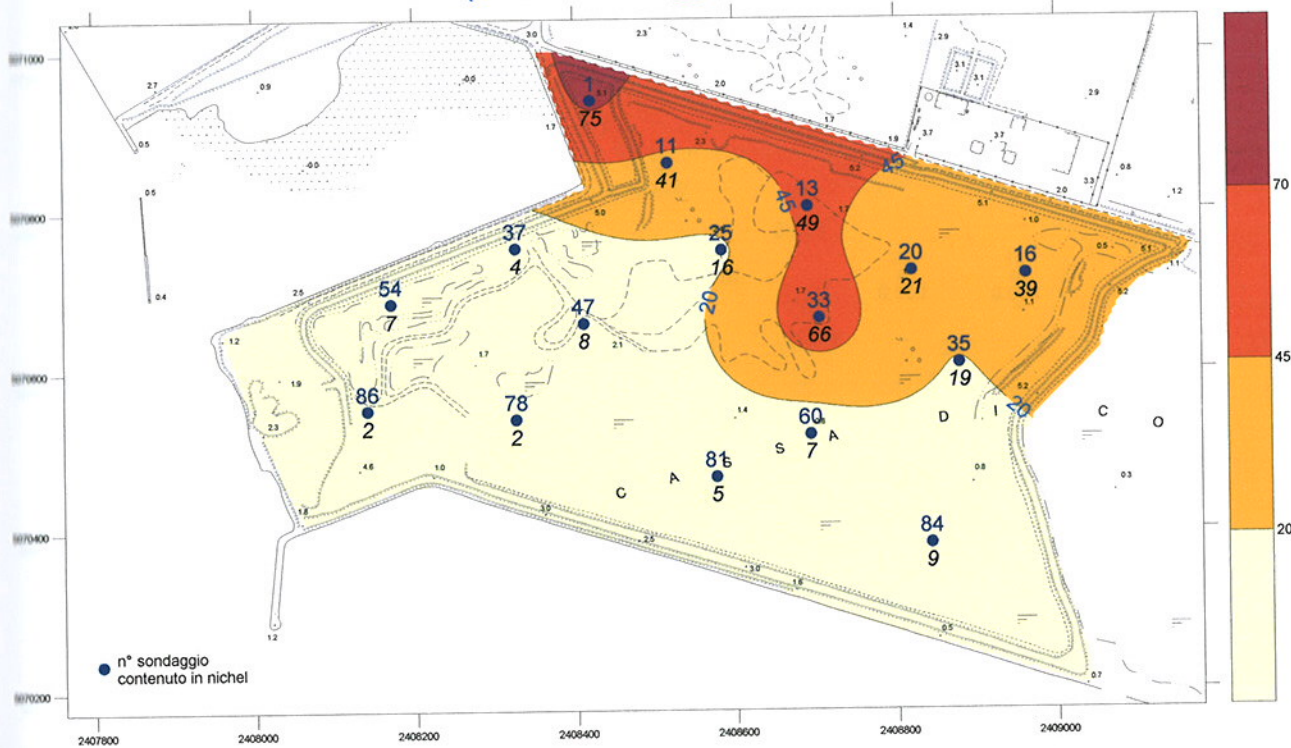


Fig. 5.2.8



Solfati nelle acque di falda  
(valore limite 250000 µg/l)

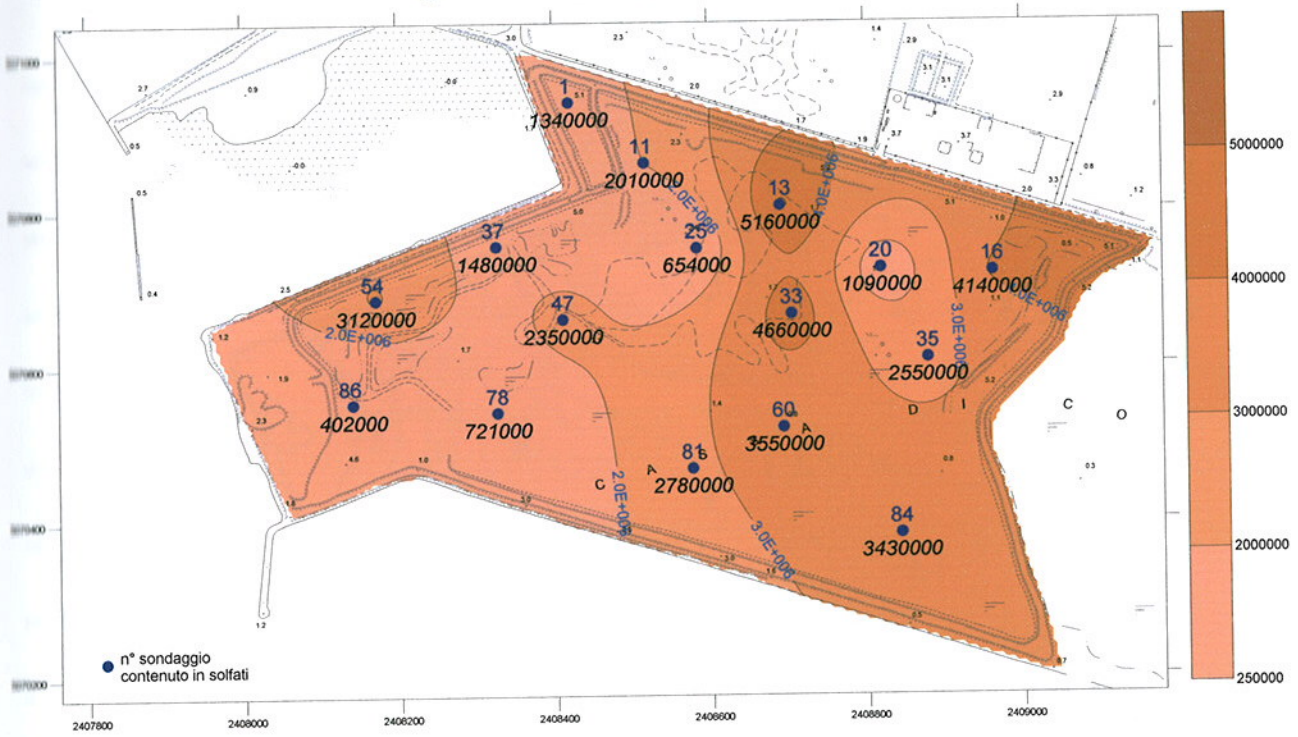


Fig. 5.2.11

### SALINITA' DELLE ACQUE DI FALDA

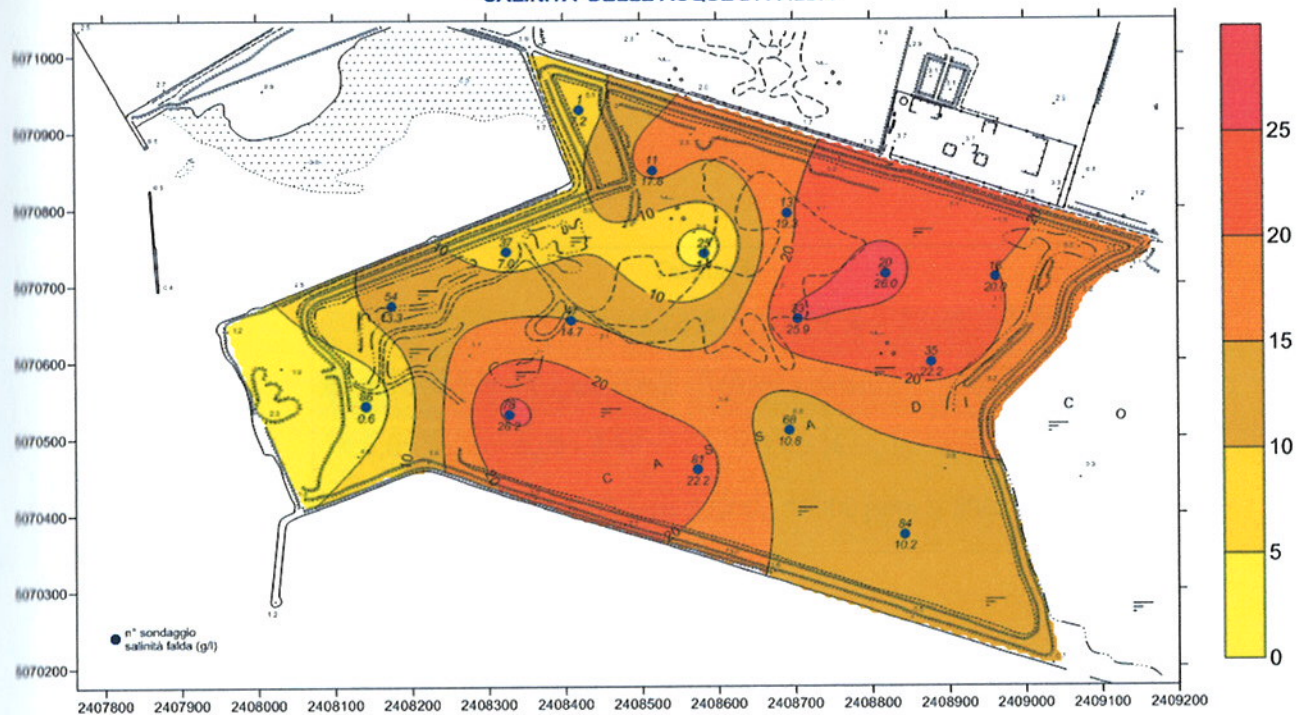


Fig. 5.3.1



Per quanto riguarda la classificazione della salinità delle acque si fa riferimento ai limiti riportati nella Tab. 4.

Tabella 4

| SALINITÀ DELL'ACQUA |                 |                   |             |
|---------------------|-----------------|-------------------|-------------|
| Acqua dolce         | Acqua salmastra | Acqua salata      | Salamoia    |
| < 0,05 %            | 0,05 - 3 %      | 3 - 5 %           | > 5 %       |
| < 500 ppm           | 500 - 30000 ppm | 30000 - 50000 ppm | > 50000 ppm |

Quindi, per l'acqua dolce i valori di salinità considerati sono minori di 5 g/l; per l'acqua salmastra i valori sono compresi tra 5 e 30 g/l; per l'acqua salata i valori sono maggiori di 30 g/l.

Dai dati ottenuti risulta che campioni con tenori di salinità nel campo dell'acqua dolce, attorno a 1 g/l, circa caratterizzano i sondaggi P86 e P25.

Valori che ricadano nel campo dell'acqua salmastra, ma quasi al limite dell'acqua dolce, sono quelli rilevati nei sondaggi P1 e P37, con 7 g/l circa, e P60 e P84 con 10 g/l circa.

I restanti 10 punti evidenziano tenori più elevati e molto più omogenei, mediamente attorno a 20 g/l circa, valori questi che ricadono nella parte medio-alta del campo dell'acqua salmastra.

In conclusione, in base alla distribuzione dei valori di salinità nelle acque di falda (Fig. 5.3.1) risulta che nella cassa vi sono due zone con tenori più elevati, quindi maggiormente soggette alla presenza di acqua di mare: una a nord-est (attorno al sondaggio P20) e l'altra a sud-ovest (attorno al sondaggio P78), ambedue con valori massimi di 26 g/l circa, a testimoniare la penetrazione dell'acqua marina nella falda.





#### **5.4 QUOTA DEL PIANO CAMPAGNA E DELL'ACQUA DI FALDA**

La Fig. 5.4.1 mostra la situazione planimetrica all'interno della cassa, basata sulle quote dei punti di sondaggio.

Le quote più elevate, oltre 4 m sul l.m.m., sono state rilevate nell'estremo settore occidentale, adiacente al cancello di ingresso. Verso est il piano campagna tende ad abbassarsi gradualmente fino a valori di poco superiori al metro in prossimità del confine con il SIC.

Nella Fig. 5.4.2 sono riportati i valori di quota del pelo libero della falda rilevati nei 16 piezometri installati nell'area della cassa. In tutti i punti di misura la falda si trova a quote superiori rispetto al l.m.m., mediamente attorno al metro, in un intervallo compreso tra 0,5 e 2 m. Le quote più elevate sono localizzate nel settore occidentale della cassa.

In conclusione, le quote della superficie topografica rispecchiano le modalità di riempimento della cassa: gran parte dei materiali sono stati sversati preferibilmente nei punti più vicini alle zone di provenienza ed, in particolare, alle aree di dragaggio in mare.

Per quanto riguarda l'acqua sotterranea, la distribuzione dei valori di quota del pelo libero mostra una generale diminuzione di quota della falda dal settore sud-occidentale verso nord e verso est. Questo andamento ricalca, in maniera attenuata, ma fedele, la morfologia del terreno.

#### **5.5 PERMEABILITÀ DEI TERRENI SOTTOSTANTI GLI ARGINI**

In base alle prove Lefranc effettuate in situ (sondaggi A2, A4, A6, A8, A11, A12, A13, A14) e alle prove in cella triassiale effettuate in laboratorio geotecnico (sondaggi A3, A7, A11, A15) risulta che i valori di permeabilità rilevati nei terreni di appoggio degli argini sono compresi tra  $1,05 \text{ E-}7$  e  $1,83 \text{ E-}5$  m/s. In dettaglio i valori rilevati sono riportati nella seguente Tab. 5.

### QUOTA DEI TERRENI DELLA CASSA



Fig. 5.4.1

### QUOTA DELLA FALDA

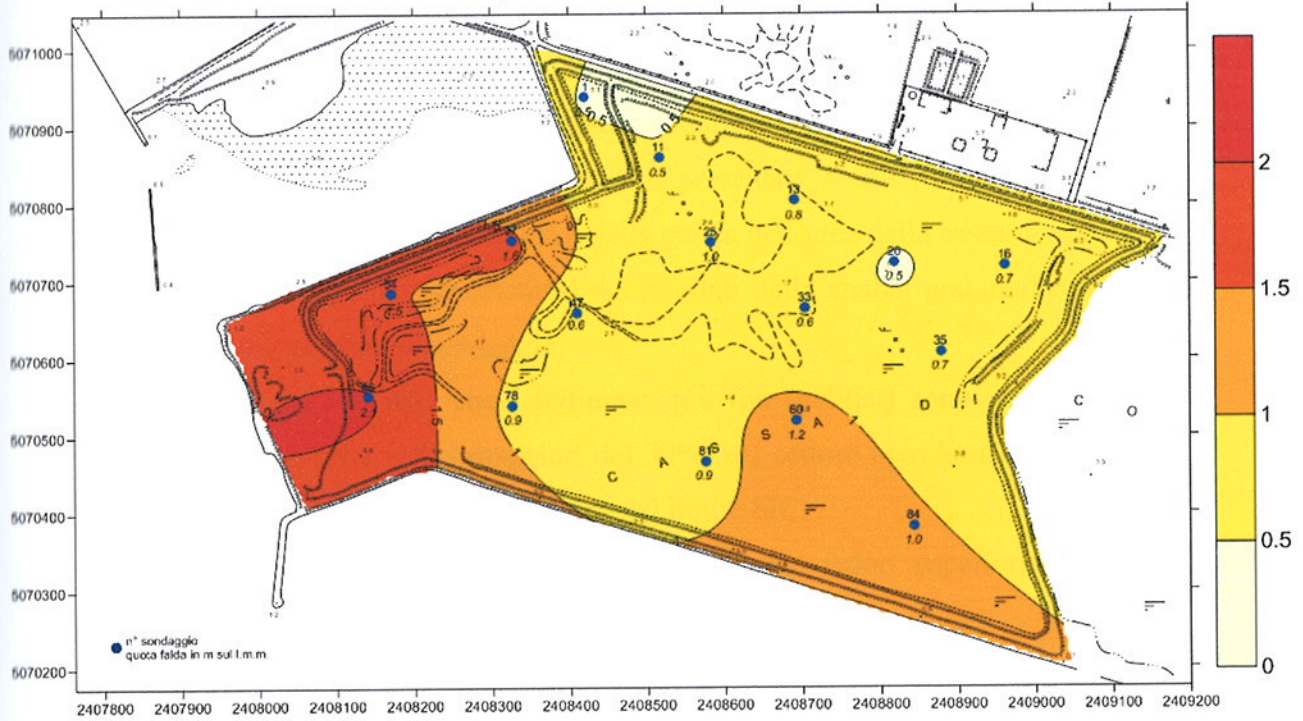


Fig. 5.4.2



Tabella 5

PERMEABILITÀ DEI TERRENI SOTTO GLI ARGINI

| Sond.      | A1   | A2       | A3       | A4       | A6       | A7       | A8       | A9       | A10      | A11      | A12      | A13      | A14      | A15      |
|------------|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| K<br>(m/s) | n.r. | 8,47E-06 | 4,31E-07 | 1,83E-05 | 4,11E-06 | 1,05E-07 | 1,33E-05 | 5,10E-06 | 1,43E-06 | 1,31E-07 | 1,80E-06 | 5,32E-06 | 2,98E-06 | 1,39E-07 |

In conclusione, i terreni sottostanti gli argini presentano un grado di permeabilità mediamente definibile come “basso”. I più permeabili sono quelli posti lungo i lati ovest e sud con valori medi pari, rispettivamente, a 9,07 e 5,84 E-06 m/s. Sedimenti meno permeabili sono quelli degli argini posti a nord e ad est, con valori medi attorno a 2,8 E-06 m/s.

## 5.6 CARATTERISTICHE GRANULOMETRICHE E CONTENUTO IN CARBONATO DI CALCIO NEI TERRENI

In base alle analisi granulometriche eseguite su tutti i campioni (da 3 a 5), prelevati nei singoli sondaggi risulta che mediamente la famiglia granulometrica più abbondante è costituita dalla pelite (limo e argilla), con il 47%, seguita dalla sabbia con il 44%, nettamente subordinata è la ghiaia, con il 9%. Questi dati confermano quanto evidenziato dalle stratigrafie dei sondaggi. Nelle Figg. 5.6.1, 5.6.2 e 5.6.3 sono presentate le distribuzioni percentuali medie della pelite, della sabbia e della ghiaia nell'area della cassa. I valori sono ricavati dalle medie aritmetiche dei risultati delle analisi granulometriche dei campioni di ciascun sondaggio.

La Fig. 5.6.1 mostra che i sedimenti più fini (pelitici) sono particolarmente abbondanti (con valori maggiori del 70%) nel settore meridionale prossimo al mare e in quello orientale a ridosso del limite SIC.

I sedimenti sabbiosi (Fig. 5.6.2), anch'essi con valori superiori al 70%, si trovano in due aree poste nel settore settentrionale.

### Valori medi della pelite (%)

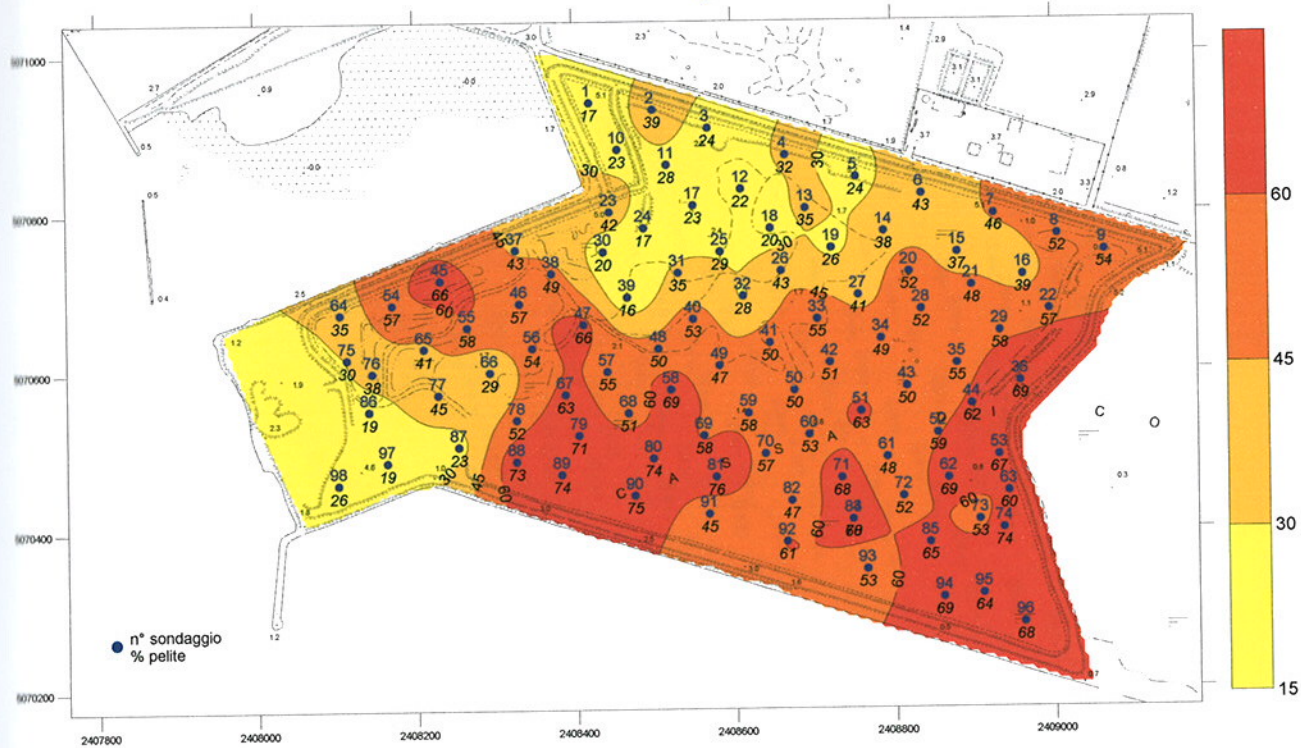


Fig. 5.6.1

### Valori medi della sabbia (%)

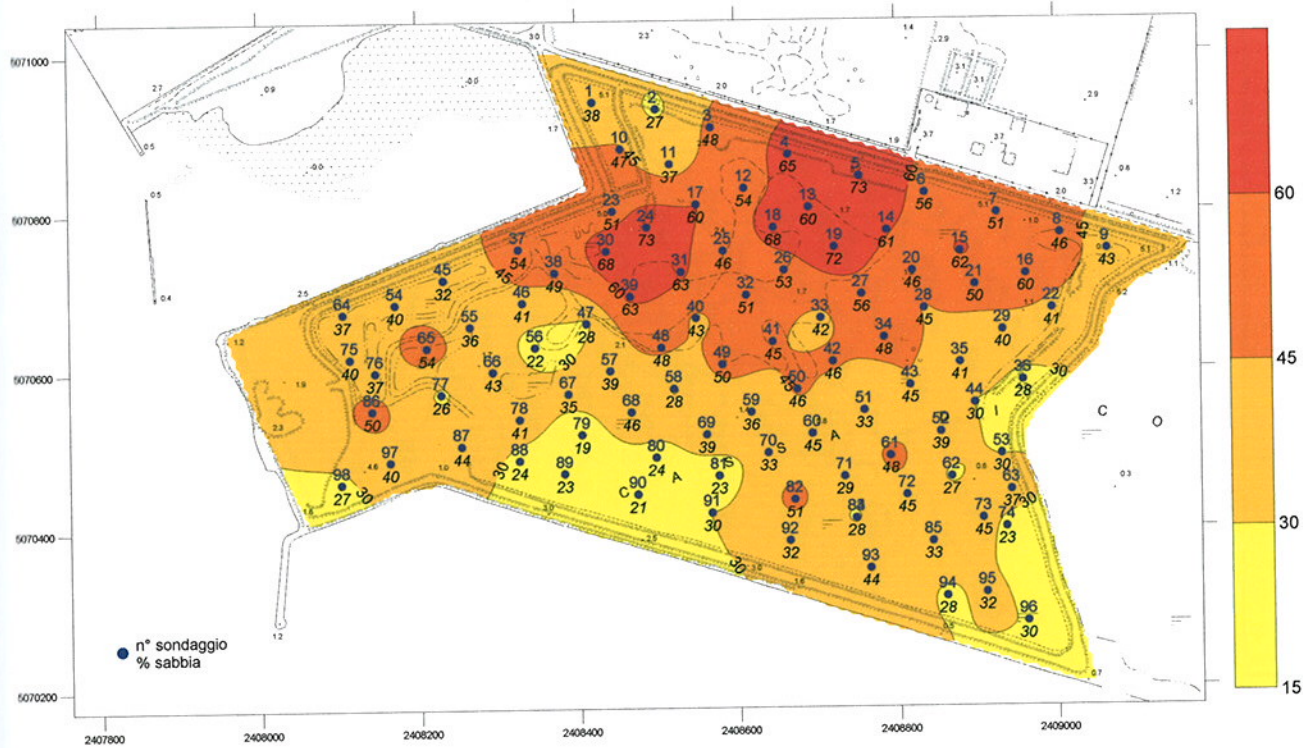


Fig. 5.6.2

### Valori medi della ghiaia (%)

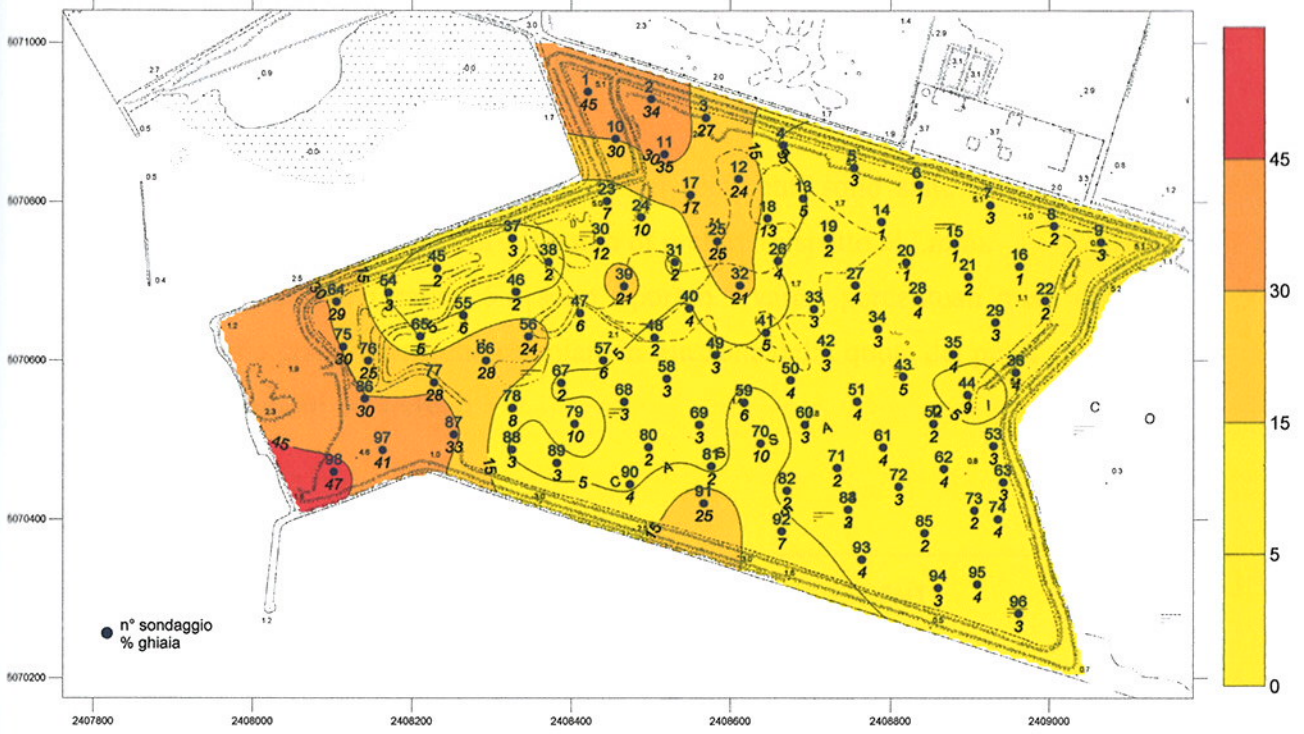


Fig. 5.6.3

### Carbonato di calcio (%) nei sedimenti

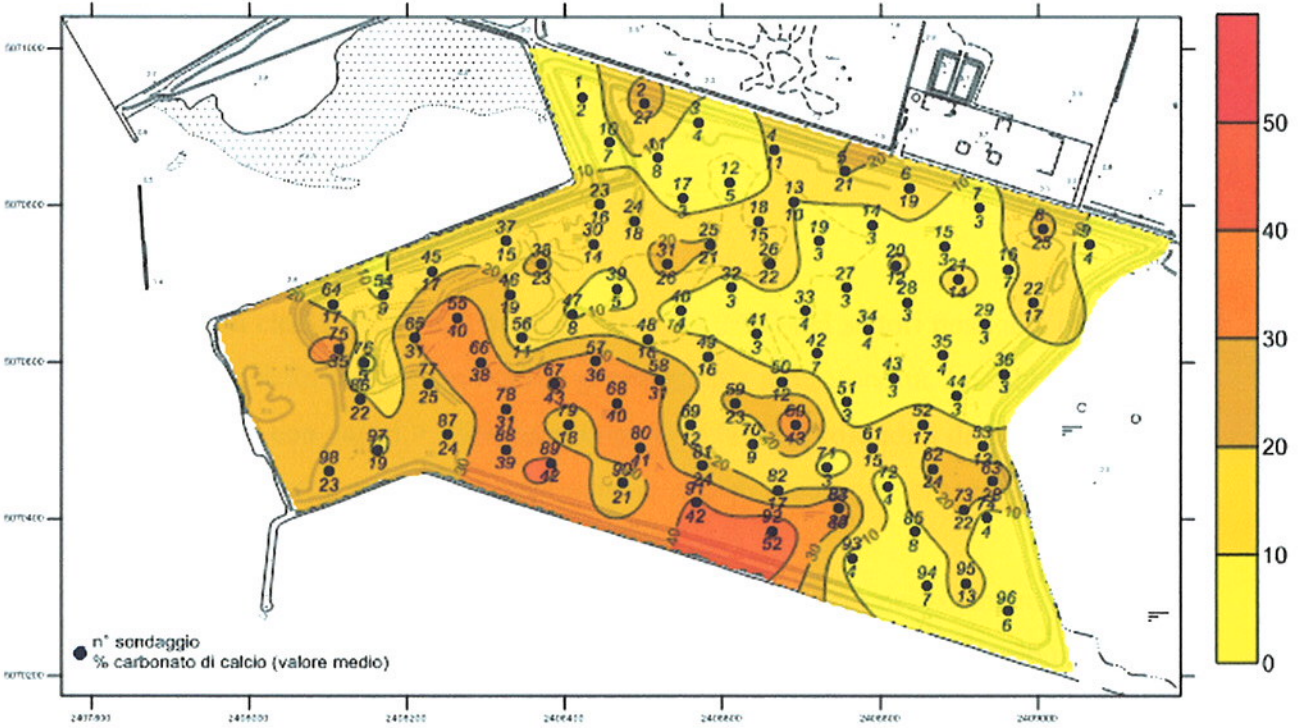


Fig. 5.6.4

Le percentuali più elevate (> 45%) dei sedimenti ghiaiosi sono state rilevate in due piccole aree localizzate alle estremità nord- e sud-occidentali della cassa (Fig. 5.6.3).

Le caratteristiche granulometriche dei sedimenti sono state esaminate anche tenendo conto della quota del punto di prelievo rispetto al l.m.m.

Nella seguente Grafico 5.6 sono riportati i valori percentuali medi delle tre famiglie granulometriche calcolate in funzione della quota dei punti di prelievo dei campioni nel terreno.

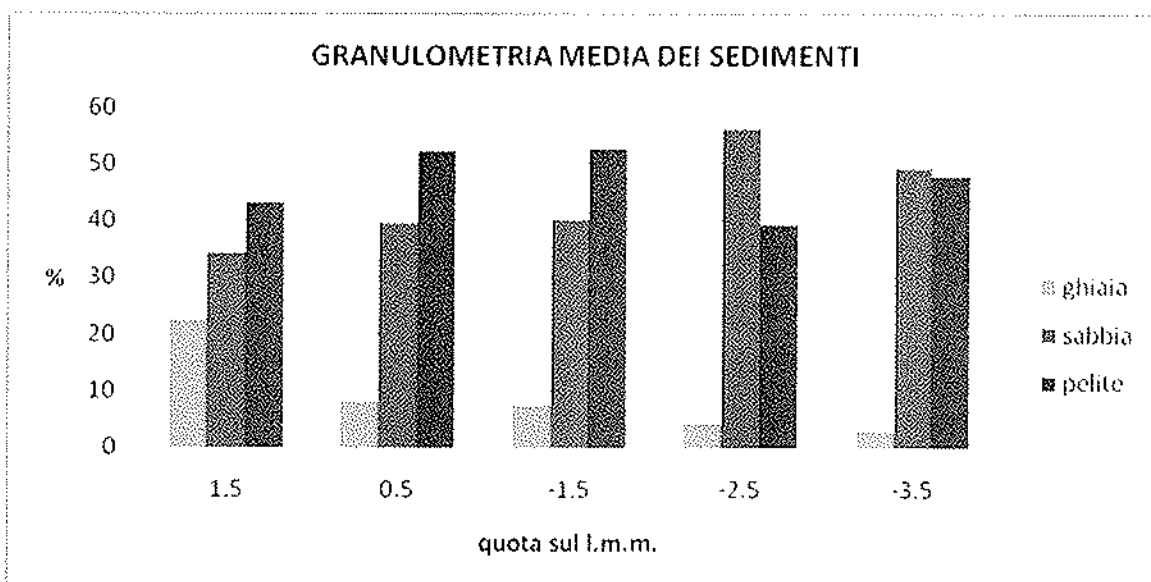


Grafico 5.6

Risulta che la ghiaia è abbondante (oltre il 20%) nei settori posti alle quote più elevate della cassa e diminuisce gradualmente in profondità. La sabbia, sempre presente con valori > 35%, raggiunge il 55% alle profondità di 2,5 m circa. La pelite mostra alle varie profondità i valori medi più omogenei e sempre consistenti, compresi tra 40 e 50% circa.

Per quanto riguarda il contenuto in carbonato di calcio nei sedimenti le analisi hanno mostrato che i valori sono compresi tra 1,5 e 76%. La distribuzione dei valori medi del contenuto in carbonato di calcio dei campioni prelevati in ogni



sondaggio (Fig. 5.6.4) mostra che i tenori più elevati sono stati rilevati nel settore sud-occidentale della cassa, mentre quelli più bassi competono al settore centrale ed orientale.

In conclusione, i sedimenti più fini che condizionano le caratteristiche di permeabilità dei sedimenti sono presenti con valori elevati, maggiori del 70%, nel settore sud prospiciente al mare e in quello est a ridosso del SIC.



## 6. CONCLUSIONI

In base alle risultanze delle indagini effettuate in corrispondenza della cassa di colmata del Porto di Monfalcone che avevano lo scopo di caratterizzare la qualità dei sedimenti e delle acque della sottostante falda in base alle norme vigenti, si possono evidenziare le seguenti conclusioni sintetizzate per punti.

- le analisi di laboratorio, eseguite su 349 campioni di terreno prelevati a varie profondità nei sondaggi e su 5 campioni prelevati nei cumuli, hanno dimostrato che i sedimenti costituenti la colmata non presentano segni di inquinamento, in quanto i valori di concentrazione degli analiti considerati risultano sempre inferiori, e quindi conformi, rispetto ai limiti CSC (concentrazione soglia di contaminazione) previsti dal Decreto Legislativo del 3 aprile 2006, n.152.
- Tutti i campioni di acqua di falda della cassa, prelevati per le analisi sono risultati non conformi rispetto al Decreto Legislativo del 3 aprile 2006, n. 152. Il superamento dei limiti è stato rilevato in ogni campione per almeno 5 analiti esaminati. La distribuzione areale delle concentrazioni mostra che i valori più elevati sono stati registrati nel settore nord della cassa, situazione questa che potrebbe indicare la provenienza di acque contaminate da zone esterne alla cassa, poste più a nord.
- le acque della falda presentano concentrazioni di sali simili a quelle delle acque salmastre, a conferma della penetrazione delle acque marine nella cassa di colmata. I valori più elevati di salinità (26 g/l circa) sono stati riscontrati a nord-est e a sud-ovest dell'area in esame.
- il grado di permeabilità dei terreni sottostanti gli argini può essere definito come "basso", con valori di "k" dell'ordine di E-06 m/s.





- le analisi granulometriche hanno evidenziato che i sedimenti più fini (peliti), responsabili delle condizioni di bassa permeabilità dei terreni, si trovano maggiormente nel settore meridionale più prossimo al mare e in quello orientale, al confine con il SIC, con valori medi molto alti (>70%). Inoltre, in base alla distribuzione delle granulometrie in profondità, risulta che in tutto lo spessore esaminato la pelite è presente nei materiali della cassa con valori sempre elevati, mediamente compresi tra 40 e 50% circa.

Quindi, dalle indagini eseguite risulta che mentre i terreni della cassa di colmata presentano valori di concentrazione degli analiti sempre inferiori a quelli previsti dal Decreto 152/06, tutti i campioni di acqua di falda sono caratterizzati da valori superiori a quelli limite del suddetto decreto.

La distribuzione dei valori fuori norma fa ritenere che l'alterazione della falda sia da imputarsi alla contaminazione da parte di acque che tendono a fluire da Nord, dalle aree immediatamente a monte della cassa, verso Sud.

Attualmente, in base ai dati ottenuti, una soluzione adeguata potrebbe essere la messa in sicurezza permanente del sito, mediante la realizzazione di sistemi di impermeabilizzazione atti a confinare la cassa, isolandola dall'immediato intorno marino e terrestre, sfruttando, inoltre, la "bassa" permeabilità dei terreni naturali su cui posano i sedimenti refluiti, come accertato dalle prove di permeabilità nei sedimenti in loco, posti al di sotto degli argini.

Responsabile della ricerca

Prof. Giampiero Catani

GC

Trieste, 8/6/2010